



Représentation et Partage de Connaissances en Neuroanatomie : Application à l'Annotation Sémantique des Images IRM du Cerveau

Ammar Mechouche

► To cite this version:

Ammar Mechouche. Représentation et Partage de Connaissances en Neuroanatomie : Application à l'Annotation Sémantique des Images IRM du Cerveau. Informatique [cs]. Université Rennes 1, 2009. Français. NNT : . tel-02336538

HAL Id: tel-02336538

<https://theses.hal.science/tel-02336538>

Submitted on 28 Oct 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.

N° d'ordre : 123

ANNÉE 2009



THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1

sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne

pour le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1
(mention Génie Biologique et Médical)

École doctorale : Vie-Agro-Santé

présentée par

Ammar MECHOUCHE

Équipe d'accueil : VisAGeS U 746 - IRISA
- Vision Action et Gestion d'Information en Santé -
Composante universitaire : Sciences de la vie et de l'environnement

**Représentation et partage de connaissances en neuroanatomie : application à l'annotation
sémantique des images IRM du cerveau.**

Thèse soutenue à Rennes le 28 avril 2009 devant le jury composé de

Marie-Odile CORDIER	Professeur des Universités, Université de Rennes 1	(présidente)
Djamel ZIGHED	Professeur des Universités, Université Lumière de Lyon	(rapporteur)
Isabelle BLOCH	Professeur des Universités, ENST/TSI, Paris	(rapporteur)
Bernard GIBAUD	Chargé de Recherches, INSERM	(directeur de thèse)
Christine GOLBREICH	Professeur des Universités, Université de Versailles Saint-Quentin	(directrice)
Xavier MORANDI	Professeur des Universités - Praticien hospitalier, CHU de Rennes	(examineur)

Table des matières

Remerciements	1
Introduction	1
I Représentation et partage de connaissances en neuroanatomie dans le cadre du Web Sémantique	5
1 Éléments introductifs	7
	7
1.1 Web Sémantique	9
1.2 Ontologies	16
1.3 Les Logiques de Description	25
1.4 Les règles	37
1.5 Les outils et langages développés dans le cadre du Web Sémantique	43
1.6 Le Web Sémantique dans le domaine biomédical	53
2 Modélisation de l'anatomie sulco-gyrale	57
	57
2.1 Rappels sur l'anatomie	58
2.2 Modélisation et représentation de l'anatomie sulco-gyrale	71
3 Contribution : l'ontologie sulco-gyrale en OWL DL	93
	93

3.1	Introduction	94
3.2	Défis à relever	95
3.3	Sources de modélisation	96
3.4	Les différents éléments de l'ontologie	97
3.5	Représentation en OWL DL	106
3.6	Approches similaires en neuroimagerie	111
3.7	Discussion	112
II	Identification de structures anatomiques dans des images du cerveau	115
4	Etat de l'art sur l'interprétation et l'annotation sémantique des images du cerveau	117
		117
4.1	Modélisation des relations méréologiques et spatiales	119
4.2	Approches numériques d'annotation d'images du cerveau	127
4.3	Approches symboliques et mixtes d'annotation d'images du cerveau	130
4.4	Discussion	138
5	Contribution : Un nouveau système hybride pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau	139
		139
5.1	Introduction	140
5.2	Combiner le numérique et le symbolique en neuroimagerie	141
5.3	Un système hybride d'annotation des structures anatomiques extraites des images IRM du cerveau	142
5.4	Prolongement des patches en profondeur	160
5.5	Partage des annotations	161
5.6	Discussion	162
5.7	Conclusion et perspectives	164
		1

TABLE DES MATIÈRES

iii

	1
	7
6 Détails sur l'extraction des patches	7
6.1 Extraction des patches	8
6.2 Diagramme de séquence relatif au système d'annotation	11

Table des figures

1.1	Les ressources et les liens peuvent avoir des types en Web Sémantique : http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw	12
1.2	Aussi bien le Web que le Web Sémantique tolèrent l'information partielle : http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw	12
1.3	La définition des droits d'accès définie par un enchaînement de la confiance. http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw	13
1.4	Architecture pour la construction et l'évolution des ontologies : http://perso.ecp.fr/~aufaurema/EcolIA-Aufaure-22mars08.pdf	21
1.5	Le fragment de la logique du premier ordre choisi pour les logiques de description.	26
1.6	Quelques extensions classiques de la logiques de description $\mathcal{ALC}$	30
1.7	Quelques constructeurs de OWL DL.	35
1.8	Axiomes du langage OWL.	35
1.9	Exemple de représentation en OWL (http://www.comlab.ox.ac.uk/people/ian.horrocks/Seminars/download/needham.ppt).	36
1.10	Les différents langages intervenant dans le Web Sémantique (http://www.oxygen.lcs.mit.edu/images/SemanticWeb.jpg).	37
1.11	Les langages de couche du Web Sémantique (http://www.oxygen.lcs.mit.edu/images/SemanticWeb.jpg).	44
1.12	Graphe sujet-prédicat-objet représentant un triplet RDF (http://www.clever-age.com/veille/clever-link/local/cache-vignettes/L436xH160/triplet_rdf-47921.png).	44
1.13	Un document RDF utilisant l'ontologie FOAF (http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF).	47
1.14	Un exemple de requête SPARQL (http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF).	47
1.15	Résultats SPARQL (http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF).	48

1.16 Protégé Frames (http://protege.stanford.edu/images/instances-tab.jpg).	49
1.17 Protégé OWL (http://protege.stanford.edu/plugins/owl/images/OWL\discretionary-{}{}Classes-FamilyDestination.png).	50
1.18 L'éditeur SWOOP (http://www.mindswap.org/2004/SWOOP/).	51
1.19 L'architecture de SWOOP (http://www.mindswap.org/2004/SWOOP/).	52
1.20 Transformation de de connaissances représentées en OWL en un programme datalog disjonctif, effectué par KAON2 (http://km.aifb.uni-karlsruhe.de/ws/prowl2006/prowl06_4on1.pdf).	53
2.1 Vue latérale d'un cerveau.	59
2.2 Vue supérieure d'un cerveau. On distingue les deux hémisphères globalement symétriques.	60
2.3 Coupe sagittale du cerveau passant par le plan inter-hémisphérique.	61
2.4 Décomposition du cortex cérébral en cinq lobes : lobe frontal (bleu), lobe temporal (violet), lobe pariétal (vert), lobe occipital (jaune) et lobe limbique (rouge) [53].	62
2.5 Représentation schématique d'un neurone (http://fr.wikipedia.org/wiki/Neurone).	63
2.6 Une coupe axiale du cerveau montrant les deux couches correspondant à la matière grise et la matière blanche.	64
2.7 Faisceaux de fibres obtenus à partir de données d'IRM de diffusion (http://www.biomed.ee.ethz.ch/research/bioimaging/brain/diffusion_fiber_tracking).	65
2.8 Impact d'une tumeur sur l'anatomie du cerveau.	66
2.9 Une IRM 3-Tesla (http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Modern_3T_MRI.JPG).	67
2.10 Principales structures sulco-gyrales (http://homepages.widged.com/mlange/teaching/CNL/helpers/lateral.gif).	69
2.11 Représentation spatiale 3D des structures anatomiques sulco-gyrales [53].	70
2.12 Exploration interactive 3D avec l'atlas Voxel-Man (http://www.voxel-man.de/gallery/).	75
2.13 Organisation taxonomique de l'ontologie de l'anatomie de Digital Anatomist, selon [173].	83
2.14 Le Foundational Model Explorer (FME) : explorateur de la base FMA (http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/FME/index.html).	84

2.15	La représentation de <i>FMA</i> en Protégé Frames.	85
2.16	(a) : Position des sillons dans la hiérarchie des concepts dans <i>FMA</i> , (b) Position des gyri dans la hiérarchie des concepts dans <i>FMA</i>	86
2.17	Implémentation du modèle abstrait de l'anatomie sulco-gyrale proposé par Dameron [53].	88
2.18	Les trois niveaux correspondant à la hiérarchie taxonomique des structures anatomiques corticales définis dans [53].	89
3.1	Définition du concept Angular gyrus dans la modélisation de Dameron. . .	96
3.2	Une partie de la définition du concept Angular gyrus dans <i>FMA</i>	97
3.3	Hiérarchie des concepts dans l'ontologie sulco-gyrale.	98
3.4	Illustration des concepts de l'ontologie applicative : Patch, SulcusPart et ConventionalSeparation.	99
3.5	Les principales relations mérélogiques définies dans l'ontologie et leurs car- actéristiques.	100
3.6	Les principales relations topologiques définies dans l'ontologie et leurs car- actéristiques.	101
3.7	Différents schémas explicitant la sémantique des relations de l'ontologie. . .	102
3.8	L'ontologie partageable éditée sous Protégé.	107
3.9	Importation d'ontologies et création de classes en OWL.	108
3.10	Edition sous Protégé de la définition du sillon RightAscendingRamus	109
3.11	Représentation en OWL de la définition du sillon RightAscendingRamus . .	110
3.12	Un exemple de réification de classes et d'instances, respectivement.	111
3.13	Représentation en SWRL des règles.	112
4.1	Représentation des relations topologiques <i>RCC8</i> [51].	122
4.2	Un exemple d'utilisation de la logique floue.	124
4.3	Extrait de la hiérarchisation des relations spatiales dans l'ontologie des re- lations floues de [107].	126
4.4	(a) : Intégration syntaxique entre l'ontologie des relations spatiales et le modèle de représentation floue pour les relations directionnelles [107], (b) Un ensemble flou trapézoïdal, sa fonction d'appartenance et la description des types de données XML flous correspondants [107].	127
4.5	(A et B) résultat de parcellisation sur une surface corticale gonflée [44]. (C) parcellisation cytoarchitectonique et fonctionnelle du cortex cérébral humain, comparée à (D) proposée par [44].	129

4.6	(a) reconnaissance des sillons par la méthode de [167]. (b) Classification des sillons par la méthode de [127].	130
4.7	Diagramme d'interprétation des images du cerveau, basé sur un algorithme génétique [193].	134
5.1	Un exemple de région d'intérêt, sélectionnée par l'utilisateur pour l'annotation. (1) Une boîte englobante est ajustée sur la région à annoter, et l'ensemble des traces externes des sillons (segments) incluses dans cette boîte est automatiquement extrait. (2) L'utilisateur forme de petites surfaces appelées patches, en prolongeant les segments de sillons par des séparations conventionnelles.	143
5.2	Les principales étapes de l'annotation.	144
5.3	Différentes vues sur les SPAMs.	145
5.4	(a) : <i>fichier#1</i> : extrait du fichier décrivant les relations de topologie et d'orientation entre les patches et les segments de sillons, (b) : <i>fichier#2</i> : extrait du fichier décrivant les relations de topologie et d'orientation entre les SPAMs et les segments de sillons.	147
5.5	(A gauche) les différentes directions cardinales entre deux régions A et B sur un plan, (à droite) définitions formelles des frontières interfaces correspondant aux différentes directions cardinales sur un plan [99].	148
5.6	Calcul de l'orientation antéro-postérieure (droite-gauche) entre un patch et un segment de sillon : (a) si on compare les coordonnées du barycentre de la boîte minimale englobante du patch $P1$ et les coordonnées du barycentre de la boîte minimale englobante du segment $S1$, alors l'orientation trouvée sera erronée dans ce cas ; cependant, si on compare les coordonnées des barycentres de leurs boîtes minimales englobantes des frontières interfaces (b), alors l'orientation trouvée sera correcte.	149
5.7	Calcul des orientations entre les SPAMs et les segments de sillons qui les bordent.	150
5.8	Processus complet de l'annotation : les traitements 1, 2 et 3 contribuent à la labellisation des patches, et le traitement 4 à la labellisation des segments de sillons.	151
5.9	Code java utilisé pour récupérer la liste des parties de sillons définis dans notre ontologie.	153

5.10	L'image 1 montre les hypothèses inférées pour un patch sélectionné par l'utilisateur. L'image 2 montre comment l'utilisateur interagit avec le système pour la détermination de la meilleure interprétation pour les patches. Enfin, l'image 3 montre les étiquettes des patches affichées en regard de ces derniers et avec la même couleur. Elle montre aussi les segments de sillons qui ont été identifiés. Ceux qui appartiennent à la même classe sont affichés avec la même couleur.	154
5.11	Etiquettes des patches et des segments de sillons inférées par le système et représentées en RDF.	155
5.12	Implémentation du système d'annotation sous forme de services Web. . . .	155
5.13	(1) Construction 3D des patches délimités en surface, (2) volumes correspondant à la matière grise (en rouge) et blanche (en jaune) d'un patch 3D reconstruit.	160
5.14	Représentation en RDF(S) d'une partie de l'ontologie d'annotation de régions d'intérêt en neuroimagerie de Temal et al. [203].	161
5.15	Exemple d'un fichier RDF contenant les annotations, produites par le système pour une région d'intérêt sélectionnée sur une image d'un cerveau sain, et représentées selon l'ontologie de Temal et al. [203]. (1) représentation des différentes ROIAnnotations, (2) la collection de toutes les ROIAnnotations, (3) référencement des patches annotés, (4) autres métadonnées.	162
5.16	Exemple de fibres connectant des régions dans le cerveau. (1) Patches 3D identifiés par le système, (2) fibres connectant les régions délimitées par les patches entr'elles et avec d'autres régions du cerveau.	165
6.1	Situation de choix entre deux segments candidats.	9
6.2	Le plan de projection de segments.	10
6.3	Diagramme de séquence (partie 1/3).	12
6.4	Diagramme de séquence (partie 2/3).	13
6.5	Diagramme de séquence (partie 3/3).	14

Remerciements

Cette thèse a été réalisée à l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (INRIA de Rennes) et la faculté de médecine de Rennes, au sein de l'équipe VisAGeS (Vision, Action et Gestion d'Information en Santé).

Me voilà donc en train de me rappeler des nombreuses personnes que je tiens à remercier pour une raison ou une autre, et grâce à qui cette thèse a été une réussite et restera un beau souvenir pour moi. Certes, la thèse m'a permis d'apprendre plusieurs choses en Ingénierie des connaissances, en Intelligence Artificielle, en imagerie médicale et sur le cerveau. Elle m'a permis aussi de rencontrer et connaître des personnes avec qui j'ai passé des moments que je garderai sûrement très longtemps.

D'abord je remercie mes directeurs de thèse M. Bernard Gibaud et Mme. Christine Golbreich de m'avoir fait confiance et pour les conseils qu'ils m'ont donnés tout au long de la thèse. Je remercie particulièrement Bernard pour sa patience, ses discussions très enrichissantes sur la neuromagerie et les ontologies lorsqu'on mangeait les midis au RU, ses conseils et ses corrections au moment de la rédaction, et surtout sa très bonne gestion des moments difficiles de la thèse. Je dois dire que sa sagesse, ses qualités humaines très appréciables et ses qualités scientifiques exceptionnelles ont joué un grand rôle dans l'aboutissement de la thèse.

Je remercie mes deux rapporteurs M. Djamel Abdelkader Zighed et Mme. Isabelle Bloch d'avoir accepté de juger mon travail et de leurs rapports très intéressants. Je remercie Mme Marie-Odile Cordier d'avoir accepté d'examiner mon travail, mais aussi d'avoir été mon tuteur pendant la thèse. Je remercie également M. Xavier Morandi d'avoir accepté d'examiner mon travail, et de m'avoir soutenu et aidé dans la phase de validation du système développé au cours de la thèse.

Bien entendu, je n'oublie pas de remercier les membres de l'équipe VisAGeS, particulièrement ceux qui venaient à la fac. Je garde un bon souvenir de chacun d'entre eux. Je remercie d'abord notre responsable d'équipe, M. Christian Barillot, de m'avoir accueilli au sein de VisAGeS pour réaliser ma thèse, et de bénéficier ainsi d'un environnement de travail exceptionnel qu'offre l'IRISA. Je remercie mes deux collègues de bureau Lynda Temal et Eric Poiseau d'avoir été toujours gentils, toujours agréables, et aussi d'avoir supporté mes bavarderies aux moments creux de la thèse. Je tiens à remercier l'ingénieur de l'équipe Alexandre Abadie, qui était toujours disponible lorsque je faisais appel à ses compétences, merci encore Alex. Je remercie Pierre Jannin pour ses conseils et ses discussions constructives pendant les pauses café et les déjeuners. Je remercie notre assistante de projet Céline Ammoniaux qui faisait un travail très remarquable, qui était toujours disponible, et qui répondait à toutes mes questions très rapidement et très gentiment. Je remercie aussi tous les autres membres de l'équipe qui étaient tous super gentils : Brivael, Florent, Daniel, Vincent, les deux Adrien, Joela, Tasnime, Souheil, Abdallah, Omar, Bacem, Perrine, Franck, Farooq, Romain, Camille, Pierrick, Jeremy, Benoît, Meena, Aurélie, Mickael, Sylvain, Caroline, Clément, Alain, Aline, Aurore, sans oublier Simon Duchesne qui était

un très bon animateur au sein de l'équipe. Me pardonneront ceux que j'ai oubliés de citer.

Cette thèse m'a permis également de connaître des personnes que j'ai beaucoup appréciées en dehors de l'équipe. Je pense aux filles du CRITT santé Bretagne qui nous partageaient parfois les pauses café et qui les rendaient encore plus agréables. Je remercie Olivier Dameron, maître de conférence au laboratoire d'informatique médicale à l'université de Rennes 1, d'avoir toujours répondu à mes mails lorsque je lui demandais des conseils ou des détails sur le logiciel protégé. Je remercie aussi M. Jean-Marc Laferté, M. Jihed Flifla et M. Moïse Djoko Kouam, du département informatique de l'école d'ingénieurs Louis de Broglie, de m'avoir permis d'effectuer des enseignements au sein de leur école, de m'avoir facilité cette tâche et de l'avoir rendu plutôt très agréable. Cette expérience d'enseignement était très enrichissante pour moi.

Enfin je remercie les personnes les plus proches de moi, dont le soutien m'a été d'une grande aide. Je remercie mes deux frères, ma soeur, et surtout mes parents en Algérie de m'avoir aidé, chacun à sa manière, à résister à la vie parfois difficile à l'étranger. Toi Safa, je ne saurai peut être jamais comment te remercier, tu es la personne que j'ai envie de remercier le plus. Merci pour ton soutien et tes encouragements, merci pour toutes les discussions très passionnantes sur l'Intelligence Artificielle et la logique du premier ordre, j'ai beaucoup appris de toi. Merci de ta patience, merci pour tout et pour le reste. A toutes ces dernières personnes qui me sont très chères, je dédie cette thèse.

Introduction générale

Le réseau Internet constitue l'une des inventions les plus importantes du siècle dernier. Il a changé le comportement des personnes et a facilité la communication et l'échange de données à travers le monde. Le Web est en effet une source phénoménale d'information, constituée de documents (notamment multimédia) qui sont reliés entre eux par des liens hypertextes. Ce changement n'a pas épargné la communauté scientifique, notamment la communauté de la recherche biomédicale, où de nouveaux besoins sont apparus avec l'avènement d'Internet, relatifs au partage de données expérimentales et des connaissances biomédicales à une grande échelle.

Dans le cadre de la recherche biomédicale, le cerveau constitue l'organe le plus complexe du corps humain, et fait l'objet de nombreuses études. Un certain nombre d'avancées ont déjà été réalisées par la communauté scientifique, cependant beaucoup reste à faire pour la compréhension du développement, de l'organisation et du fonctionnement du cerveau. Les recherches sont intenses aussi bien sur le plan cognitif que clinique. Les chercheurs travaillent pour d'une part comprendre le fonctionnement du cerveau normal et d'autre part pour étudier les différentes pathologies et maladies neurodégénératives en vue d'améliorer leur diagnostic et leur prise en charge. Parmi les pathologies qui affectent le cerveau, celles qui sont liées au vieillissement, telles que la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson, constituent aujourd'hui un enjeu de santé publique important, compte tenu de l'augmentation de la durée de la vie. Les pathologies cérébrales peuvent prendre des formes très variées et affecter le sujet jeune, ou le cerveau en développement (exemples : dyslexie, dysphasie, etc.). De ce fait, la recherche sur le cerveau réunit des milliers de chercheurs de par le monde. Par ailleurs, ce type de recherche demande d'étudier les mêmes phénomènes chez de grandes populations de patients. Ceci suppose aussi des études in-vivo, c'est-à-dire réalisées sur des sujets vivants. C'est là que l'imagerie médicale, notamment l'imagerie par résonance magnétique (IRM), a joué un rôle prépondérant. En effet, l'imagerie médicale est le procédé par lequel un médecin peut examiner l'intérieur du corps d'un patient, notamment le cerveau, de façon totalement non invasive. L'imagerie médicale peut être utilisée à des fins cliniques pour l'établissement d'un diagnostic ou pour le guidage et le suivi du traitement de pathologies mais également dans le cadre de travaux de recherche scientifique étudiant la physiologie des êtres vivants. De ce fait, ces dernières années un nombre considérable de données images est produit, dont la gestion devient de plus en plus difficile. Par ailleurs, il y a un vrai besoin de partager ces données, traitées ou pas, entre les chercheurs. Ces dernières peuvent servir par exemple dans l'évaluation d'une technique de traitement d'images (par comparaison à une méthode de référence), ou dans l'évaluation de l'efficacité d'une nouvelle méthode, pour le traitement d'une pathologie.

Internet, via les systèmes de gestion des bases de données réparties, constitue un très bon outil ou infrastructure, qui est peut être le seul à permettre un partage facile de données, particulièrement des images, à grande échelle. Ce partage suppose un processus d'intégration de données. Pour ce faire, d'une part le contenu des images doit être décrit dans chaque site sous une forme exploitable par les programmes informatiques, et d'autre

part, afin de faciliter le processus d'intégration, les différents sites, géographiquement distants, doivent décrire les images en utilisant le même vocabulaire, ce qui suppose l'existence d'un tel vocabulaire partagé.

Dans cet ordre d'idées, nous avons abordé dans cette thèse un travail sur le partage de connaissances sur l'anatomie sulco-gyrale et l'utilisation de ces dernières pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau. Le choix de l'anatomie sulco-gyrale est motivé par le fait que cortex cérébral constitue la partie la plus importante du cerveau aussi bien sur le plan structurel que fonctionnel, dans la mesure où elle supporte les fonctions supérieures telles que la cognition, le langage, la mémoire, etc. Le partage de connaissances, qui fait l'objet de la première étude de la thèse, suppose un modèle commun et consensuel sur l'anatomie sulco-gyrale. Pour ce faire, nous avons modélisé les connaissances sulco-gyrales sous forme d'une ontologie, étant donné que les ontologies sont par définition des représentations partagées et qui réunissent un consensus au sein d'une communauté. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur un travail précédent de *Dameron*, l'ontologie de l'anatomie canonique de l'être humain *FMA* (Foundational Model of Anatomy) et l'atlas de Ono pour les sillons, et bien sûr tout au long du processus de modélisation nous avons été assistés par un expert neuroanatomiste. Afin de partager ces connaissances et de les diffuser à grande échelle, nous avons privilégié l'utilisation des technologies du Web Sémantique pour la représentation de notre ontologie, notamment le langage OWL recommandé par le W3C. Afin de permettre l'utilisation de notre ontologie dans des processus de raisonnement, nous l'avons représentée d'une manière formelle en utilisant la variante OWL DL basée sur les logiques de description. Certaines connaissances, cependant, ne pouvaient pas être représentées en logiques de description, nous les avons alors représentées sous forme de règles, représentées en langage SWRL, recommandé également par le W3C, pour pouvoir les partager également. Le deuxième sujet d'étude de la thèse concerne l'annotation sémantique des régions d'intérêt dans des images IRM du cerveau, basée sur l'ontologie sulco-gyrale. En effet, l'ontologie sulco-gyrale offre, d'une part, le vocabulaire nécessaire pour la description des images anatomiques du cerveau, et d'autre part elle offre une connaissance formelle sur les relations méréologiques et topologiques entre les différentes structures anatomiques sulco-gyrales. Le processus d'annotation implique deux types de connaissances, les premières à caractère numérique, consistent en un atlas des gyri, et les secondes à caractère symbolique, consistent en l'ontologie sulco-gyrale. Il combine aussi deux types de raisonnements, le premier est un raisonnement par contraintes, utilisé pour identifier les parties de gyri, le second est un raisonnement en logiques de description, utilisé pour identifier les parties de sillons. Les annotations ainsi produites sont susceptibles de plusieurs types d'utilisations. En plus d'être utiles pour l'intégration des données images, elles peuvent servir de repères anatomiques pour un neurochirurgien lorsqu'il prépare une intervention chirurgicale afin de préserver les zones fonctionnelles entourant une tumeur par exemple, et permettre une recherche, par le contenu sémantique, de cas similaires dans une base d'images annotées, afin de tirer profit des expériences précédentes et optimiser

son geste chirurgical.

Le chapitre 1 de la thèse présente les notions de base concernant le Web Sémantique, les ontologies et les logiques de description. Le chapitre 2 résume l'état de l'art sur la modélisation de l'anatomie sulco-gyrale. Le chapitre 3 décrit notre première contribution, sous la forme d'ontologie sulco-gyrale représentée en OWL DL. Le chapitre 4 résume l'état de l'art sur les principales réalisations sur l'annotation sémantique des images du cerveau. Enfin, le chapitre 5 présente la principale contribution de la thèse qui consiste en un système hybride, combinant des connaissances numériques avec des connaissances symboliques, pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau. La discussion générale met en évidence les principales contributions de la thèse et les confronte aux travaux similaires dans notre domaine, elle résume aussi notre point de vue sur la modélisation de connaissances anatomiques du cerveau et l'annotation sémantique des images. Enfin, en conclusion, nous présentons les perspectives, de notre point de vue, ouvertes par ce travail.

Première partie

Représentation et partage de connaissances en neuroanatomie dans le cadre du Web Sémantique

Chapitre 1

Éléments introductifs

La recherche translationnelle a donné naissance à de nouveaux besoins visant le partage, l'exploitation et la réutilisation de connaissances et de données expérimentales dans plusieurs disciplines et à plusieurs échelles [177]. La recherche biomédicale est un domaine où le besoin de ce partage est ressenti de façon aiguë, étant donné sa pluridisciplinarité et les différences de profils qu'on peut trouver dans un tel domaine. Par ailleurs, les collaborations entre les personnes de ce domaine, ayant différentes compétences, sont toujours indispensables. Par exemple, le développement d'applications en neuroimagerie s'appuyant sur des connaissances anatomiques du cerveau suppose une collaboration entre des ingénieurs et des experts en anatomie du cerveau. En effet, la recherche sur le cerveau, compte tenu de la complexité intrinsèque de cet organe et la diversité de ses pathologies, est justement un exemple typique d'un domaine pluridisciplinaire dont les progrès nécessitent plusieurs compétences et un effort commun des différents profils : cliniciens, physiciens, statisticiens et informaticiens pour ne citer que ceux là. Le fait d'explicitier sous forme de modèles (par exemple en utilisant les ontologies) les connaissances d'un domaine, tel que l'anatomie, ne peut que faciliter cette collaboration. Par ailleurs, l'utilisation des nouvelles technologies du Web Sémantique peut faciliter considérablement le partage des connaissances et des données biomédicales. Par exemple, le projet SWAN¹ (Semantic Web Applications in Neuromedicine), qui a pour objectif la facilitation, la formation et le test d'hypothèses sur la maladie Alzheimer et d'autres troubles neurodégénératifs, s'appuie sur les technologies du Web Sémantique. Ce projet implique une équipe du Forum de Recherche sur l'Alzheimer (<http://www.alzforum.org/>) et des informaticiens de l'Institut des maladies neurodégénératives de l'hôpital du Massachusetts (www.mghmind.org), ce qui illustre encore mieux la nécessité de collaboration dans le domaine du cerveau.

Notre objectif est justement de privilégier l'utilisation des ontologies et des technologies du Web Sémantique pour modéliser et représenter les connaissances anatomiques sur le cerveau afin de faciliter leur diffusion à grande échelle, et décrire le contenu sémantique des images du cerveau afin de faciliter leur partage et leur intégration. La section 1.1 introduit le Web Sémantique, ses objectifs et ses principes ; la section 1.2 définit les ontologies, les bonnes pratiques pour leur construction et leur rôle dans le partage de connaissances, notamment dans le domaine biomédical ; les sections 1.3 et 1.4 présentent, respectivement, les logiques de description et les règles comme support formel pour la représentation de connaissances et le raisonnement dans le Web Sémantique ; la section 1.5 présente les différents outils et langages développés dans le cadre du Web Sémantique ; enfin, la section 1.6 montre l'importance du Web Sémantique pour la communauté biomédicale.

¹<http://swan.mindinformatics.org/>

1.1 Web Sémantique

Le Web Sémantique, créé par Tim Berners-Lee en 1994, est l’extension du Web actuel qui permet la navigation et l’utilisation significative de ressources numériques par des processus ou agents automatiques [6, 18]. Le Web Sémantique est basé sur des formats communs qui supportent l’aggrégation et l’intégration de données tirées de diverses sources. Il désigne² un ensemble de technologies visant à rendre le contenu des ressources du World Wide Web (WWW) accessible et utilisable par les programmes et agents logiciels, grâce à un système de métadonnées formelles, utilisant notamment la famille de langages développés par le W3C³.

De ce fait, une utilisation judicieuse des technologies du Web Sémantique peut faciliter le transfert de l’innovation des laboratoires de recherche aux cliniques et aux hôpitaux. Les technologies du Web Sémantique constituent un pas en avant dans la facilitation de la communication entre la recherche et la pratique clinique (”recherche translationnelle”), et entre les domaines biomédicaux. Par exemple, les langages du Web Sémantique offrent un moyen pour simplifier la gestion et la compréhension d’un ensemble de relations complexes et évoluant rapidement, dont on a besoin pour enregistrer les données et les connaissances biomédicales [177]. Par ailleurs, l’intérêt qu’a suscité le Web Sémantique dans la communauté informatique et l’investissement des chercheurs en Intelligence Artificielle dans cette thématique a donné naissance à des langages formels et à des outils de raisonnement et d’inférence puissants, susceptibles d’être utilisés dans des applications pertinentes en santé et bien d’autres domaines.

Cette prise de conscience de l’importance du Web Sémantique dans le domaine biomédical a conduit beaucoup d’industriels et laboratoires de recherche à s’investir afin d’une part de tirer profit de cette nouvelle technologie, et d’autre part de faire remonter les besoins de la communauté de la recherche biomédicale pour que ces technologies prennent en compte leurs besoins spécifiques. Un groupe de travail a même été créé, le “Semantic Web Health Care and Life Sciences (HCLS) Interest Group”⁴. Sa mission est de développer, défendre et encourager l’utilisation des technologies du Web Sémantique pour la science biologique, la médecine translationnelle et la santé.

Nous avons justement utilisé les technologies du Web Sémantique, notamment les langages de représentation des ontologies, pour représenter les connaissances anatomiques relatives au cortex cérébral, afin de bénéficier, entre autres, des mécanismes de raisonnement et d’inférence, développés pour supporter ces langages. Nous avons également utilisé les technologies du Web Sémantique pour décrire le contenu des images du cerveau, afin de faciliter leur intégration et leur gestion.

²http://fr.wikipedia.org/wiki/Web_s%C3%A9mantique

³http://fr.wikipedia.org/wiki/World_Wide_Web_Consortium

⁴<http://www.w3.org/2001/sw/hcls/>

1.1.1 Philosophie générale

L'idée fondamentale sous-jacente au Web Sémantique est d'étendre le Web actuel de telle sorte que les contenus puissent être appréhendés et exploités par des machines. Ainsi, ce nouveau Web fournira aux utilisateurs des services plus puissants, par exemple permettre de trouver l'information la plus pertinente. Le Web Sémantique complète le contenu informel du Web actuel avec une connaissance formalisée.

Le Web actuel est victime de son propre succès. Il devient de plus en plus difficile de gérer les volumes de données, notamment des images, sans cesse croissants, sans qu'ils soient associés à une sémantique bien définie, qui permet de les utiliser pour effectuer d'autres tâches, plus complexes qu'une recherche d'information par mots clés [154]. L'utilisation des ontologies dans le cadre du Web Sémantique a justement comme objectif de donner à l'information du sens, afin que le Web actuel soit organisé d'une manière logique et cohérente.

Dans le Web Sémantique des métadonnées sont associées aux sources de données afin de décrire leur contenu. Les entités correspondant aux données elles mêmes sont identifiées à l'aide d'URI (Uniform Resource Identifier, "Identifiant Uniforme de Ressource"). L'annotation sémantique des images du cerveau, que nous abordons dans cette thèse, s'inscrit aussi dans ce cadre. En effet, les annotations sémantiques sont des métadonnées qui décrivent le contenu des images, et leur représentation en utilisant les langages du Web Sémantique et un vocabulaire partagé offert par une ontologie facilitera leur partage et leur exploitation.

Les objectifs du Web Sémantique

Les données disponibles sur le Web sont représentées sous plusieurs formes : données structurées (bases de données relationnelles), semi-structurées (documents XML), ou même sans aucune structuration telles que les fichiers plats. L'objectif est d'avoir une représentation de ces données dans un formalisme permettant non seulement la présentation et l'accès à ces dernières, mais aussi permettant des traitements automatisés et des mécanismes d'inférence et de raisonnement. Un autre objectif est l'intégration de données hétérogènes, issues de sources multiples, afin de les rendre exploitables dans différents contextes et dans différentes applications. Cet objectif ⁵ doit aujourd'hui être réalisé dans un contexte d'informatique distribuée marqué par la généralisation de la diversité des modes d'accès à l'information et par la recherche générale d'interopérabilité. Ce contexte suscite la création de standards et, combiné au nouveau contexte du Web Sémantique, soulève des problèmes nouveaux dont les solutions passent par l'adaptation et l'amélioration de technologies déjà connues.

⁵<http://www.lalic.paris4.sorbonne.fr/stic/presentation5.html>

Afin d'atteindre ces différents objectifs, un effort considérable de la communauté du Web Sémantique a été consacré à la définition de langages standards et formels pour la représentation de connaissances et au développement de nouvelles techniques de raisonnement et d'inférence. Ainsi, on dispose aujourd'hui de langages qui commencent à faire l'unanimité et qui sont largement utilisés, tels que RDF(S) et OWL pour la représentation des ontologies et l'annotation de ressources, et SWRL pour la représentation des règles. De nombreux outils de représentation de connaissances et de raisonnement ont également été développés dans le cadre du Web Sémantique. Nous présentons certains d'entr'eux dans la section 1.5.

Principes du Web Sémantique

Les principes fondateurs du Web Sémantique sont les suivants ⁶ :

Tout doit être identifié par un URI Les objets du monde réel, dans le Web Sémantique, doivent être identifiés par des URIs. Un URI identifie une ressource Web sans pour autant en donner la localisation. Par exemple, l'intégration et l'accès aux données et aux ontologies biomédicales publiques, par le biais du Web Sémantique, passe par l'affectation d'URI aux entités biologiques et médicales.

Les ressources et les liens peuvent avoir un type Le Web actuel consiste en des ressources et des liens (figure 1.1⁷). Les ressources sont généralement des données qui ne contiennent pas de métadonnées expliquant dans quoi elles sont utilisées ou quelles sont leurs relations avec les autres données du Web. Ce sont des documents dont la sémantique peut être comprise par des humains, mais pas par des machines.

Comme on peut le constater sur la figure 1.1, le Web Sémantique consiste aussi en des ressources et des liens dont les types explicitent des concepts représentés sous une forme compréhensible⁸ pour les machines. Par exemple, sur la figure 1.1, le lien **creator** relie deux ressources, **Document** et **Person**, et exprime qu'un document est créé par une personne. C'est particulièrement utile en imagerie cérébrale pour spécifier le type de logiciels utilisé dans les différents traitements appliqués aux images, le contexte de leur acquisition, ou encore le niveau d'expertise de l'utilisateur qui interprète, par exemple, ces images.

Des informations partielles sont tolérées Le Web actuel est illimité. Les auteurs peuvent facilement référencer des ressources sans se soucier des liens référençant leurs

⁶<http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw>

⁷<http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw>

⁸Il s'agit ici d'un abus de langage, l'allusion est faite à une représentation qui permet des traitements automatisés.

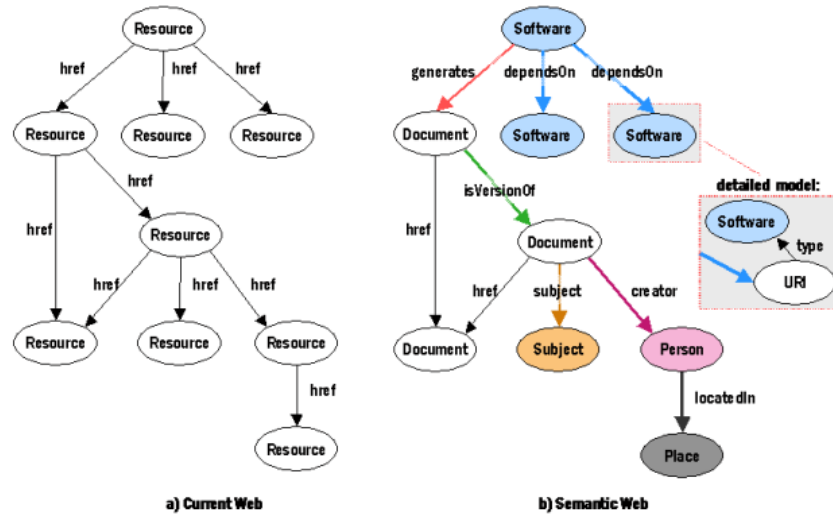


FIG. 1.1: Les ressources et les liens peuvent avoir des types en Web Sémantique : <http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw>.

ressources. N'ayant pas de moyen pour informer les référenceurs d'une ressource de son changement d'adresse, on accepte le fait de pouvoir être orienté vers le lien 404 (figure 1.2) nous informant que la ressource demandée (référéncée par le lien) n'est plus disponible. Dans le cas de l'imagerie, on peut être amené à remplacer d'anciennes images par des nouvelles de meilleure qualité et d'une résolution plus haute. De la même manière, le Web Sémantique est illimité, n'importe quel utilisateur peut créer une ressource et créer différents types de liens entre les ressources. Les outils du Web Sémantique doivent tolérer cela et doivent pouvoir fonctionner en dépit de cela.

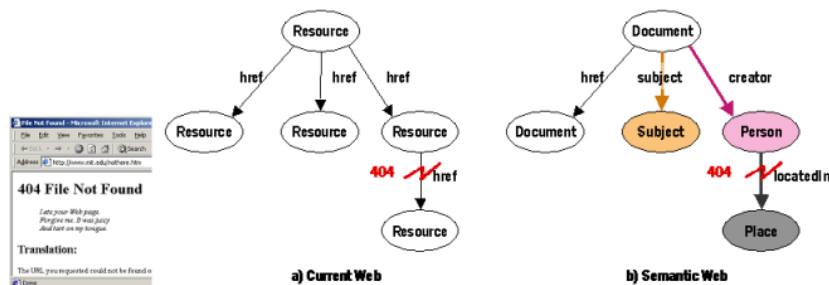


FIG. 1.2: Aussi bien le Web que le Web Sémantique tolèrent l'information partielle : <http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw>.

Il n'y a pas de besoin d'une vérité générale Tout ce qui est sur le Web n'est pas nécessairement vrai, et le Web Sémantique n'a pas changé cela. La vérité ou la fiabilité est évaluée par chaque application manipulant l'information sur le Web, grâce à des mécanismes de raisonnement et d'inférence. Les applications décident de ce qui est vrai en utilisant le contexte dans lequel elles s'exécutent.

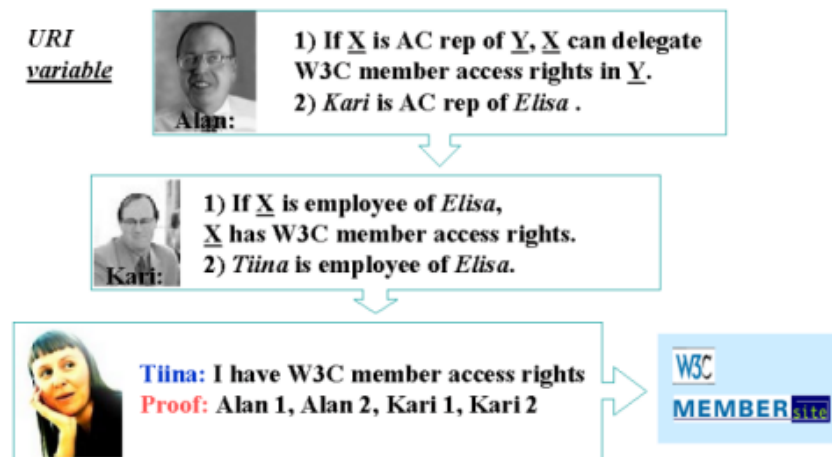


FIG. 1.3: La définition des droits d'accès définie par un enchaînement de la confiance.
<http://www.w3.org/2001/12/semweb-fin/w3csw>.

Considérons l'exemple sur la figure 1.3. Tiina est une employée de la société Elisa, elle veut visiter la page des membres du W3C. Pour ce faire, elle doit prouver qu'elle a le droit d'accéder à cette page. Son propos "j'ai les droits d'accès à la page des membres du W3C" n'est pas considéré comme vrai ou fiable s'il n'est pas prouvé. Tiina fait cela en se référant aux quatre déclarations faites par Kari et Alan, qui sont habilités à donner de telles déclarations, en raison de leur rôle en tant que représentant du comité consultatif d'Elisa et président adjoint du W3C, respectivement. L'application du W3C acceptant la preuve sait qu'elle peut croire les déclarations d'Alan et donc aussi celles de Kari, étant donné qu'Alan a délégué à Kari la responsabilité de définir la liste des employés d'Elisa avec les droits d'accès.

L'évolution est supportée Il est courant que des concepts similaires soient créés par différents groupes de personnes dans différents endroits, ou même par le même groupe à des moments différents. Le Web Sémantique utilise des conventions qui peuvent être étendues au fur et à mesure où la compréhension humaine s'élargit. En outre, ces conventions permettent une combinaison efficace d'un travail indépendant de plusieurs communautés, même lorsqu'elles utilisent des vocabulaires différents. Le Web Sémantique offre des outils

qui peuvent être utilisés pour résoudre les ambiguïtés et clarifier les incohérences. De plus, de nouvelles informations peuvent être rajoutées sans pour autant que les anciennes soient modifiées.

Architecture minimaliste Le Web Sémantique rend simple les choses simples, et possible les choses complexes. L'objectif du W3C est de normaliser, mais pas plus qu'il n'est nécessaire. Cette approche permet la mise en oeuvre des applications simples qui sont maintenant basées sur des technologies déjà normalisées, par exemple, le Dublin Core⁹ : un schéma de métadonnées générique qui permet de décrire des ressources numériques ou physiques et d'établir des relations avec d'autres ressources, RSS¹⁰ qui désigne une famille de formats XML utilisés pour la syndication de contenu Web afin de pouvoir accéder à une partie d'un site depuis d'autres sites, et enfin MusicBrainz¹¹ : une base de données musicale en contenu ouvert.

1.1.2 Web Sémantique - état de l'art

La vision du Web Sémantique est de rendre les ressources Web plus compréhensibles pour les machines, de sorte à ne pas avoir uniquement des pages HTML sur le Web liées par des liens hypertextes, mais une grande quantité de données, de nature hétérogène, et de services accessibles sur le Web aussi bien pour les être humains que pour les machines. Pour ce faire, les annotations sont introduites pour décrire le contenu et les fonctions des ressources du Web. Ces annotations sont décrites de telle sorte qu'elles soient consensuelles et interprétables par les machines. Afin d'atteindre cet objectif la communauté du Web Sémantique a commencé par développer des langages basés sur des logiques formelles, et recommandés par le W3C, tels que RDF(S) (Resource Description Framework)¹², qui a une syntaxe basée sur le langage XML, permettant de créer, d'échanger et d'utiliser les annotations. Apparaissent ensuite les ontologies comme une solution pour la spécification, la représentation, le partage et la description des ressources du Web. Les ontologies ont apporté la notion de partage de connaissances, notamment le partage d'un même vocabulaire dans un domaine particulier, permettant ainsi une meilleure communication entre les personnes et entre des systèmes et des applications distribuées. Les ontologies ont suscité un grand intérêt au sein de la communauté du Web Sémantique, et ceci a donné naissance à un langage standard pour leur représentation, OWL en l'occurrence. Ce langage apporte plusieurs améliorations au langage RDF, notamment en terme d'expressivité et de puissance de raisonnement offerte. Les informaticiens constituent une partie de la communauté du Web Sémantique, leur rôle est de développer et augmenter le niveau d'expressivité des

⁹<http://www.dublincore.org/documents/dces/>

¹⁰<http://tech.groups.yahoo.com/group/rss-dev/files/specification.html>

¹¹<http://musicbrainz.org/MM/>

¹²<http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

langages de représentation tels que OWL, améliorer les capacités de raisonnement et d'inférence sur les ontologies, et développer des outils facilitant l'édition et l'utilisation des ontologies.

Deux paradigmes de modélisation différents ont été initialement proposés pour le Web Sémantique [154]. Le premier paradigme est basé sur des notions des logiques standards, telles que la logique propositionnelle, la logique du premier ordre et les logiques de description [74]. Ce paradigme est utilisé dans les langages du Web Sémantique recommandés par le W3C, notamment RDF, RDFS et OWL. L'autre paradigme est basé sur des notions des bases de données orientées-objets [4] et des langages de règles [209]. Ce deuxième paradigme est utilisé dans une version précédente de RDF¹³ et plusieurs autres propositions de langages pour le Web Sémantique, tels que OWL Flight¹⁴. Les deux paradigmes offrent des définitions formelles. En revanche ils diffèrent sur plusieurs aspects, notamment sur leur puissance d'expressivité et la nature de modélisation qu'ils permettent. Une bonne comparaison entre ces deux paradigmes est faite dans [154]. Les auteurs ont conclu que le premier paradigme est plus approprié pour le Web Sémantique. Ils argumentent cela par le fait que dans le premier paradigme une information non renseignée reste ouverte (c'est-à-dire reste inconnue), en revanche dans le second une information non renseignée est supposée être fausse, ce qui, selon eux, n'est pas compatible avec le Web Sémantique, qui est de nature ouverte et distribuée. De plus, en bases de données deux identifiants différents référencent deux individus distincts (hypothèse du nom unique), ce qui n'est pas compatible avec le Web Sémantique non plus. En effet, dans le Web Sémantique il existe des sources variées d'information, parfois dans un même domaine, et dans chaque source on est libre d'affecter ses propres identifiants (URI). On peut alors trouver deux identifiants différents qui désignent la même entité. Les auteurs admettent néanmoins que le premier paradigme, la représentation en OWL par exemple, a quelques limites par rapport à la modélisation de bases de données (deuxième paradigme), notamment en terme de complexité. Cependant, ils restent optimistes et croient que la plupart de ces limites peuvent être surmontées grâce par exemple à de bons outils de construction d'ontologies, qui peuvent être utilisés pour générer des informations supplémentaires permettant des mécanismes de raisonnement sophistiqués. On constate aujourd'hui qu'effectivement, on s'oriente plutôt vers un Web Sémantique où l'utilisation des ontologies formelles, basées sur les logiques de description, est de plus en plus croissante. En effet, d'une part les ontologies permettent une description rigoureuse d'un domaine particulier, et d'autre part l'utilisation des langages formels pour leur représentation, basés sur les logiques de description par exemple, permet de détecter et d'analyser les incohérences dans ces ontologies et facilite leur utilisation dans des processus de raisonnement. Par ailleurs, un engouement particulier pour les logiques de description comme modèle sous-jacent pour la représentation des ontologies s'explique par la possibilité offerte de disposer d'outils de raisonnement

¹³<http://www.w3.org/TR/1999/REC-rdf-syntax-19990222/>

¹⁴<http://www.wsmo.org/2004/d20/d20.3/v0.1/20040823/>

sur les informations modélisées [52].

La communauté du Web Sémantique, cependant, n'est pas constituée uniquement de théoriciens informaticiens. Les utilisateurs des langages et des outils de représentation de connaissances et de raisonnement contribuent également à la construction du Web Sémantique en mettant à disposition leurs données et leurs connaissances, et en les rendant facilement accessibles pour les autres communautés. Ce sont les utilisateurs aussi qui guident les théoriciens dans les choix à faire en terme d'expressivité des langages et des systèmes de raisonnement à concevoir.

La section 1.2 définit justement les ontologies et résume les données de la littérature concernant les ontologies; la section 1.3 détaille les logiques de description qui sont le formalisme logique principal qui sert de support pour la représentation des ontologies; enfin la section 1.5 présente les différentes réalisations en terme d'outils et de langages dédiés au Web Sémantique.

1.2 Ontologies

1.2.1 Définitions

Ontologie est un terme qui vient de la philosophie. En philosophie, l'ontologie est l'étude de l'être en tant qu'être, c'est-à-dire l'étude des propriétés générales de ce qui existe. En informatique et en sciences de l'information, le mot *ontologie* désigne l'ensemble structuré des termes et concepts représentant le sens d'un champ d'informations ¹⁵. C'est une représentation d'une conceptualisation partagée d'un domaine spécifique [85, 89]. L'ontologie est employée pour raisonner à propos des objets du domaine concerné. Les concepts sont organisés dans un graphe dont les relations peuvent être des relations sémantiques ou des relations d'inclusion (ou subsumption). L'objectif premier d'une ontologie est de modéliser un ensemble de connaissances dans un domaine donné, qui peut être réel ou imaginaire. Les ontologies sont employées en Intelligence Artificielle, dans le Web Sémantique, le génie logiciel, l'informatique biomédicale, etc.; comme une forme de représentation de la connaissance au sujet d'un monde ou d'une certaine partie de ce monde. Elles décrivent généralement :

- Les individus : les objets de base,
- Les classes : ensembles, collections, ou types d'objets,
- Les attributs : propriétés, fonctionnalités, caractéristiques ou paramètres que les objets peuvent posséder et partager,
- Les relations : les liens que les objets peuvent avoir entre eux.

¹⁵wikipedia

Les ontologies ont connu un grand succès au sein de la communauté scientifique, particulièrement au sein de la communauté informatique et biomédicale. Ceci est dû d'une part à leur capacité à représenter les connaissances selon des règles standards, et d'autre part au rôle primordial qu'elles jouent dans la construction du Web Sémantique [202]. De nos jours, on assiste à une large utilisation des ontologies dans de nombreux domaines, et particulièrement dans la communauté des systèmes d'information. Elles sont davantage considérées comme un paradigme clé dans l'interopérabilité sémantique, l'intégration de données et le partage de connaissances entre des êtres humains, mais surtout entre les machines. Les ontologies permettent alors de :

- Résoudre les conflits sémantiques : en explicitant le sens des concepts et des relations de l'ontologie ;
- Partager des données hétérogènes : en intégrant les ressources dans un langage commun compréhensible pour les êtres humains comme pour les machines ;
- Représenter les connaissances d'un domaine de manière explicite et sans ambiguïté : en utilisant des langages formels ou semi-formels ;
- Servir de support au raisonnement et aux inférences : ce point est très important, en effet on peut vérifier la cohérence des ontologies représentées avec des langages formels, et inférer de nouvelles hiérarchies pour les concepts et de nouvelles connaissances.

Cependant, une ontologie doit répondre à un certain nombre de critères, entre autres elle doit être :

- **Correcte** : d'après [150] il n'y a pas qu'une seule ontologie correcte de référence pour un domaine précis. La conception des ontologies est un processus créatif et il ne peut pas y avoir d'ontologies identiques faites par des personnes différentes. Les applications potentielles d'une ontologie et la compréhension du concepteur, ainsi que le point de vue qu'il a du domaine traité, affecteront sans doute les choix de conception de l'ontologie. "C'est à l'usage que l'on juge la qualité d'une ontologie" [148]. Nous ne pouvons apprécier la qualité d'une ontologie qu'en l'utilisant dans les applications pour lesquelles elle a été conçue. On peut considérer qu'une ontologie est correcte si elle satisfait les besoins de l'application, ou des applications pour lesquelles elle a été conçue. En résumé : 1) il n'y a pas de vérité absolue, le jugement se fait dans le contexte des applications visées et du point de vue du concepteur ; 2) il n'y a pas de validation formelle, mais une validation expérimentale basée sur l'expérience et l'utilisation dans des applications.
- **Documentée** : pour que le sens véhiculé par une ontologie soit facilement compris par les utilisateurs humains, cette dernière doit être documentée en langage naturel le mieux possible, ce qui facilite aussi sa réutilisation. Cela peut être fait, par exemple, en explicitant, sous forme d'annotations insérées dans le code, la sémantique des relations et des concepts d'une ontologie. L'une des barrières du partage effectif

de connaissances est en effet la documentation inadéquate des ontologies existantes [210].

- **Réutilisable** : peut être réutilisée dans une autre ontologie ou par plusieurs applications du même domaine. En effet, une aide à la modélisation consiste à réutiliser des ontologies existantes [14]. De telles ontologies sont accessibles sur le Web. On y trouve des ontologies de domaine conçues dans des domaines variés tels que la médecine, la biologie ou l’automobile, et des ontologies de haut niveau comportant des concepts généraux subsumant les concepts existant dans différents domaines. Les enjeux de la réutilisation des ontologies sont nombreux : permettre d’élaborer des ontologies de plus grande taille et de meilleure qualité, tout en réduisant les coûts de développement, même si la réutilisation a, elle-même, un coût qui consiste à localiser les ontologies candidates à la réutilisation, les comprendre et les évaluer.
- **Rigoureuse** : c’est-à-dire capable de définir un vocabulaire pour décrire un domaine donné et partager la connaissance liée à ce domaine. Mais l’ontologie n’a pas l’ambition d’être une base de connaissances en mesure de fournir systématiquement une réponse à une question arbitraire sur le domaine.
- **Explicite** : l’ensemble des concepts du domaine étudié ; entités, attributs, processus, leurs définitions et leurs interrelations sont spécifiés explicitement dans une ontologie à l’aide d’axiomes. Une ontologie est la spécification formelle et explicite d’une conceptualisation partagée [85, 198]. Par ”spécification explicite”, les auteurs indiquent qu’une ontologie est un ensemble de concepts, de propriétés, d’axiomes, de fonctions et de contraintes explicitement définis.
- **Consensuelle** : La définition des concepts, des relations entre les concepts, ainsi que leur organisation doit être faite de manière consensuelle, au moins dans le domaine étudié. Ce terme rappelle que l’on doit assurer une réutilisation de la formalisation choisie.
- **Extensible** : les extensions doivent être anticipées afin que l’ajout de nouveaux concepts ne puisse remettre en cause les fondations de l’ontologie.
- **Cohérente** : rien de ce qui peut être inféré de l’ontologie ne doit pouvoir entrer en contradiction avec les concepts de l’ontologie. Une ontologie doit être cohérente pour permettre des inférences conformes aux définitions. Les axiomes doivent être cohérents [86].

1.2.2 Classification des ontologies

Il existe trois classifications principales définies pour les ontologies : 1) la classification de Heijst et al. [97], 2) la classification donnée par Guarino [90], et 3) la classification donnée par Oberle¹⁶. Chacune des trois classifications remet en cause les autres. Ci-dessous les principaux critères retenus pour chacune des trois classifications :

¹⁶<http://cos.ontoware.org/>

1. Heijst et al. proposent de classifier les ontologies selon deux dimensions. Selon la première dimension, ils distinguent les ontologies terminologiques, d'information, et de connaissance. Selon la deuxième dimension, ils distinguent les ontologies d'application, de domaine, générique, et de représentation.
2. Guarino conteste cette première classification, particulièrement la première dimension qu'il trouve insuffisamment claire. Il propose alors une nouvelle classification des ontologies basée sur le niveau de dépendance vis-à-vis d'une tâche ou d'un point de vue particulier. Il a défini alors trois classes pour les ontologies : 1) les ontologies de haut niveau décrivant les concepts les plus généraux communs à plusieurs domaines, et indépendants d'un domaine particulier, 2) les ontologies de domaine et de tâches pour, respectivement, décrire les concepts génériques d'un domaine particulier, tel que la médecine, ou une tâche générique d'un domaine, telle que la diagnostic. Dans les ontologies de domaine, on peut très bien se servir des concepts des ontologies de haut niveau en les spécialisant. 3) Enfin les ontologies d'application décrivent les concepts dépendant à la fois d'un domaine et d'une tâche particuliers.
3. Oberle, quant à lui, classe les ontologies selon les buts pour lesquels elles sont conçues, leur niveau d'expressivité et leur spécificité. Dans sa classification selon le but, il distingue : 1) les ontologies d'application, utilisées lors d'un raisonnement basé sur une ontologie, 2) les ontologies de référence, utilisées pour faciliter la communication entre des agents de différentes communautés, ou établir un consensus dans une communauté qui a besoin d'adopter de nouveaux termes, ou qui a besoin d'expliquer le sens des termes aux nouveaux arrivants dans la communauté [202]. Smith [191] définit les ontologies de référence comme des ontologies conçues pour décrire un domaine correctement. Dans la classification selon l'expressivité, Oberle distingue : 1) les ontologies lourdes (heavyweight) qui sont très axiomatisées et utilisées généralement dans des domaines qui doivent assurer un raisonnement complexe, 2) les ontologies légères (lightweight) se limitant à des structures taxonomiques simples, peu ou pas axiomatisées et utilisées lorsque la signification des termes utilisés par une communauté donnée est plus ou moins connue à l'avance. Et enfin dans sa classification selon la spécificité, il distingue trois types d'ontologies : 1) les ontologies génériques ou de haut niveau, qui définissent les concepts les plus généraux de tous les champs d'application, 2) les ontologies noyau (core ontology), qui définissent les concepts génériques d'un ensemble de domaines, 3) et les ontologies de domaine, elles définissent les concepts d'un domaine particulier.

On constate une certaine ressemblance entre les ontologies de haut niveau définies par Guarino et les ontologies génériques d'Oberle. De même pour leurs ontologies de domaine et de tâches, et les ontologies noyau. Par contre les ontologies d'application définies par Guarino sont plus proches des ontologies de domaine d'Oberle.

1.2.3 Les bonnes pratiques pour la construction d'ontologies

Pour construire une ontologie, il faut respecter un certain nombre de principes et de règles. Certes, il n'y a pas une méthodologie consensuelle de construction d'ontologies, néanmoins plusieurs ont été proposées par différents auteurs. Dans [50, 72] les auteurs comparent plusieurs de ces méthodologies de construction d'ontologies. Ils en tirent que les méthodologies sont différentes, et sont fortement liées aux applications. Les méthodologies sont nombreuses et cette multiplicité reflète à la fois la difficulté de construire des ontologies et la difficulté de s'entendre sur la nature et le contenu de ces dernières [13]. Certaines méthodes se focalisent uniquement sur une seule étape de construction, c'est le cas par exemple dans [12], qui se focalise sur l'étape de conceptualisation par l'analyse d'un corpus textuel. La méthodologie choisie pour construire une ontologie doit être fortement guidée par le type d'ontologie désiré et les objectifs de son utilisation [202]. D'une manière générale il existe deux façons d'aborder la construction d'ontologies : la première consiste à construire les ontologies de manière automatique ou semi-automatique [30]. Le plus souvent, les techniques automatique ou semi-automatique de construction d'ontologies produisent des ontologies légères, dédiées à des applications précises, ne sont pas réutilisables, et surtout ne représentent aucun engagement ontologique ou philosophique. L'autre façon de faire est de construire l'ontologie manuellement, en se basant sur les théories d'autres disciplines telles que la philosophie, la linguistique ou les mathématiques, et en réutilisant d'autres ontologies existantes. Les ontologies produites par cette deuxième méthode sont richement axiomatisées, rigoureuses et réutilisables [28, 29]. Cependant, le processus de conception est généralement plus long dans le deuxième cas.

Un exemple simple des étapes à suivre pour la construction d'une ontologie est donné dans [213]. Les auteurs proposent les quatre étapes suivantes :

1. L'analyse du domaine et l'acquisition des connaissances du domaine ;
2. La structuration de l'ontologie, l'identification des concepts du domaine, des attributs des concepts, et des valeurs correspondantes ;
3. L'utilisation d'un langage formel pour la représentation de l'ontologie ;
4. Et enfin, l'évaluation de l'ontologie et de ses performances.

Noy et al. [148] proposent, eux, un processus itératif pour la construction d'une ontologie. Ce processus consiste en les sept étapes suivantes :

- *Etape 1* : déterminer le domaine et l'étendue de l'ontologie. Dans cette étape on définit le domaine que l'ontologie va couvrir, à quoi va servir l'ontologie, les types de questions auxquelles l'information de l'ontologie devrait répondre, et qui va utiliser et maintenir l'ontologie.
- *Etape 2* : considérer la réutilisation d'ontologies existantes. La réutilisation d'ontologies existantes peut être nécessaire si l'ontologie que l'on veut développer est

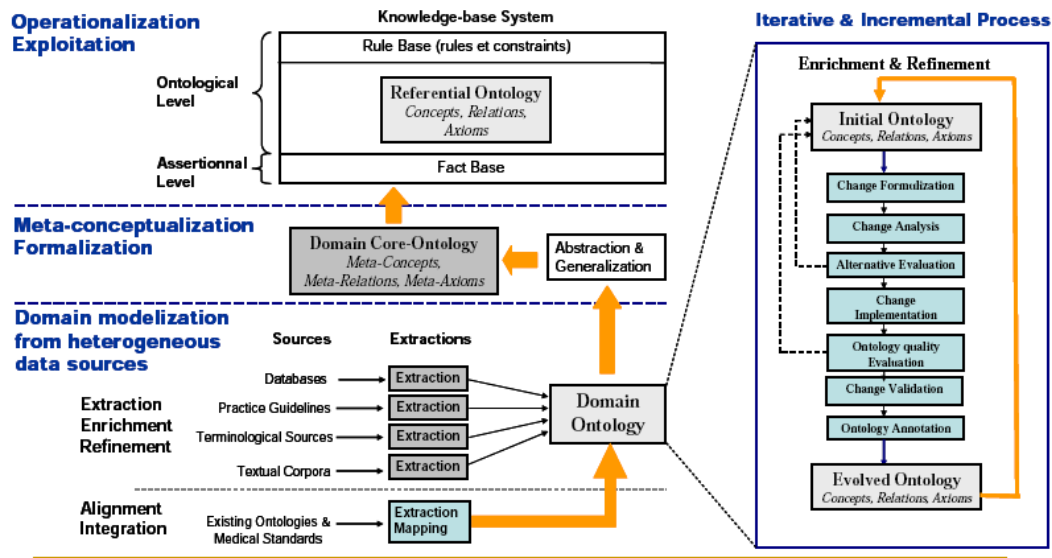


FIG. 1.4: Architecture pour la construction et l'évolution des ontologies : <http://perso.ecp.fr/~aufaurema/EcolIA-Aufaure-22mars08.pdf>.

susceptible d'être utilisée par un système qui a besoin d'interagir avec d'autres applications qui utilisent déjà des ontologies particulières et des vocabulaires contrôlés.

- *Etape 3* : énumérer les termes importants de l'ontologie. Il s'agit des termes dont la sémantique doit être détaillée.
- *Etape 4* : définir les classes et la hiérarchie des classes. Ceci peut être fait en suivant soit une approche descendante, qui consiste à définir d'abord les concepts les plus généraux du domaine, ensuite définir leur spécialisation, soit une approche ascendante qui, elle, consiste à définir d'abord l'ensemble des classes spécifiques qui seront ensuite regroupées pour définir des concepts plus généraux. On peut également combiner ces deux approches.
- *Etape 5* : définir les propriétés des classes (les slots).
- *Etape 6* : définir les facettes des propriétés. Il s'agit par exemple du type des valeurs permises pour une propriété particulière, de la cardinalité de ces valeurs, etc.
- *Etape 7* : créer des instances. C'est la dernière étape, elle consiste à créer des instances des classes pour le peuplement de l'ontologie.

Aufaure¹⁷ propose également une architecture pour la construction et l'évolution des ontologies (figure 1.4). Dans cette architecture, le cycle de vie d'une ontologie consiste en plusieurs étapes : d'abord sa construction à partir de sources humaines, de corpus

¹⁷<http://perso.ecp.fr/~aufaurema/EcolIA-Aufaure-22mars08.pdf>

documentaires textuels ou multimédia, et des bases de données semi-structurées. Ensuite, l'ontologie est validée en vérifiant formellement sa cohérence et en la faisant valider par des experts. Enfin, l'ontologie est validée par les utilisateurs après sa diffusion. L'évolution de l'ontologie est gérée de telle manière que son noyau reste le même.

1.2.4 Les ontologies dans le domaine biomédical

Les ontologies font l'objet d'une recherche active dans le domaine biomédical. Parmi les ontologies et les terminologies les plus connues dans ce domaine, on peut citer :

- Gene Ontology¹⁸ : consiste en un vocabulaire contrôlé pour décrire les gènes et les attributs des produits de gènes dans tout organisme.
- GALEN Common Reference Model : un projet développé au sein de l'Université de Manchester, dans le cadre de plusieurs projets européens successifs. Il vise à fournir des ressources terminologiques réutilisables dans le domaine médical [166].
- Le NCBO (National Center for Biomedical Ontology)¹⁹ : un consortium de biologistes, de cliniciens, d'informaticiens et d'ontologistes, qui développent des technologies innovantes et des méthodes scientifiques qui permettent de créer, de diffuser et de gérer l'information et les connaissances biomédicales, sous une forme traitable par des machines. Le but ultime de cette initiative est que les connaissances et les données biomédicales soient diffusées sur Internet, en utilisant des ontologies, de sorte que les connaissances et les données soient sémantiquement interopérables et utiles, pour faire avancer la science biomédicale et les soins cliniques.
- MGED²⁰ (Microarray Gene Expression Data ontology group) : une organisation internationale de biologistes, informaticiens, et analystes de données, qui vise à faciliter le partage de données générées en utilisant différentes technologies.
- OBO²¹ (Open Biological Ontologies) : OBO n'est pas une ontologie, mais une bibliothèque qui comprend plus de soixante ontologies accessibles via l'interface Web BioPortal. Son but est de mettre en place un ensemble de principes pour le développement des ontologies afin que les ontologies de référence soient interopérables dans le domaine biomédical. Au même moment, un groupe de développeurs de certaines ontologies d'OBO ont initié la fonderie OBO (OBO Foundry), une expérience de collaboration basée sur l'accord volontaire des participants, sur un ensemble de principes qui étendent les principes originaux d'OBO, à savoir que les ontologies i) devraient être développées dans un effort de collaboration, ii) utiliseraient des relations définies sans ambiguïté, iii) fourniraient des procédures pour le traitement des remarques des utilisateurs et l'identification des versions successives, iv) aient un thème clairement

¹⁸<http://www.geneontology.org/>

¹⁹<http://bioportal.bioontology.org/>

²⁰<http://www.mged.org/>

²¹<http://www.obofoundry.org/>

défini.

- SNOMED²² (Systematized Nomenclature of Medicine) : SNOMED CT (Systematized Nomenclature of Medicine-Clinical Terms) est considérée comme la terminologie la plus complète pour le domaine clinique et de la santé.
- UMLS²³ (Unified Medical Language System) : développé à la bibliothèque nationale de médecine aux USA, dans le but de faciliter le développement de systèmes informatiques qui accèdent à des ressources médicales. Pour cela, UMLS combine dans une seule plateforme un grand nombre de terminologies.
- FMA²⁴ (The Foundational Model of Anatomy ontology) : une ontologie d'utilisation libre, qui représente les classes et relations nécessaires pour une description symbolique des structures phénotypiques du corps humain dans une forme navigable et compréhensible aux êtres humains, mais aussi interprétable par des machines. C'est une ontologie qui décrit un corps humain cohérent sous forme d'une connaissance déclarative explicite de l'anatomie, de son niveau microscopique au niveau macroscopique. Initialement conçue pour compléter le volet anatomique d'UMLS, FMA est maintenant proposée comme une ontologie de référence, utilisée à des fins multiples, telles que la corrélation de différentes vues de l'anatomie, l'alignement des ontologies existantes et émergentes en bioinformatique, et fournissant une structure fondée sur les modèles ("templates") pour la représentation des fonctions biologiques [218].

Parmi ces bases de connaissances terminologiques, Gene Ontology, FMA et surtout les ontologies comprises dans OBO sont plus proches de la notion d'ontologie que de la notion de terminologie. Elles sont développées selon un minimum de principes ontologiques. OBO par exemple a pour but de créer des ontologies de référence interoperables dans le domaine biomédical. OBO et FMA peuvent être classifiées selon la deuxième dimension définie par Heijst et al., étant donné qu'elles concernent le domaine biomédical et l'anatomie humaine respectivement. Selon la classification définie par Guarino et celle définie par Oberle, OBO et FMA sont plutôt des ontologies de domaine parce qu'elles décrivent les concepts d'un domaine spécifique et elles sont suffisamment génériques. Gene Ontology, quant à elle, peut être classifiée selon la première dimension définie par Heijst et al., vu qu'elle est une ontologie terminologique, et se classifie comme OBO et FMA dans les deux autres classifications définies par Guarino et Oberle, car elle décrit les concepts d'un domaine spécifique, qui est le Gène et la biologie en général.

Les terminologies, notamment en biomédecine, ont été développées bien avant que les ontologies "informatiques" connaissent le succès qu'elles ont aujourd'hui. Elles étaient développées initialement pour effectuer des tâches spécifiques telles que l'indexation et la recherche de documents. Ce sont en général des bases terminologiques volumineuses et qui

²²<http://www.ihtsdo.org/>

²³<http://www.nlm.nih.gov/research/umls/>

²⁴<http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/AboutFM.html>

nécessitent un temps et un effort considérables pour leur développement. L'UMLS par exemple inclut plus d'un million de concepts et intègre plus de 100 sources terminologiques. Elle est constituée, entre autres, d'un métathésaurus et d'un réseau sémantique [119]. Le métathésaurus de l'UMLS est la collection des terminologies médicales intégrées. C'est une compilation de termes, de concepts, de relations et de l'information associée. Le réseau sémantique contient 135 types sémantiques, son objectif est de fournir une catégorisation cohérente de tous les concepts représentés dans le métathésaurus, et de fournir aussi des relations utiles entre ces concepts. UMLS a fait l'objet de nombreuses études. Les travaux dans [24] évaluent l'utilité d'UMLS, comme une terminologie et une ressource de connaissances pour l'informatique biomédicale, en explorant la couverture de ses termes et de ses relations vis-à-vis des besoins des applications biomédicales. D'autres travaux se sont focalisés sur le rôle du réseau sémantique d'UMLS, en tant qu'ontologie du domaine biomédical. Une étude [35] a analysé la compatibilité du réseau sémantique d'UMLS avec d'autres ontologies contenant des concepts généraux, telle que l'ontologie supérieure de openCyc²⁵ et WordNet²⁶. Traduire les concepts du réseau sémantique d'UMLS vers les concepts de OpenCyc et de WordNet, révèle deux soucis majeurs : les classes de même nom n'ont pas la même sémantique dans les différentes ontologies, et deux classes peuvent avoir la même signification par intention, alors que leur extension dans les différentes ontologies est différente. Ceci prouve que l'évolution des terminologies vers des ontologies ne sera pas une tâche facile, et nécessitera probablement un grand effort. C'est d'autant plus difficile que les terminologies médicales sont déjà largement utilisées, avec parfois du succès. Elles sont le fruit de plusieurs années d'effort et d'investissement de la communauté biomédicale, ce qui provoque, d'ailleurs, une certaine réticence lorsque la question de leur remise en cause est évoquée. Cependant, l'évolution des terminologies vers des ontologies permettra, entre autres, une meilleure interopérabilité et une meilleure communication des systèmes de la santé, et deviendra nécessaire, même si cela prendra du temps.

Dans le travail abordé dans cette thèse, les ontologies jouent un grand rôle. Elles permettent la diffusion et le partage de connaissances relatives à l'anatomie du cerveau. De plus, une ontologie formelle de l'anatomie du cerveau facilitera l'accès, notamment via des programmes, au contenu sémantique des images du cerveau.

Dans la section 1.3 nous présentons les logiques de description, qui constituent un support formel de représentation de connaissances très prometteur, qui est la base du langage d'ontologies du Web recommandé par le W3C.

²⁵<http://www.opencyc.org/>

²⁶<http://wordnet.princeton.edu/>

1.3 Les Logiques de Description

Les logiques de description forment une famille de langages de représentation de connaissances qui peuvent être utilisés pour représenter la connaissance terminologique d'un domaine d'application d'une façon structurée et formelle. Ces logiques sont issues de modèles graphiques de représentation de connaissances, notamment les réseaux sémantiques qui dérivent à leur tour des modèles à mémoire sémantique de Quillian [158]. En général, dans un réseau sémantique on distingue des concepts (dénotés par des noeuds génériques), des individus (dénotés par des noeuds d'individus), des liens classe-fille / classe-mère et des liens de propriétés.

En utilisant les liens classe-fille / classe-mère, les concepts peuvent être classés dans une hiérarchie via les liens des propriétés. Les propriétés peuvent être assignées aux concepts. Toutefois, par manque de sémantique précise, les liens classe-fille / classe-mère peuvent être interprétés de différentes manières. Afin de pallier cette ambiguïté, d'autres formalismes ont été développés tels que les réseaux d'héritage structurés qui ont été implémentés dans le système KL-ONE [33]. Par la suite, KL-ONE a été doté d'une sémantique "Tarsky Style", ce qui a fixé, de manière précise, la signification de ses constructeurs graphiques et a conduit à la définition de la première logique de description [120], appelée aussi à cette époque langages terminologiques, langages conceptuels ou encore langages basés KL-ONE.

Les logiques de description [74] constituent un formalisme intéressant pour représenter des bases de connaissances. Ce formalisme est basé sur la logique du premier ordre, et donc permet une représentation formelle des concepts d'un domaine particulier. Cependant, afin d'avoir des algorithmes de raisonnement décidables, se terminant en un temps fini, les logiques de description n'utilisent pas toute la logique du premier ordre, mais uniquement un fragment de cette dernière (figure 1.5). Des techniques d'optimisation sont utilisées dans certains algorithmes de raisonnement afin de réduire leur complexité, c'est-à-dire afin qu'ils s'exécutent en un temps raisonnable.

En procédant ainsi, les logiques de description se veulent un compromis entre l'expressivité d'un côté, et la tractabilité et complexité de l'autre. Les logiques de description trouvent des applications dans différents domaines, notamment pour la construction des ontologies de domaines telles que les ontologies médicales, mais aussi elles sont le fondement du Web Sémantique. Les logiques classiques (logiques du premier ordre, logiques propositionnelles et logiques de description) ont en effet donné naissance à plusieurs langages Web recommandés par le W3C²⁷, tels que RDF²⁸, RDFS²⁹, et OWL³⁰. Ce dernier est en effet le langage standard pour la représentation des ontologies.

²⁷World Wide Web Consortium, <http://www.w3.org/>

²⁸Resource Description Framework, <http://www.w3.org/RDF/>

²⁹Resource Description Framework Schema, <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

³⁰Ontology Web Language, <http://www.w3.org/2004/OWL/>

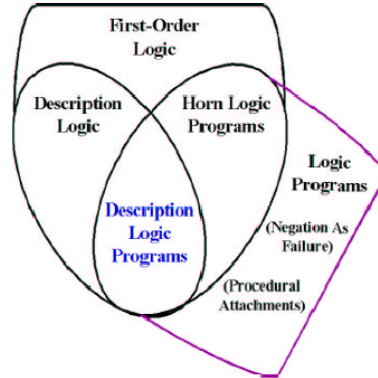


FIG. 1.5: Le fragment de la logique du premier ordre choisi pour les logiques de description.

Afin d'augmenter l'expressivité des bases de connaissances représentées en logiques de description, ces dernières peuvent être étendues ou combinées avec des règles, sans toutefois perdre les bonnes propriétés de raisonnement relatives à la décidabilité et la complexité [171]. Ceci impose des restrictions sur les règles et la logique de description utilisée, par exemple la restriction aux règles de **Horn** avec variables et sans fonctions [2].

1.3.1 Définition du formalisme de base

Une base de connaissances (KR pour Knowledge Representation) basée sur une logique de description comprend deux composants : la TBox et la ABox. La TBox introduit la terminologie, c'est-à-dire le vocabulaire du domaine d'une application, alors que la ABox est un ensemble de formules relatives aux informations sur les assertions, c'est-à-dire elle décrit les individus et leurs relations connus. Le vocabulaire consiste en des concepts, qui dénotent des ensembles d'individus, et des rôles qui dénotent des relations binaires entre des individus. En plus des concepts atomiques et des rôles atomiques (les noms des concepts et des rôles), tous les systèmes DL (Description Logics) permettent de construire des descriptions de concepts et de rôles plus complexes. Le langage de construction de descriptions constitue une caractéristique du système en question.

Une logique de description permet une définition formelle des concepts :

- La définition d'un concept impose des contraintes sur ses instances ;
- La satisfiabilité des concepts permet de tester qu'un concept C est satisfiable ; c'est-à-dire que son interprétation ne donne pas toujours l'ensemble vide. En d'autres termes ça dénote l'existence d'instance. Un concept C est satisfaisable par rapport à une TBox $\mathcal{T}$ si il y a un modèle $\mathcal{I}$ de $\mathcal{T}$ tel que $C^{\mathcal{I}} \neq \emptyset$;
- La subsomption, ou l'inclusion de concepts. Un concept D subsume un concept C

- par rapport à une TBox $\mathcal{T}$ ($C \sqsubseteq_{\mathcal{T}} D$) si dans tout modèle $\mathcal{I}$ de $\mathcal{T}$ on a $C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}}$;
- La dérivation ou la déduction, permet de retrouver les faits à partir des connaissances représentées ;
 - L’instanciation consiste à créer une instance d’un concept ou d’un rôle particulier de la TBox.

1.3.2 Langages de description

Les descriptions élémentaires sont les concepts atomiques et les rôles atomiques à partir desquels des descriptions complexes peuvent être générées via les constructeurs de concepts et les constructeurs de rôles. Les langages de description sont distingués par rapport aux constructeurs qu’ils fournissent. Le langage $\mathcal{AL}$ (pour *Attributive Language*) a été introduit dans [181] comme un langage minimal ayant un intérêt pratique. Les autres langages de la famille $\mathcal{AL}$ en sont une extension.

Le langage de description basique $\mathcal{AL}$

Les descriptions de concepts dans le langage $\mathcal{AL}$ sont générées selon la règle syntaxique suivante :

$$\begin{array}{ll}
 C, D \rightarrow & A \mid \quad (\text{concept atomique}) \\
 & \top \mid \quad (\text{concept universel}) \\
 & \perp \mid \quad (\text{concept bottom}) \\
 & \neg A \mid \quad (\text{negation atomique}) \\
 & C \sqcap D \mid \quad (\text{intersection}) \\
 & \forall R.C \mid \quad (\text{restriction de valeur}) \\
 & \exists R.\top \mid \quad (\text{quantificateur existentiel limité})
 \end{array}$$

où les lettres A et B designent des concepts atomiques, la lettre R désigne un rôle atomique et les lettres C et D désignent les descriptions de concepts.

A noter que dans le langage $\mathcal{AL}$, la négation n’est appliquée qu’aux concepts atomiques et seul le concept universel est permis à la portée du quantificateur existentiel. D’autre part, le sous langage de $\mathcal{AL}$ obtenu en supprimant la négation atomique est appelé $\mathcal{FL}^-$ alors que le sous langage de $\mathcal{FL}^-$ obtenu en supprimant le quantificateur existentiel limité est appelé $\mathcal{FL}_0$.

L’exemple suivant nous donne une idée de ce qui peut être exprimé dans le langage $\mathcal{AL}$:

Exemple 1 [74] Soient **Person** et **Female** deux concepts atomiques. Donc $\text{Person} \sqcap \text{Female}$ et $\text{Person} \sqcap \neg \text{Female}$ sont des concepts décrivant intuitivement les personnes qui

sont de sexe féminin et les personnes qui ne sont pas de sexe féminin. En outre, étant donné un rôle atomique **hasChild**, on peut construire les concepts $\text{Person} \sqcap \exists \text{hasChild}.\top$ et $\text{Person} \sqcap \forall \text{hasChild}.\text{Female}$ dénotant, respectivement, les personnes qui ont un enfant et les personnes dont tous les enfants sont de sexe féminin. Enfin, en utilisant le concept "bottom", on peut également décrire les personnes qui n'ont pas d'enfants par $\text{Person} \sqcap \forall \text{hasChild}.\perp$.

En vue de définir une sémantique formelle des concepts- $\mathcal{AL}$, on considère une interprétation $\mathcal{I}$ définie par la donnée d'un ensemble non vide $\Delta^{\mathcal{I}}$ (le domaine d'interprétation) et d'une fonction d'interprétation, qui assigne à chaque concept atomique A un ensemble $A^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}}$ et à chaque rôle atomique R une relation binaire $R^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}$. Une fonction d'interprétation est étendue aux descriptions de concepts via la définition inductive suivante :

$$\begin{aligned} \top^{\mathcal{I}} &= \Delta^{\mathcal{I}} \\ \perp^{\mathcal{I}} &= \emptyset \\ (\neg A)^{\mathcal{I}} &= \Delta^{\mathcal{I}} - A^{\mathcal{I}} \\ (C \sqcap D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cap D^{\mathcal{I}} \\ (\forall R.C)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \forall b, (a, b) \in R^{\mathcal{I}} \rightarrow b \in C^{\mathcal{I}}\} \\ (\exists R.\top)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists b, (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\} \end{aligned}$$

Deux concepts C et D sont dits équivalents, $C \equiv D$, si et seulement si $C^{\mathcal{I}} = D^{\mathcal{I}}$ pour toute interprétation $\mathcal{I}$. Par exemple, on peut facilement vérifier que les concepts $\forall \text{hasChild}.\text{Female} \sqcap \forall \text{hasChild}.\text{Student}$ et $\forall \text{hasChild}.\text{(Female} \sqcap \text{Student)}$ sont équivalents.

La famille des langages $\mathcal{AL}$

D'autres langages, plus expressifs, peuvent être définis en rajoutant d'autres constructeurs au langage $\mathcal{AL}$ à savoir :

- L'union de concepts, désignée par la lettre $\mathcal{U}$, notée par $C \sqcup D$ et interprétée par :

$$(C \sqcup D)^{\mathcal{I}} = C^{\mathcal{I}} \cup D^{\mathcal{I}}.$$

- La quantification existentielle complète, désignée par la lettre $\mathcal{E}$, notée par $\exists R.C$ et interprétée par :

$$(\exists R.C)^{\mathcal{I}} = \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists b, (a, b) \in R^{\mathcal{I}} \wedge b \in C^{\mathcal{I}}\}.$$

- Les restrictions de nombres, désignées par la lettre $\mathcal{N}$ et notées par $\geq nR$ (restriction au moins) et par $\leq nR$ (restriction au plus) où n représente un entier positif. Ces restrictions de valeurs sont interprétées respectivement comme suit :

$$(\geq nR)^{\mathcal{I}} = \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} : |\{b \mid (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\}| \geq n\},$$

et

$$(\leq nR)^{\mathcal{I}} = \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} : |\{b \mid (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\}| \leq n\},$$

où " $|\cdot|$ " dénote le cardinal d'un ensemble donné.

- La négation de concepts arbitraires, désignée par la lettre (C) , notée par $\neg C$ et interprétée de la façon suivante :

$$(\neg C)^{\mathcal{I}} = \Delta^{\mathcal{I}} - (C)^{\mathcal{I}}.$$

Exemple 2 [74] Avec ces nouveaux constructeurs, on peut par exemple décrire les personnes ayant soit au plus un enfant soit au moins trois enfants dont un est de sexe féminin comme suit :

$$\text{Person} \sqcap (\leq 1 \text{ hasChild} \sqcup (\geq 3 \text{ hasChild} \sqcap \exists \text{hasChild.Female})).$$

Etendre le langage $\mathcal{AL}$ par n'importe quel sous ensemble des constructeurs précédents génère un langage $\mathcal{AL}$ particulier désigné par une chaîne de caractères de la forme :

$$\mathcal{AL}[\mathcal{U}][\mathcal{E}][\mathcal{N}][\mathcal{C}],$$

où une lettre dans l'appellation reflète la présence du constructeur correspondant. Par exemple, $\mathcal{AL}\mathcal{E}\mathcal{N}$ est l'extension de $\mathcal{AL}$ par la quantification existentielle complète et les restrictions de nombres.

D'un point de vue sémantique, on a $C \sqcup D \equiv \neg(\neg C \sqcap \neg D)$ et $\exists R.C \equiv \neg\forall R.\neg C$. Par conséquent, l'union et la quantification universelle complète peuvent être exprimées via la négation et vice versa. Ainsi, on utilisera la lettre $\mathcal{C}$ au lieu des lettres $\mathcal{UE}$ dans les noms de langages. Par exemple, on écrira $\mathcal{AL}\mathcal{C}\mathcal{N}$ au lieu de $\mathcal{AL}\mathcal{UE}\mathcal{N}$.

1.3.3 Les différentes logiques de description

Les logiques de description ont une base commune enrichie de différentes extensions. On peut dès lors avoir des concepts complexes composés de concepts atomiques, et de même pour les rôles. Le langage $\mathcal{ALC}$ (Attributive Language of Concepts) introduit par Schmidt-Schauss et Smolka est un fragment structuré de la logique des prédicats. Il est souvent utilisé comme langage de référence minimal pour les logiques de description. Plusieurs logiques de description permettent d'étendre $\mathcal{ALC}$ avec des propriétés supplémentaires. Ainsi, les quantifications de rôle sont notées $\mathcal{N}$ et l'intersection de rôles est notée $\mathcal{R}$. Cela permet de définir des logiques de description telles que $\mathcal{ALCN}$, $\mathcal{ALCR}$ ou $\mathcal{ALCRN}$. La logique de description obtenue en ajoutant à $\mathcal{ALC}$ la définition de rôles transitifs s'appelle $\mathcal{S}$. A $\mathcal{S}$, on peut aussi ajouter la hiérarchie de rôles ($\mathcal{H}$), les rôles fonctionnels ($\mathcal{F}$), c'est-à-dire qu'à un élément de l'ensemble de départ, le rôle fait correspondre au plus un élément

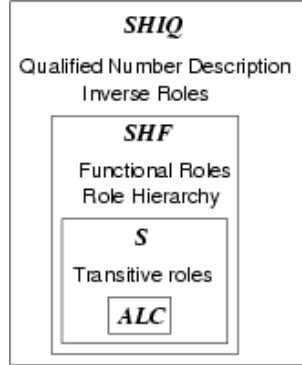


FIG. 1.6: Quelques extensions classiques de la logiques de description $\mathcal{ALC}$.

de l'ensemble d'arrivée, la définition de rôles inverses ($\mathcal{I}$) ou encore les restrictions de cardinalité ($\mathcal{Q}$). Les extensions de $\mathcal{ALC}$ les plus couramment utilisées sont $\mathcal{SHF}$ et $\mathcal{SHIQ}$. La figure 1.6 schématise les relations entre les principales extensions de $\mathcal{ALC}$.

1.3.4 Axiomes terminologiques

En général, les axiomes terminologiques sont de la forme

$$C \sqsubseteq D \quad (R \sqsubseteq S)$$

ou

$$C \equiv D \quad (R \equiv S)$$

où C, D sont des concepts (et R, S sont des rôles). Les axiomes du premier type sont appelés inclusions alors que ceux du second type sont dits égalités. Pour simplifier, nous traiterons par la suite uniquement les axiomes liés aux concepts.

Sémantiquement, une interprétation $\mathcal{I}$ satisfait une inclusion $C \sqsubseteq D$ si et seulement si $C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}}$ et satisfait une égalité $C \equiv D$ si et seulement si $C^{\mathcal{I}} = D^{\mathcal{I}}$. Si Σ est un ensemble d'axiomes, alors $\mathcal{I}$ satisfait Σ si et seulement si $\mathcal{I}$ satisfait chaque élément de Σ . Si $\mathcal{I}$ satisfait un axiome (resp. un ensemble d'axiomes), alors $\mathcal{I}$ est dite modèle de cet axiome (resp. l'ensemble d'axiomes). Deux axiomes ou deux ensembles d'axiomes sont équivalents si et seulement si ils ont les mêmes modèles.

Définitions Une égalité dont le membre gauche est un concept atomique est une définition. Les définitions sont utilisées pour affecter des noms symboliques à des descriptions complexes. Par exemple, par l'axiome :

$$\text{Mother} \equiv \text{Woman} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Person}$$

on associe à la description $\text{Woman} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Person}$ le nom **Mother**. Les noms symboliques peuvent être utilisés comme des abréviations dans d'autres descriptions. Si, par exemple, on a défini le concept **Father** par analogie au concept **Mother**, on peut définir le concept **Parent** comme suit :

$$\text{Parent} \equiv \text{Mother} \sqcup \text{Father}.$$

On appelle un ensemble de définitions Σ une terminologie ou une TBox si aucun nom symbolique n'est défini plus d'une fois, c'est-à-dire pour chaque concept atomique A , il existe au plus un axiome dans Σ dont le membre gauche est A .

Exemple 3 [74] La terminologie suivante exprime des concepts liés à des relations familiales :

$$\begin{aligned} \text{Woman} &\equiv \text{Person} \sqcap \text{Female} \\ \text{Man} &\equiv \text{Person} \sqcap \neg \text{Woman} \\ \text{Mother} &\equiv \text{Woman} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Person} \\ \text{Father} &\equiv \text{Man} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Person} \\ \text{Parent} &\equiv \text{Mother} \sqcup \text{Father} \\ \text{GrandMother} &\equiv \text{Mother} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Parent} \\ \text{MotherWithoutDaughter} &\equiv \text{Mother} \sqcap \forall \text{hasChild}.\neg \text{Woman} \end{aligned}$$

1.3.5 Descriptions du monde ABox

Outre la terminologie ou la TBox, le second composant d'une base de connaissances est la description du monde ou la ABox.

La ABox décrit un état spécifique du domaine d'application en termes de concepts et de rôles. En fait, dans une ABox, on introduit des individus (en leur donnant des noms) ainsi que leurs propriétés. Les individus sont notés par a, b, c . Soit C un concept et R un rôle. On peut former des assertions comme suit : $C(a)$ et $R(b, c)$. La première assertion est dite assertion de concept, elle signifie que a appartient à (l'interprétation de) C tandis que la deuxième, qui est appelée assertion de rôle, signifie que c est un remplisseur du rôle R pour b .

Par exemple, si **PETER**, **PAUL** et **MARY** sont des noms d'individus, alors **Father** (**PETER**) signifie que **PETER** est un père et **hasChild**(**MARY**, **PAUL**) signifie que **PAUL** est enfant de **MARY**. Une ABox notée $\mathcal{A}$ est un ensemble fini de telles assertions.

Une **ABox** peut être vue comme étant une instance d’une base de données relationnelle avec seulement des relations unaires et binaires. Toutefois, contrairement à la sémantique du monde clos des bases de données classiques, la sémantique des **ABox** est une sémantique du monde ouvert étant donné que les systèmes de représentation de connaissances sont appliqués dans des situations où l’on peut supposer que l’information est incomplète.

La sémantique des **ABox** est définie par l’extention des interprétations aux noms d’individus. Donc une interprétation $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ n’assigne pas uniquement des ensembles et des relations binaires aux concepts et aux rôles mais aussi assigne à chaque nom d’individu a un élément $a^{\mathcal{I}}$ de $\Delta^{\mathcal{I}}$. On suppose que des noms d’individus distincts dénotent des objets différents. Par conséquent, l’interprétation doit satisfaire l’hypothèse du nom unique UNA (pour unique name assumption), c’est-à-dire, si a et b sont des noms différents alors $a^{\mathcal{I}} \neq b^{\mathcal{I}}$.

D’autre part, une interprétation $\mathcal{I}$ satisfait l’assertion de concept $C(a)$ si $a^{\mathcal{I}} \in C^{\mathcal{I}}$. Elle satisfait l’assertion de rôle $R(a, b)$ si $(a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}) \in R^{\mathcal{I}}$ et elle satisfait une **ABox** $\mathcal{A}$ si elle satisfait chaque assertion dans $\mathcal{A}$. Dans ce cas, $\mathcal{I}$ est dite modèle de l’assertion ou de la **ABox**. Enfin, une interprétation $\mathcal{I}$ satisfait une assertion ou une **ABox** par rapport à une terminologie Σ si en plus d’être un modèle de l’assertion ou de la base, elle est également un modèle de la terminologie Σ .

1.3.6 L’hypothèse du monde fermé et du monde ouvert

Soit une **ABox** $A = \{a : C, b : D, (a, b) : R\}$. Avec l’hypothèse du monde fermé (CWA : Closed-World Assumption) il n’existe pas d’autres instances de concepts et de rôles autres ceux définis dans A : ce qui ramène la sémantique à celle des Bases de Données classiques. Par conséquent, a n’est lié à b que par la relation R . On peut déduire, sous cette hypothèse, que a n’est pas lié à b par une autre relation différente de R , en d’autres termes on peut déduire la négation de tout ce qui n’existe pas explicitement dans la **ABox**, en anglais on appelle cette propriété “negation by failure”.

Par contre avec l’hypothèse du monde ouvert (OWA : Open-World Assumption), et contrairement à la sémantique des bases de données traditionnelles, l’absence d’information représente l’ignorance plutôt qu’une information négative.

1.3.7 Algorithmes de raisonnement en logiques de description

Intuitivement, au lieu de concevoir de nouveaux algorithmes en logiques de description, on peut essayer de réduire le problème qu’on veut résoudre à un problème d’inférence connu en logique classique. Par exemple, la décidabilité du problème d’inférence en logique $\mathcal{ALC}$ peut être obtenue en ayant la décidabilité du langage $\mathcal{L}^2$ (un fragment de la logique des prédicats du premier ordre à deux variables) en sachant que tout concept $\mathcal{ALC}$ peut être

traduit dans le langage $\mathcal{L}^2$. Prenons l'exemple suivant :

Exemple 4 [74] Une traduction directe du concept $\forall R.(\exists R.A)$ génère la formule

$$\forall y.(R(x, y) \rightarrow (\exists z.(R(y, z) \wedge A(z)))).$$

Comme la sous formule $\exists z.(R(y, z) \wedge A(z))$ ne contient pas la variable x , cette dernière peut être réutilisée à la place de z . Ce renommage génère la formule équivalente suivante :

$$\forall y.(R(x, y) \rightarrow (\exists x.(R(y, x) \wedge A(x))))$$

qui utilise uniquement deux variables.

Toutefois, la complexité des procédures de décision obtenues ainsi est souvent élevée : par exemple, le problème de satisfiabilité de la logique $\mathcal{L}^2$ est NEXPTIME-complet alors que le problème de satisfiabilité des descriptions des concepts $\mathcal{ALC}$ est "uniquement" PSPACE-complet. Ceci montre l'intérêt de développer de nouveaux algorithmes spécifiques aux logiques de description. D'autre part, tous les problèmes d'inférence peuvent être réduits au problème de satisfiabilité en sachant que le langage de description en question permet la négation et la disjonction. Certains langages de description, cependant, ne le permettent pas. Pour de tels langages, la subsumption de concepts peut être calculée par des algorithmes de subsumption structurelle, c'est-à-dire, des algorithmes qui comparent la structure syntaxique des descriptions de concepts. Bien que ces algorithmes soient très efficaces, ils ne sont complets (c'est-à-dire qu'on peut démontrer toute formule vraie) que pour des langages simples peu expressifs. En particulier, les langages de description avec négation et disjonction ne peuvent être traités par ce type d'algorithmes. Pour de tels langages, les algorithmes basés-tableau se trouvent très utiles. Le premier algorithme basé-tableau en logique de description a été proposé par Schmidt et Smolka [181] dans l'optique de tester la satisfiabilité des concepts $\mathcal{ALC}$. Depuis, cette approche a été utilisée pour tester la satisfiabilité de nombreuses logiques de description qui étendent $\mathcal{ALC}$.

1.3.8 Domaines d'application des logiques de description

D'un point de vue pratique, les logiques de description sont assez prometteuses. En fait, elles ont été utilisées dans l'implémentation de nombreuses applications dans divers domaines. Le génie logiciel, par exemple, a été l'un des premiers domaines d'application pour les logiques de description. L'idée de base était d'utiliser la logique de description afin d'implémenter un système qui puisse aider le développeur à retrouver des informations concernant un logiciel d'une taille importante. Le système LASSIE [63] est l'une des applications les plus référencées dans ce contexte. D'autre part, l'utilisation des logiques de description en configuration a connu un grand succès. La configuration revient à trouver

un ensemble de composants pouvant être convenablement connectés en vue d'implémenter un système donné. Lorsque le nombre et la connectivité des composants devient important, la configuration devient assez complexe. Dans ce cas, la logique de description permet de classer les composants et de les organiser dans une taxonomie. Par ailleurs, et sans être exhaustif, on peut citer d'autres domaines tels que le Web Sémantique pour la représentation d'ontologies et la recherche d'information basée sur la logique, la médecine où l'objectif est la construction et la maintenance de très grandes ontologies médicales, les bibliothèques numériques, les systèmes d'information du Web, le traitement du langage naturel et la gestion de bases de données.

1.3.9 Les logiques de description et le Web Sémantique

Les problèmes d'accès à l'information sur le Web sont dus en partie à l'absence d'un modèle symbolique de ce que représentent ces informations, autrement dit à l'absence d'un modèle explicite des connaissances impliquées [105]. Raisonner sur ce que représentent les ressources du Web demande une part de raisonnement sur leur modèle, d'une façon similaire au raisonnement sur les **ABox** et les **TBox**. De plus, étant destinés à porter sur de grandes quantités d'information, ces raisonnements doivent avoir une complexité calculatoire restreinte.

Le W3C est un consortium dont l'un des objectifs est de promouvoir le développement de technologies permettant l'interopérabilité à travers le réseau Internet. A ce titre, il soutient activement le Web Sémantique.

Les logiques de description participent au Web Sémantique en fournissant une représentation de la signification de l'information qui soit à la fois formelle et qui permette des traitements efficaces. Leur utilisation dans des situations concrètes a conduit à l'implémentation de plusieurs langages, notamment OWL (Ontology Web Language), le langage standard recommandé par le W3C, pour la représentation des ontologies. En effet OWL est un dérivé de XML³¹, il est le résultat de la synthèse de plusieurs autres langages de description utilisables dans le contexte du Web, comme DAML³² et OIL³³. Depuis 2005, un Workshop international est organisé spécialement pour le langage OWL, OWLED³⁴ (OWL : Experiences and Directions), et a lieu chaque année pour discuter des orientations à donner à ce langage. C'est un congrès particulièrement intéressant, qui attire des chercheurs du monde académique et industriel, où les divers utilisateurs de OWL font remonter leurs besoins pratiques pour qu'ils soient pris en compte dans les futures extensions et recherches théoriques consacrées à ce langage.

³¹Extensible Markup Language, <http://www.w3.org/XML/>

³²<http://www.daml.org/>

³³<http://www.w3.org/Submission/2001/12/>

³⁴<http://www.webont.org/owled/>

Constructor	DL Syntax	Example	FOL Syntax
intersectionOf	$C_1 \sqcap \dots \sqcap C_n$	Human $\sqcap$ Male	$C_1(x) \wedge \dots \wedge C_n(x)$
unionOf	$C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$	Doctor $\sqcup$ Lawyer	$C_1(x) \vee \dots \vee C_n(x)$
complementOf	$\neg C$	$\neg$ Male	$\neg C(x)$
oneOf	$\{x_1\} \sqcup \dots \sqcup \{x_n\}$	{john} $\sqcup$ {mary}	$x = x_1 \vee \dots \vee x = x_n$
allValuesFrom	$\forall P.C$	$\forall$ hasChild.Doctor	$\forall y.P(x, y) \rightarrow C(y)$
someValuesFrom	$\exists P.C$	$\exists$ hasChild.Lawyer	$\exists y.P(x, y) \wedge C(y)$
maxCardinality	$\leq nP$	≤ 1 hasChild	$\exists \leq n y.P(x, y)$
minCardinality	$\geq nP$	≥ 2 hasChild	$\exists \geq n y.P(x, y)$

FIG. 1.7: Quelques constructeurs de OWL DL.

Les logiques de description servent de support théorique pour le langage OWL, notamment la variante OWL DL qui fait le compromis entre l'expressivité en termes de représentation et de décidabilité des algorithmes de raisonnement sur des ontologies représentées dans ce langage. OWL DL correspond à la logique de description $\mathcal{SHIQ}$, dont les constructeurs, la syntaxe et la représentation en logique du premier ordre sont définis sur la figure 1.7.

D'autres axiomes de OWL sont montrés sur la figure 1.8³⁵. On peut observer que les axiomes sont exprimés en langage naturel afin de faciliter leur utilisation et leur compréhension.

Axiom	DL Syntax	Example
subClassOf	$C_1 \sqsubseteq C_2$	Human $\sqsubseteq$ Animal $\sqcap$ Biped
sameClassAs	$C_1 \equiv C_2$	Man $\equiv$ Human $\sqcap$ Male
subPropertyOf	$P_1 \sqsubseteq P_2$	hasDaughter $\sqsubseteq$ hasChild
samePropertyAs	$P_1 \equiv P_2$	cost $\equiv$ price
disjointWith	$C_1 \sqsubseteq \neg C_2$	Male $\sqsubseteq \neg$ Female
sameIndividualAs	$\{i_1\} \equiv \{i_2\}$	{President_Bush} $\equiv$ {G_W_Bush}
differentIndividualFrom	$\{i_1\} \sqsubseteq \neg \{i_2\}$	{john} $\sqsubseteq \neg$ {peter}
inverseOf	$P_1 \equiv P_2^-$	hasChild $\equiv$ hasParent ⁻
transitiveProperty	$P^+ \sqsubseteq P$	ancestor ⁺ $\sqsubseteq$ ancestor
uniqueProperty	$T \sqsubseteq \leq 1 P.T$	$T \sqsubseteq \leq 1$ hasMother.T
unambiguousProperty	$T \sqsubseteq \leq 1 P^-.T$	$T \sqsubseteq \leq 1$ isMotherOf ⁻ .T
range	$T \sqsubseteq \forall P.C$	$T \sqsubseteq \forall$ hasParent.Human
domain	$T \sqsubseteq \forall P^-.C$	$T \sqsubseteq \forall$ hasParent ⁻ .Human
i type C	$i : C$	john : Man
i ₁ P i ₂	$\langle i_1, i_2 \rangle : P$	$\langle \text{john}, \text{peter} \rangle : \text{hasParent}$

FIG. 1.8: Axiomes du langage OWL.

Maintenant il est possible de comprendre la sémantique des fichiers OWL, par exemple

³⁵<http://www2003.org/cdrom/papers/refereed/p117/img4.png>

l'expression : $\text{Person} \sqcap \exists \text{hasChild.}(\text{Doctor} \sqcup \exists \text{hasChild.Doctor})$ peut être exprimée en OWL comme montré sur la figure 1.9.

```
<owl:Class>
  <owl:intersectionOf rdf:parseType=" collection">
    <owl:Class rdf:about="#Person"/>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#hasChild"/>
      <owl:toClass>
        <owl:unionOf rdf:parseType=" collection">
          <owl:Class rdf:about="#Doctor"/>
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="#hasChild"/>
            <owl:hasClass rdf:resource="#Doctor"/>
          </owl:Restriction>
        </owl:unionOf>
      </owl:toClass>
    </owl:Restriction>
  </owl:intersectionOf>
</owl:Class>
```

FIG. 1.9: Exemple de représentation en OWL (<http://www.comlab.ox.ac.uk/people/ian.horrocks/Seminars/download/needham.ppt>).

D'autres détails sur OWL seront donnés dans la section 1.5, notamment sur les autres versions de OWL et le stade actuel que ce langage a atteint, sachant que son évolution est très rapide ces dernières années, due à l'intérêt qu'il suscite au sein des différentes communautés, qui, à leur tour, s'impliquent davantage dans son évolution.

La figure 1.10 montre les différents langages intervenant dans le Web Sémantique. L'axe vertical représente la richesse sémantique de leur description. OWL se situe au niveau ontologique.

Si les ontologies, OWL et les logiques de description sont largement utilisées aujourd'hui dans le cadre du Web Sémantique, ce n'est pas pour autant que la promotion des règles dans ce même cadre a été abondonnée. En effet, l'utilisation des règles dans les systèmes des entreprises et dans le commerce électronique est très importante, et les capacités d'inférence qu'offrent les règles sont attrayantes. La section suivante présente les règles, leur utilisation dans le cadre du Web Sémantique, ainsi que quelques travaux sur l'utilisation conjointe des logiques standards, notamment les logiques de description, et des règles dans le Web Sémantique.

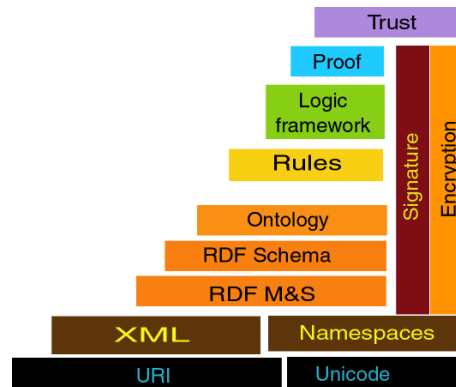


FIG. 1.10: Les différents langages intervenant dans le Web Sémantique (<http://www.oxygen.lcs.mit.edu/images/SemanticWeb.jpg>).

1.4 Les règles

Les règles représentent le moyen classique de représentation de connaissances, souvent utilisées en Intelligence Artificielle et dans les systèmes experts. Une règle d'inférence est une fonction qui prend un n -uplet de formules et rend une formule. Ses arguments sont appelés "les prémisses" et sa valeur la "conclusion"³⁶. Les règles d'inférence peuvent également être vues comme des relations liant prémisses et conclusions par lesquelles une conclusion est dite "déductible" ou "dérivable" des prémisses. Si l'ensemble des prémisses est vide, alors la conclusion est appelée un "théorème" ou un "axiome" de la logique. Le langage formel utilisé pour décrire les prémisses et la conclusion dépend du système formel ou logique où l'on s'est placé. Dans le cas le plus simple, les formules sont tout simplement des expressions logiques ; c'est ainsi le cas pour le modus ponens³⁷ qui est un type de raisonnement logique consistant à affirmer une implication ("si A alors B ") et à poser ensuite l'antécédent ("or, A ") pour en déduire la vérité du conséquent ("donc B "). Le modus ponens est connu aussi sous le nom de la "déduction" qui se lit :

- Si un fait a est vrai
- Et si la règle "si a est vrai alors b l'est aussi", est vraie
- Alors b est nécessairement vrai

Un exemple de règle de type modus ponens est le suivant :

- Etant donné une règle : Tous les hommes sont mortels (prémisse majeure ou règle)
- Etant donné un fait : Socrate est un homme (prémisse mineure ou cas particulier)
- On en déduit un fait : Donc Socrate est (nécessairement) mortel (conclusion)

³⁶http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A8gle_d'inf%C3%A9rence

³⁷http://fr.wikipedia.org/wiki/Modus_ponens

La conclusion du raisonnement déductif est toujours vraie si les prémisses sont vraies. Il n'y a aucune notion d'incertitude. En cela, il se différencie des raisonnements abductifs et inductifs pour lesquels, des prémisses vraies entraînent que la conclusion soit peut-être vraie. Le modus ponens est utilisé en chaînage avant, c'est-à-dire, à partir de tous les faits connus, produire toutes les conséquences jusqu'à ce qu'une solution se trouve parmi les inférences, ce qui n'est pas le cas, par exemple, du raisonnement inductif où les règles sont utilisées en chaînage arrière, c'est-à-dire qu'à partir d'une description de la solution recherchée, on produit les étapes intermédiaires hypothétiques qui permettront de déduire la solution.

La forme des règles la plus utilisée en chaînage avant est celle qui est sous forme de clauses de **Horn** sans fonction [103]. Elles sont de la forme suivante : $Q \leftarrow P_1 \wedge \dots \wedge P_n$, où $n \geq 0$, $Q, P_1, \dots, P_n$ sont des prédicats n -aires. Les règles de **Horn** sont la base du langage de programmation **Prolog**[1]. Une règle de Horn est composée d'un antécédent ($P_1 \wedge \dots \wedge P_n$ dans la règle précédente), et d'un conséquent (Q dans la règle précédente). Les règles sont une forme d'implication entre l'antécédent (ou corps de la règle) et le conséquent (ou tête de la règle). Lorsque les conditions spécifiées dans le corps de la règle sont satisfaites, alors les conditions spécifiées dans la tête de règle doivent être satisfaites. L'antécédent et le conséquent consistent en zéro ou plusieurs atomes. Un antécédent (ou un corps) vide est considéré comme trivialement vrai, et un conséquent (ou une tête) vide est considéré comme trivialement faux.

Nous nous intéressons dans les sections suivantes au rôle que jouent les règles dans le cadre du Web Sémantique, ainsi qu'à l'extension des logiques de description et du langage **OWL DL** aux règles, en vue d'étudier leur utilisation conjointe pour modéliser les connaissances anatomiques du cerveau.

1.4.1 Les règles et le Web Sémantique

Les règles jouent un rôle croissant dans diverses applications du Web Sémantique ainsi que dans les systèmes d'information classiques. On envisage que le Web devienne le lieu de publication, de distribution et d'échange de connaissances fondées sur les règles. Les entreprises gèrent et spécifient leur logique financière sous forme de règles [95]. Les règles sont également utilisées dans la modélisation des politiques de sécurité dans les systèmes coopératifs [27, 151], et elles gagnent davantage de terrain dans le raisonnement sur les données du Web [70, 172]. Afin d'exploiter toutes les potentialités des approches basées sur les règles, les communautés du Web Sémantique et du commerce électronique ont commencé à développer des solutions pour la réutilisation et l'intégration de connaissances exprimées dans différents langages de règles. L'initiative **RMI** (Rule Markup Initiative), entamée en 2000, a concentré ses efforts pour la définition d'un langage partageable de représentation de règles (**RuleML**) qui "englobe" plusieurs types de règles. Le réseau européen d'excel-

lence REVERSE³⁸ (Reasoning on the Web with Rules and Semantics) propose R2ML [212], un langage de représentation de règles qui offre une solution pour l'échange entre des systèmes hétérogènes utilisant différents langages de règles. Vers la fin de l'année 2005, et constatant l'importance et les promesses de cette vision, le comité W3C a constitué le groupe de travail sur le format d'échange de règles (Rule Interchange Format Working Group (RIF WG)) et lui a délégué le mandat de développer un format d'échange de règles harmonisé avec les normes existantes de la pile architecturale du Web Sémantique (figure 1.10). Toutefois, la création d'un format d'échange reconnu et unanime est loin d'être une tâche triviale. En premier lieu, il n'y a pas d'unanimité quant à l'interprétation du terme "règle". Les chercheurs et les intéressés distinguent les règles déductives, les règles d'interrogation, les règles de production, les règles de connexion, etc. En deuxième lieu, dans une même catégorie de règles, les systèmes font appel à diverses sémantiques et syntaxes (souvent incompatibles). En troisième lieu, les normes actuelles du Web Sémantique, comme RDF et OWL, montrent des incompatibilités avec de nombreuses variétés de langages de règles au niveau conceptuel [26].

On peut se demander alors si les règles représentent une alternative ou un concurrent pour les ontologies (basées sur les logiques de description) dans le cadre du Web Sémantique. En effet, il y a un consensus dans la communauté du Web Sémantique sur la nécessité d'inclure aussi bien les règles que les ontologies [7]. Cela est bien reflété par le diagramme en pile du Web Sémantique sur la figure 1.10, bien que le niveau ontologie ait atteint un certain niveau de maturité que les règles, ou l'intégration des règles et des ontologies, n'ont pas encore atteint.

1.4.2 Classification des règles

Les classifications des règles sont diverses. Les règles sont classifiées selon le rôle qu'elles jouent dans différentes tâches. Par exemple, dans [84] les auteurs proposent les quatre classes de règles suivantes pour le Web Sémantique biomédical : les règles de déduction, les règles du méta-raisonnement, les règles de connexion et les règles d'interrogation. Cette classification n'est certes pas exhaustive, mais elle est indépendante du domaine dans lequel on les utilise.

- Les règles déductives : utilisées pour effectuer des inférences basées sur les dépendances entre les propriétés de l'ontologie ;
- Les règles de connexion : utilisées pour connecter les ontologies afin de pouvoir raisonner à travers plusieurs domaines tels que la génomique ;
- Les règles de "mapping" : utilisées pour "mapper" les ontologies en intégration d'information, pour permettre des requêtes sur des sources hétérogènes ;
- Les règles du méta-raisonnement : utilisées pour faciliter le méta-raisonnement, par

³⁸<http://reverse.net/>

exemple la validation et la maintenance des ontologies de référence de grande taille, ou le contrôle du raisonnement.

Une étude détaillée de cette classification, renforcée par des exemples concrets dans le domaine biomédical est donnée dans [79].

1.4.3 Intégration des ontologies et des règles dans le Web Sémantique

Le point de vue du W3C, concernant les ontologies, est reflété par le langage OWL. La version OWL DL permet de construire des ontologies avec une sémantique logique claire et bien définie. Cependant, les vocabulaires définis dans de telles ontologies consistent en des classes et des propriétés, c'est-à-dire, des prédicats unaires et binaires respectivement, ce qui limite l'expressivité de ce langage (OWL DL).

Par ailleurs, les règles proposées pour le Web Sémantique doivent avoir une sémantique clairement définie. Un choix naturel concerne alors les classes des règles provenant de la programmation logique et du raisonnement non monotone. Ces règles sont basées sur différents types de logiques et ont une sémantique bien définie, supportée par des algorithmes de raisonnement puissants. Les clauses de **Horn** sans fonction constituent le langage de règles le plus simple dans ce genre. A ce titre, SWRL (Semantic Web Rule Language) est un langage de règles pour le Web Sémantique, combinant le langage OWL DL et le langage RuleML. SWRL prend une approche d'intégration opposée aux méthodes de type DLP (Description Logic Programs), permettant d'intégrer des règles et OWL. En effet, les méthodes de type DLP consistent en l'intersection de la logique de **Horn** et des logiques de description, tandis que SWRL est l'union des deux. Pour les méthodes de type DLP, le langage résultant est une logique descriptive d'une forme inhabituelle et peu expressive. En revanche, SWRL garde la puissance de OWL DL, mais au prix de la décidabilité et des implémentations concrètes³⁹.

L'extension de OWL avec des règles consiste à étendre un ensemble d'axiomes du langage OWL pour inclure les règles. Cette extension transforme le langage OWL en un langage plus expressif où l'on pourra, par exemple, exprimer des formes de règles triangulaires qu'on ne peut pas exprimer avec OWL seul. Le problème inhérent à l'extension de OWL aux règles est lié au raisonnement. En effet, les algorithmes développés pour raisonner séparément sur les ontologies et les règles deviennent indécidables lorsqu'il s'agit de raisonner simultanément sur une ontologie et un ensemble de règles. **Racer**⁴⁰, par exemple, est un moteur d'inférence pour les ontologies, **Jess**⁴¹ est un moteur d'inférence pour les règles. Cependant, ni l'un ni l'autre ne peut raisonner sur une ontologie et des règles, combinées ensemble. Par conséquent, il faut de nouveaux supports de raisonnement

³⁹http://fr.wikipedia.org/wiki/Semantic_Web_Rule_Language

⁴⁰<http://www.sts.tu-harburg.de/~r.f.moeller/racer/>

⁴¹<http://herzberg.ca.sandia.gov/>

qui sont susceptibles d’agir simultanément sur l’ontologie et les règles. Pour ce faire, de nouvelles méthodes ont été proposées. Une idée simple consiste à utiliser deux raisonneurs séparément, un pour l’ontologie et un autre pour les règles. L’exemple de la famille est une parfaite illustration de cette méthode [83]. Dans cet exemple on utilise, d’une part, le plugin **SWRLJessTab** de **Protégé** pour “mapper” les règles SWRL et le langage LP (Logic Programming) de **Jess**, et de l’autre part on utilise **Racer** pour raisonner sur la *TBox* et la *ABox* (c’est-à-dire l’ontologie). Dans cette méthode, les éléments de la *ABox* (instances de concepts et de rôles) sont transformés en faits **Jess**, et les règles SWRL sont transformées en règles **Jess**. Après exécution du moteur d’inférence **Jess**, les nouveaux faits inférés sont convertis en assertions de concepts et de rôles dans la *ABox* soumise à **Racer**, grâce au processus de transformation inverse. L’itération de l’appel de **Racer** et de **Jess** continue jusqu’à la détection d’une contradiction ou jusqu’à ce qu’aucun nouveau fait ne soit inféré. L’avantage de cette méthode est le fait qu’elle soit simple à mettre en oeuvre. Cependant, l’exemple de la famille montre que certaines inférences sont omises lorsqu’on utilise deux raisonneurs séparément.

Le seul moyen subsistant alors, et qui est le meilleur pour le raisonnement sur une ontologie OWL DL étendue avec des règles, est d’en définir un nouveau formalisme avec une sémantique claire. C’est ce qu’ont fait Motik et al. [139] en étendant les ontologies OWL DL avec des règles dites DL-safe, c’est-à-dire dans lesquelles toute variable dans la tête de la règle doit apparaître dans un atome non DL dans le corps de la règle. Les auteurs ont démontré que l’extension des ontologies OWL DL aux règles DL-safe préserve la décidabilité du raisonnement. Un algorithme de raisonnement a également été proposé pour répondre à des requêtes sur des ontologies, exprimées dans la logique *SHIQ(D)*, étendues avec des règles DL-safe. Cet algorithme est basé sur la réduction de l’ontologie et des règles, ensemble, à des programmes datalog (suites de clauses) disjonctifs. Cette méthode a donné naissance à un nouveau raisonneur appelé **KAON2**⁴² capable d’effectuer des inférences sur des ontologies OWL DL étendues avec des règles DL-safe. L’inconvénient d’une telle approche réside dans les restrictions qui concernent les constructeurs de la logique de description considérée et les règles.

Dans le cas des règles DL-safe, le raisonnement ne tient compte que des instances explicitement introduites dans la *ABox*, ce qui limite le nombre d’inférences. Afin d’illustrer cela, reprenons l’exemple de la famille donné dans [79]. Soit l’ontologie suivante :

$$\begin{aligned} \text{Man} &\sqsubseteq \text{Human} \\ \text{Uncle} &\equiv \text{Man} \sqcap \exists \text{isUncle}.\text{Human} \\ \text{Parent} &\equiv \text{Human} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Human} \\ \text{Domain}(\text{hasChild}) &\equiv \text{Human} \text{ (resp. range)} \\ \text{Domain}(\text{hasSibling}) &\equiv \text{Human} \text{ (resp. range)} \end{aligned}$$

⁴²<http://kaon2.semanticweb.org/>

$$\begin{aligned}\text{Domain}(\text{hasUncle}) &\equiv \text{Human (resp. range)} \\ \text{isUncle} &\equiv (\text{hasUncle})^{-1}\end{aligned}$$

et soit la règle d'inférence suivante :

$$\text{hasChild}(\text{?z}, \text{?x}) \wedge \text{hasSibling}(\text{?z}, \text{?y}) \wedge \text{Man}(\text{?y}) \wedge \text{Human}(\text{?z}) \wedge \text{Human}(\text{?x}) \rightarrow \text{hasUncle}(\text{?x}, \text{?y})$$

Supposons maintenant que nous disposions des faits suivants dans la ABox : `Man(John)`, `Human(Bob)`, `Human(Sam)`, `hasChild(Bob, Sam)` et `hasSibling(Bob, John)`. KAON2 déduit alors le fait suivant : `hasUncle(Sam, John)`, et donc `John` est une instance de `Uncle`. Par contre si on a les faits suivants dans la ABox : `Man(John)`, `Parent(Bob)`, `Human(Sam)` et `hasSibling(Bob, John)`, comme `Bob` a un enfant (selon la définition de `Parent`) et `Bob` a un frère `John`, logiquement `John` devrait être inféré comme une instance de `Uncle`. Cependant KAON2 n'infère pas cela. La raison est que KAON2 calcule les conséquences pour les règles DL-safe. Etant donné que les règles SWRL ne sont pas DL-safe, alors KAON2 les interprète comme DL-safe, où toutes les variables doivent être liées à des individus connus. Comme il n'y a pas d'assertion connectant explicitement `Bob` à un individu connu par la relation `hasChild`, la règle ne se déclenche pas, et `John` n'est pas inféré instance de `Uncle`.

D'autres algorithmes et études sont proposés pour le raisonnement sur des ontologies étendues avec des règles [121, 64, 122, 104, 171, 172]. L'idée est que les règles peuvent utiliser aussi bien les prédicats unaires et binaires de l'ontologie (c'est-à-dire de classes et des propriétés) que les prédicats des règles, et afin de maintenir la décidabilité de cette intégration on utilise souvent la condition de "safety" qui restreint les variables qui apparaissent dans la tête de la règle à celles qui apparaissent dans au moins un prédicat positif (c'est-à-dire sans négation) du corps de la règle [154]. En d'autres termes, cette condition signifie que les règles ne peuvent être appliquées qu'aux individus nommés.

Dans le cas de la modélisation de l'anatomie du cerveau, qui fait en partie l'objet de notre étude dans cette thèse, et compte tenu de sa complexité, l'utilisation des ontologies et des règles, ensemble, peut être très utile pour mieux exprimer la sémantique des concepts, les relations entre les concepts et les dépendances entre les différentes relations.

La section 1.5 présente les différents outils de raisonnement et les différents langages de représentation, développés dans le cadre du Web Sémantique et dont nous nous servirons aussi pour la représentation des connaissances neuroanatomiques, pour la description du contenu des images du cerveau et dans les différents raisonnements impliqués.

1.5 Les outils et langages développés dans le cadre du Web Sémantique

Comme le Web Sémantique a gagné l'intérêt d'aussi bien des industriels que des scientifiques, plusieurs investissements et projets de grande envergure ont été lancés pour développer des langages et des outils qui facilitent la mise en oeuvre des idées développées dans le cadre du Web Sémantique.

1.5.1 Langages du Web Sémantique

Les langages du Web Sémantique sont ceux définis par le W3C. XML, RDF(S) et OWL constituent les trois couches de base du Web Sémantique (figure 1.11). XML (eXtensible Markup Language) est en quelque sorte un langage HTML amélioré permettant de définir de nouvelles balises. Il s'agit d'un langage permettant de mettre en forme des documents grâce à des balises (markup), afin de structurer leur contenu et de séparer le contenu de la présentation. XML a été mis au point par le XML Working Group sous l'égide du World Wide Web Consortium (W3C) dès 1996. Depuis 1998, les spécifications XML 1.0 ont été reconnues comme recommandations par le W3C, ce qui en fait un langage reconnu⁴³. XML est le support de sérialisation⁴⁴ sur lequel s'appuient RDF et OWL pour définir des structures de données et les relations logiques qui les lient. Ce qui veut dire qu'on peut exprimer et structurer des concepts complexes en utilisant RDF(S) et OWL, chose qu'on faisait autrefois avec les bases de données relationnelles ou avec l'ASN.1 (Abstract Syntax Notation One)⁴⁵. Par exemple, l'expression du fait "Paris est en France" se fait par le biais de l'écriture d'un triplet RDF, que l'on peut représenter sous la forme d'un graphe sujet-prédicat-objet comme montré sur la figure 1.12.

Les langages OWL et RDF(S) sont les plus utilisés actuellement dans le cadre du Web Sémantique. Ils sont détaillés dans les sections suivantes.

RDF

XML permet de représenter des données structurées. XML schema et DTD permettent de contraindre la structure de ces données. Mais la sémantique des données représentées en XML n'est pas rendue accessible à la machine. RDFS permet de décrire le vocabulaire d'un domaine donné et les relations entre les objets de ce vocabulaire. Ce dernier est utilisé pour annoter les ressources. RDF permet de définir des méta-données associées aux ressources du Web. RDF modélise les concepts et leurs instances sous forme de triplets.

⁴³<http://www.w3.org/XML/>

⁴⁴<http://www.clever-age.com>

⁴⁵<http://fr.wikipedia.org/wiki/ASN.1>

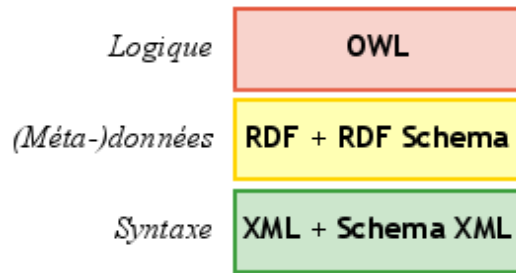


FIG. 1.11: Les langages de couche du Web Sémantique (<http://www.oxygen.lcs.mit.edu/images/SemanticWeb.jpg>).

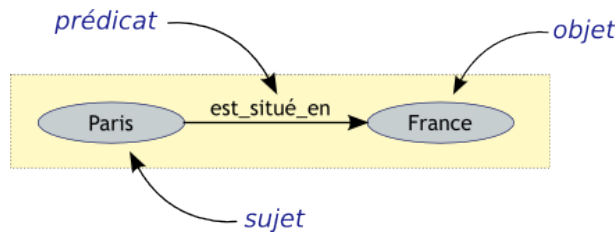


FIG. 1.12: Graphe sujet-prédicat-objet représentant un triplet RDF (http://www.clever-age.com/veille/clever-link/local/cache-vignettes/L436xH160/triplet_rdf-47921.png).

Un triplet est une déclaration RDF qui contient un sujet (ressource), un prédicat, et un objet. Le prédicat est la relation entre la ressource et l'objet, et l'objet peut être une autre ressource ou une valeur d'une donnée. La syntaxe communément utilisée pour spécifier RDF est RDF/XML, qui utilise XML pour structurer la représentation des ressources. La description des concepts et leurs relations (sous classe / super classe) est spécifiée séparément dans un format RDF spécialisé nommé RDF schéma (RDFS).

Chaque composant d'un triplet est identifié en utilisant un URI (Uniform Resource Identifier). Lorsque les ressources ont le même URI, elles sont supposées être la même entité. Une fois les triplets connectés ensemble, ils forment un graphe étiqueté et orienté.

RDFS fournit des éléments de base pour la définition d'ontologies ou des vocabulaires destinés à structurer des ressources RDF⁴⁶. `rdfs :Class` permet de déclarer une ressource RDF comme une classe pour d'autres ressources. `rdfs :subClassOf` permet de définir des hiérarchies de classes. RDFS précise la notion de propriété définie par RDF en permettant de donner un type ou une classe au sujet et à l'objet des triplets. Pour cela, RDFS ajoute les notions de "domain", correspondant au domaine de définition d'une fonction en anglais,

⁴⁶http://fr.wikipedia.org/wiki/RDF_Schema

et "range", son ensemble d'arrivée : `rdfs :domain` définit la classe des sujets liée à une propriété, `rdfs :range` définit la classe ou le type de données des valeurs de la propriété. Cependant, RDF(S) a plusieurs limites :

- Il ne permet pas d'exprimer que deux classes sont disjointes ;
- Il ne permet pas de définir une classe par la combinaison d'autres classes (intersection, union, etc.) ;
- Il ne permet pas de définir des restrictions sur le nombre d'occurrences de valeurs que peut prendre une propriété ;
- Il ne permet pas de définir certaines caractéristiques des propriétés : transitivité, propriété inverse, etc.

Il était donc nécessaire de développer un nouveau langage, OWL en l'occurrence, plus expressif et qui tient compte de ces limites.

OWL

OWL étend RDF en ajoutant plus de vocabulaire pour décrire les cardinalités et les égalités des classes et des propriétés. Une représentation de connaissances avancée suppose de pouvoir définir des assertions. Représenter une telle connaissance en OWL est basé sur les logiques de description, qui permettent d'inférer de nouvelles connaissances à partir de celles existantes. Trois niveaux de langages, d'expressivité décroissante, sont définis pour OWL : OWL FULL, OWL DL et OWL LITE. Depuis 2007 de nouvelles versions de OWL sont développées, à savoir OWL 1.1 et OWL 2.

1. **OWL FULL** : inclut toutes les primitives OWL qui peuvent être combinées avec toutes les primitives RDF et RDFS. Il a l'avantage de la compatibilité complète avec RDF/RDFS, mais l'inconvénient d'avoir un niveau d'expressivité qui le rend inexploitable par les algorithmes de raisonnement existants ;
2. **OWL DL** : définit des restrictions sur la manière dont les primitives OWL et RDF/RDFS peuvent être combinées. Ce niveau de langage est décidable. Il a l'inconvénient de ne pas être complètement compatible avec RDF. Un document RDF devra donc parfois être étendu sur certains aspects ou restreint sur d'autres pour être un document OWL DL valide. OWL DL est basé sur la logique de description SHOIN(D) ;
3. **OWL LITE** : c'est une version limitée de OWL DL qui facilite son utilisation et son implémentation. Par exemple, OWL Lite n'inclut pas la disjonction entre les classes et les cardinalités arbitraires. OWL LITE est basé sur la logique de description SHIQ(D) ;
4. **OWL 1.1**⁴⁷ : il étend OWL avec un sous ensemble de caractéristiques demandées par

⁴⁷<http://www.webont.org/owl/1.1/>

les utilisateurs, qui leur sont utiles, et pour lequel les algorithmes de raisonnement sont disponibles. Les nouvelles caractéristiques incluent, entre autres, de nouvelles propriétés et constructeurs de cardinalités qualifiées, le support de types de données étendus, une méta-modélisation simple, et des annotations étendues.

5. **OWL 2**⁴⁸ : Il est basé sur la logique de description SROIQ, et apporte plusieurs améliorations à la version OWL1.1 : restrictions de cardinalités qualifiées, expression de propriétés reflexives, irreflexives, asymétriques et disjointes, composition de propriétés, nouveaux types de données supportés, définition de profils (OWL 2 EL, OWL 2 QL, OWL 2 RL).

Langages de requêtes

Plusieurs langages ont été définis pour interroger les documents XML, RDF et OWL. Pour le langage de base XML, on peut citer XQL⁴⁹, XML-QL⁵⁰, XQUERY⁵¹, XPATH⁵². Le principe pour ces langages est d'exprimer un chemin qui indique comment on peut atteindre un noeud dans la structure arborescente d'un document XML. Idem pour les documents RDF, une panoplie de langages est définie, par exemple RQL⁵³, Squish-QL⁵⁴, RDQL⁵⁵, SPARQL⁵⁶. Il faut signaler que SPARQL est une recommandation W3C. Le langage SPARQL définit la syntaxe et la sémantique nécessaire à l'expression de requêtes sur une base de données de type RDF. SPARQL est bien adapté à la structure des graphes RDF. Ils s'appuient sur les triplets qui constituent ces graphes. D'autres extensions de SPARQL sont définies pour interroger des documents OWL DL, notamment SPARQL-DL [187] conçu pour interroger les documents OWL DL. Le langage OWL-QL⁵⁷ est également conçu pour interroger des documents OWL. Ici on s'intéresse plus au langage standard SPARQL, vu sa large utilisation dans la communauté du Web Sémantique.

L'exemple sur la figure 1.13⁵⁸ représente un extrait d'un document RDF utilisant l'ontologie FOAF⁵⁹ (utilisée pour décrire les personnes et les liens entre elles).

La figure 1.14⁶⁰ représente une requête SPARQL retournant une liste de photos avec

⁴⁸<http://www.w3.org/TR/owl2-profiles/>

⁴⁹<http://www.ibiblio.org/xql/xql-proposal.html>

⁵⁰<http://www.w3.org/TR/NOTE-xml-ql/>

⁵¹<http://www.w3.org/TR/xquery/>

⁵²<http://www.w3.org/TR/xpath>

⁵³<http://www.openrdf.org/doc/rql-tutorial.html>

⁵⁴<http://swordfish.rdfweb.org/rdfquery/>

⁵⁵<http://www.w3.org/Submission/2004/SUBM-RDQL-20040109/>

⁵⁶<http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

⁵⁷<http://ksl.stanford.edu/projects/owl-ql/>

⁵⁸<http://fr.wikipedia.org/wiki/SPARQL>

⁵⁹<http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF>

⁶⁰<http://fr.wikipedia.org/wiki/SPARQL>

```

<rdf:RDF xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:foaf="http://xmlns.com/foaf/0.1/"
  xmlns:rss="http://purl.org/rss/1.0/"
  xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/">
  <foaf:Person rdf:about="http://example.net/Paul_Dupont">
    <foaf:name>Paul Dupont</foaf:name>
    <foaf:img rdf:resource="http://example.net/Paul_Dupont.jpg"/>
    <foaf:knows rdf:resource="http://example.net/Pierre_Dumoulin"/>
  </foaf:Person>
  <foaf:Person rdf:about="http://example.net/Pierre_Dumoulin">
    <foaf:name>Pierre Dumoulin</foaf:name>
    <foaf:img rdf:resource="http://example.net/Pierre_Dumoulin.jpg"/>
  </foaf:Person>
  <foaf:Image rdf:about="http://example.net/Paul_Dupont.jpg">
    <dc:description>Photo d'identité de Paul Dupont</dc:description>
  </foaf:Image>
  <foaf:Image rdf:about="http://example.net/Pierre_Dumoulin.jpg">
    <dc:description>Photo d'identité de Pierre Dumoulin</dc:description>
  </foaf:Image>
</rdf:RDF>

```

FIG. 1.13: Un document RDF utilisant l'ontologie FOAF (<http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF>).

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX foaf: <http://xmlns.com/foaf/0.1/>
PREFIX dc: <http://purl.org/dc/elements/1.1/>
SELECT DISTINCT ?nom ?image ?description
WHERE {
  ?personne rdf:type foaf:Person .
  ?personne foaf:name ?nom .
  ?image rdf:type foaf:Image .
  ?personne foaf:img ?image .
  ?image dc:description ?description
}

```

FIG. 1.14: Un exemple de requête SPARQL (<http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF>).

le nom de la personne qu'elles représentent et une description. La ligne SELECT permet de sélectionner l'ensemble des tuples, ou lignes de variables (nom, image, description) correspondant aux contraintes exprimées dans la clause WHERE. La première ligne de la clause WHERE se lit : la variable *personne* est de type *Person* au sens de l'ontologie FOAF. La seconde ligne permet de définir la variable *nom* en tant que propriété *name* de la variable *personne*, etc.

Les résultats de la requête (figure 1.14) sont représentés sur la figure 1.15.

1.5.2 Outils de représentation de connaissances

Les langages du Web Sémantique ont des structures qui ne sont pas toujours faciles à comprendre. RDF et OWL, sont particulièrement “bavards”, si bien que plusieurs outils d'édition pour générer automatiquement des connaissances en RDF/OWL ont été développés. Ces outils offrent plusieurs possibilités aux utilisateurs de la communauté “repré-

```

<sparql xmlns="http://www.w3.org/2005/sparql-results#">
  <head>
    <variable name="nom"/>
    <variable name="image"/>
    <variable name="description"/>
  </head>
  <results ordered="false" distinct="true">
    <result>
      <binding name="nom">
        <literal>Pierre Dumoulin</literal>
      </binding>
      <binding name="image">
        <uri>http://example.net/Pierre_Dumoulin.jpg</uri>
      </binding>
      <binding name="description">
        <literal>Photo d'identité de Pierre Dumoulin</literal>
      </binding>
    </result>
    <result>
      <binding name="nom">
        <literal>Paul Dupont</literal>
      </binding>
      <binding name="image">
        <uri>http://example.net/Paul_Dupont.jpg</uri>
      </binding>
      <binding name="description">
        <literal>Photo d'identité de Paul Dupont</literal>
      </binding>
    </result>
  </results>
</sparql>

```

FIG. 1.15: Résultats SPARQL (<http://fr.wikipedia.org/wiki/FOAF>).

tation des connaissances” dans le cadre du Web Sémantique. Ils permettent, entre autres, ce qui suit :

- Offrir des interfaces conviviales et faciles d’utilisation permettant d’entrer les concepts, les propriétés, les annotations et les assertions d’une ontologie ;
- Visualiser la hiérarchie des concepts et les relations entr’eux ;
- Exploiter facilement des outils de classification pour vérifier la cohérence de l’ontologie, inférer de nouvelles hiérarchies et de nouvelles connaissances ;
- Générer des documents RDF/OWL.

Une longue liste de ces outils peut être consultée sur le lien suivant : <http://esw.w3.org/topic/SemanticWebTools>. Nous nous intéressons ici à deux outils qui sont largement utilisés pour la représentation des ontologies : Protégé et SWOOP.

Protégé

Protégé⁶¹ est un logiciel d’utilisation libre (open source) pour l’édition des ontologies. Il supporte deux paradigmes de modélisation : les Frames et OWL. Les ontologies éditées sous Protégé peuvent être exportées en OWL, en RDF(S), etc. C’est un logiciel développé

⁶¹<http://protege.stanford.edu/>

en Java et qui peut être étendu pour y intégrer d'autres plugins. Protégé est largement utilisé dans la communauté des ontologies, et dans différents domaines, entre autres, la biomédecine.

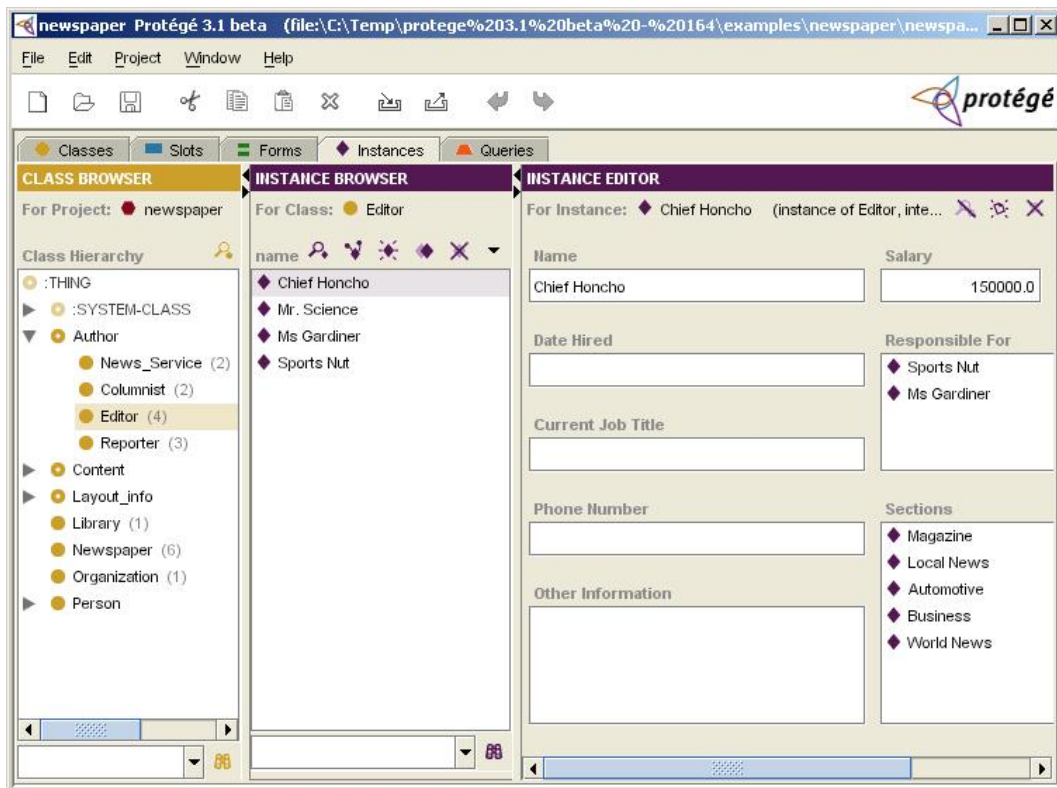


FIG. 1.16: Protégé Frames (<http://protege.stanford.edu/images/instances-tab.jpg>).

L'éditeur Protégé-Frames (figure 1.16) fournit une interface complète pour aider les utilisateurs à construire et sauvegarder des ontologies basées sur des frames. Protégé-Frames implémente un modèle de connaissances compatible avec le protocole OKBC (Open Knowledge Base Connectivity protocol). Dans ce modèle, une ontologie consiste en un ensemble de classes organisées dans une hiérarchie de subsumption représentant les concepts d'un domaine, un ensemble de slots associés aux classes pour décrire leurs relations et propriétés, et enfin un ensemble d'instances de classes ; ce sont des instances de concepts qui prennent des valeurs spécifiques de leurs propriétés. Protégé-Frames fournit un grand ensemble d'éléments d'interface qui peuvent être personnalisés, afin de permettre aux utilisateurs de modéliser les connaissances et d'entrer des données dans des formes qui leur sont familières. Il inclut également des architectures de plugin qui peuvent être étendues pour différents

objectifs, et il offre une API (Application Programming Interface) permettant à d'autres programmes d'exploiter ses fonctions.

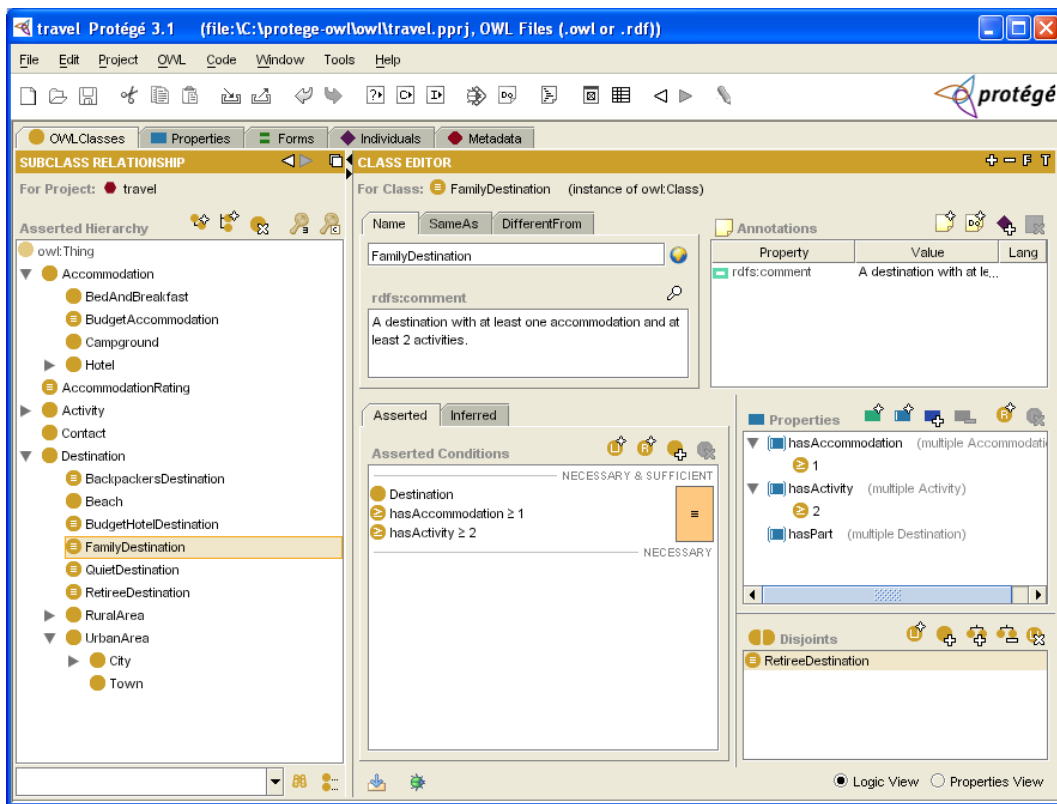


FIG. 1.17: Protégé OWL (<http://protege.stanford.edu/plugins/owl/images/OWL\discretionary{-}{-}{-}Classes-FamilyDestination.png>).

L'éditeur Protégé-OWL (figure 1.17) est une extension de Protégé pour supporter le langage OWL. Une ontologie OWL consiste en des descriptions de classes, de propriétés et de leurs instances. La sémantique formelle de OWL spécifie comment on peut déduire ses conséquences logiques, c'est-à-dire de nouveaux faits qui ne sont pas présents explicitement dans l'ontologie, mais potentiellement inférés en utilisant la sémantique des axiomes. Ces inférences peuvent être basées sur un seul document ou plusieurs documents distribués combinés en utilisant les mécanismes de OWL. Protégé-OWL permet aux utilisateurs de charger/créer des ontologies OWL/RDF ; d'éditer et de visualiser les classes, les propriétés, ainsi que les règles SWRL ; de définir les caractéristiques logiques des classes comme des expressions OWL ; d'exécuter des classifieurs en logiques de description, etc. L'architecture de Protégé-OWL est flexible et permet une configuration et des extensions faciles.

SWOOP

Même si Protégé est largement utilisé dans la communauté des ontologies et du Web Sémantique, d'autres éditeurs existent comme SWOOP⁶² (figure 1.18).

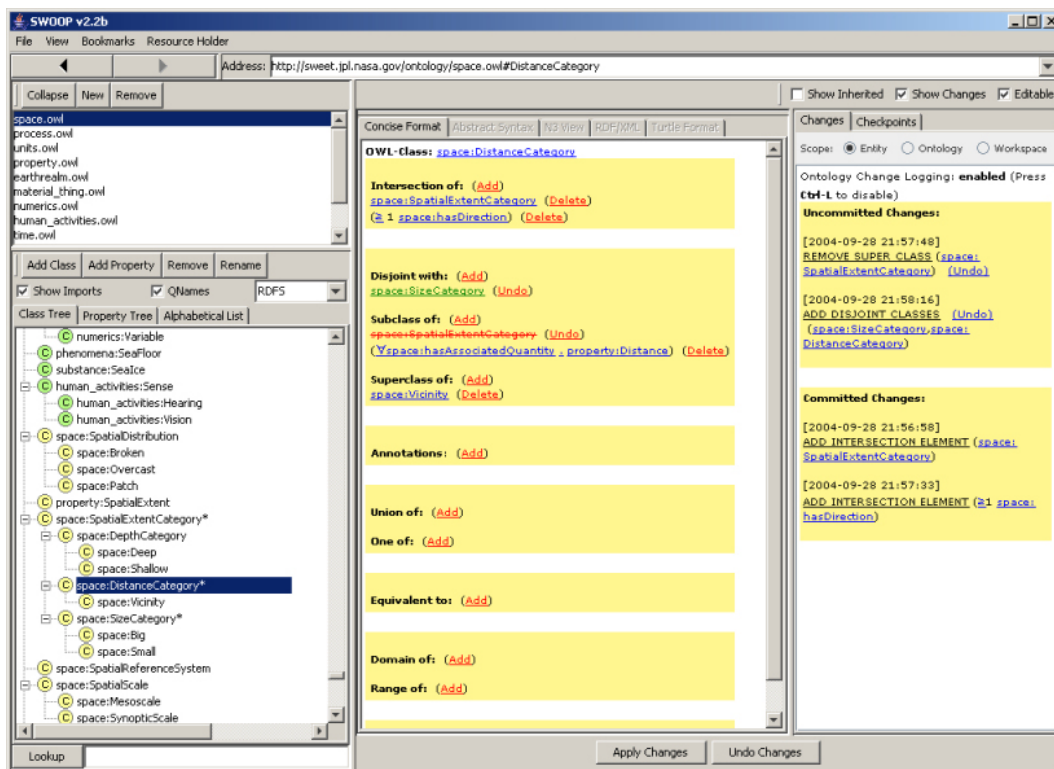


FIG. 1.18: L'éditeur SWOOP (<http://www.mindswap.org/2004/SWOOP/>).

Les caractéristiques de SWOOP sont les suivantes :

- Il permet une navigation entre les entités de l'ontologie via des liens hypertextes, le chargement d'une ontologie à partir de son URI, etc. Il joue en quelque sorte le rôle d'un navigateur Web ;
- L'édition de l'ontologie se fait en ligne via un moteur HTML, et les changements dans l'ontologie sont signalés par des couleurs et des styles de police différents ;
- Il utilise l'API OWL de Manchester⁶³ ;
- Il supporte la mise en correspondance, la comparaison et le parcours de plusieurs ontologies, etc.

⁶²<http://www.mindswap.org/2004/SWOOP/>

⁶³<http://owlapi.sourceforge.net/>

L'architecture de SWOOP est détaillée sur le schéma de la figure 1.19.

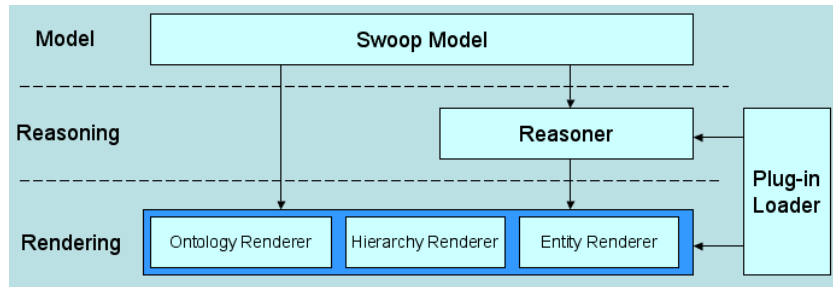


FIG. 1.19: L'architecture de SWOOP (<http://www.mindswap.org/2004/SWOOP/>).

1.5.3 Raisonneurs des logiques de description

Il n'est pas possible de dissocier la représentation de connaissances du raisonnement. De la même manière que des outils ont été développés pour la représentation de connaissances dans le cadre du Web Sémantique, d'autres outils sont développés spécifiquement pour raisonner sur ces connaissances. Ces raisonneurs ou classifieurs sont majoritairement basés sur les logiques de description. Une liste des principaux raisonneurs développés pour le Web Sémantique peut être consultée sur le lien suivant : <http://www.cs.man.ac.uk/~sattler/reasoners.html>. Les raisonneurs les plus utilisés dans la communauté du Web Sémantique sont : RacerPro⁶⁴, Pellet⁶⁵, KAON2⁶⁶, et FaCT++⁶⁷. RacerPro est un logiciel commercial, avec tout de même une licence pour une utilisation libre dans le monde de la recherche. C'est un raisonneur DL avec des types de données simples, c'est-à-dire un raisonneur pour OWL DL avec des restrictions de cardinalité qualifiées numériques sur les rôles. Il implémente l'algorithme des tableaux et supporte l'API de OWL, c'est-à-dire qu'il offre une interface qui permet de faire appel aux fonctions définies dans l'API de OWL pour accéder au contenu d'une ontologie OWL. Pellet est un raisonneur d'utilisation libre, codé en Java et développé pour la logique *SR_QIQ* avec des types de données simples ; il accepte des ontologie OWL 2. Il implémente également l'algorithme des tableaux et supporte l'API OWL. FaCT++ est un raisonneur d'utilisation libre, codé en C++, développé pour la logique *SR_QIQ*. Il implémente lui aussi l'algorithme des tableaux, et supporte l'API OWL. KAON2 est un raisonneur d'utilisation libre, codé en Java, écrit pour la logique *SHIQ* (OWL Lite) et étendu avec des règles SWRL DL-safe. Il est basé, contrairement

⁶⁴<http://www.racer-systems.com/>

⁶⁵<http://pellet.owldl.com/>

⁶⁶<http://kaon2.semanticweb.org/>

⁶⁷<http://owl.man.ac.uk/factplusplus/>

aux autres, sur le principe de la résolution. Il transforme une base de connaissances OWL en un programme datalog disjonctif en suivant les étapes représentées sur la figure 1.20.

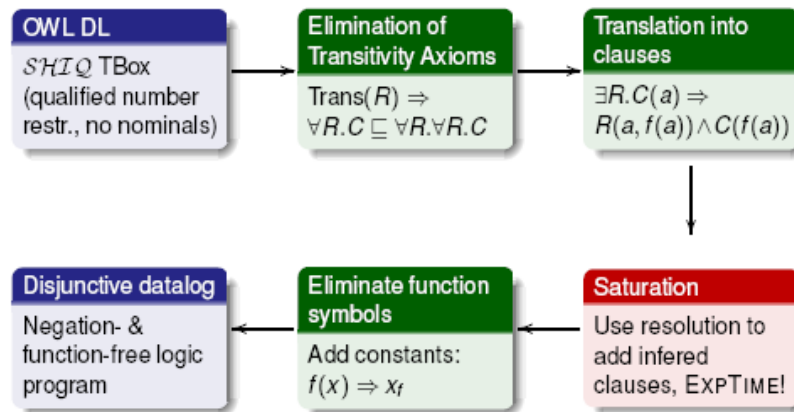


FIG. 1.20: Transformation de de connaissances représentées en OWL en un programme datalog disjonctif, effectué par KAON2 (http://km.aifb.uni-karlsruhe.de/ws/prowl2006/prowl06_4on1.pdf).

D'autres raisonneurs sont en cours de développement, tenant compte d'autres types de représentation de connaissances, telles que les représentations floues ou probabilistes [197, 194, 196, 37, 195].

1.6 Le Web Sémantique dans le domaine biomédical

L'une des communautés à qui peut profiter largement le Web Sémantique est la communauté biomédicale. En effet, de nos jours il existe dans le Web une grande quantité de sources d'information biomédicales [114]. Rendre ces ressources disponibles de manière plus structurée est l'un des objectifs du grand effort consacré au développement des ontologies à grande échelle. Par exemple, une collection de métadonnées définies pour une base d'images IRM, décrivant leurs caractéristiques (contexte d'obtention, contenu, etc), pourrait aider une recherche automatique des images pertinentes dans un contexte spécifique. Si cette base est distribuée sur plusieurs sites (plusieurs centres de recherche par exemple), alors chaque site fournit ses propres métadonnées associées aux images en respectant le vocabulaire exprimé dans leur ontologie commune, et une recherche multi-sites d'images devient possible et automatique [203]. Un autre exemple de l'intérêt des technologies du Web Sémantique dans le domaine biomédical est la recherche d'articles scientifiques [69],

tel que c'est le cas de PubMed⁶⁸, un service Web de la librairie nationale américaine de la médecine (U.S. National Library of Medicine) qui inclut plus de 18 millions de citations de MEDLINE⁶⁹; une base de données bibliographiques qui couvre tous les domaines médicaux de l'année 1966 à nos jours, et d'autres journaux du domaine des sciences de la vie. PubMed inclut aussi des liens vers des textes complets d'articles et d'autres ressources.

Dans [177] les auteurs ont énuméré un certain nombre d'éléments qui montrent en quoi le Web Sémantique peut aider la recherche biomédicale :

- L'utilisation des URIs permet de mieux gérer et de mieux exploiter les identifiants des entités biomédicales, qui prolifèrent de manière rapide sur internet ;
- RDF(S) et OWL offrent des potentialités qui simplifient la gestion et la compréhension des relations (propriétés) complexes et évoluant rapidement, dont on a besoin pour décrire les informations dans le domaine de la santé et des sciences du vivant. Ces potentialités supposent des définition explicites et formelles des relations et de leurs caractéristiques, et la spécification explicite des types des entités qu'elles relient ;
- Les structures des ontologies RDF(S) et OWL aident les utilisateurs à mieux comprendre le domaine étudié ;
- RDF(S) et OWL sont des langages flexibles, qu'on peut étendre, et qui sont décentralisés, ils supportent des relations hiérarchiques facilitant la création de sous classes et sous propriétés qui sont essentielles pour la gestion et l'intégration de données complexes en santé ;
- La définition de nouveaux schémas peut réutiliser d'autres classes et propriétés qui se réfèrent à des données quelque part sur le Web, sans avoir à les copier ni à avoir les données en local. Lorsque différents schémas ont des classes ou propriétés décrivant les mêmes types de données et relations, on peut rajouter des déclarations formelles pour exprimer qu'elles désignent la même chose ;
- La possibilité d'étendre facilement le travail des autres rend utile le développement des ontologies qui peuvent être partagées entre plusieurs domaines ;
- Les raisonneurs développés dans le cadre du Web Sémantique offrent des possibilités qui n'existaient pas auparavant, par conséquent les inférences, les classifications et la vérification de cohérence des connaissances biomédicales deviennent possibles.

Chacune de ces fonctionnalités a un intérêt pour le domaine de la santé et des sciences du vivant. Par exemple, la vérification de cohérence offerte par les raisonneurs OWL peut aider à s'assurer que les schémas, les ontologies et les données ne contiennent pas de contradictions ou des déclarations mal formées. Ces erreurs sont très fréquentes, vu leur grand nombre, et l'être humain ne peut matériellement les détecter. Quand de telles erreurs sont présentes dans les données dédiées à la recherche, elles peuvent amener à des erreurs

⁶⁸<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>

⁶⁹<http://www.caducee.net/asp/medline.asp>

d'évaluation et un manque de précision par exemple, et lorsqu'elles sont présentes dans des données médicales elles mènent à des diagnostics et des traitements inappropriés.

A l'avenir, l'utilisation des technologies du Web Sémantique va certainement améliorer la productivité de la recherche, elle améliorera aussi la qualité des soins et permettra aux scientifiques de formuler de nouvelles hypothèses pour la recherche basées sur les expérimentations cliniques. Ces motivations ont conduit le W3C à créer le groupe HCLSIG (Semantic Web Health Care and Life Sciences Interest Group), qui est chargé d'explorer et de supporter l'utilisation des technologies du Web Sémantique pour améliorer la collaboration, la recherche et développement, et l'innovation dans le domaine de la santé et les sciences du vivant. En effet, la communauté "HCLS" se trouve en face de problèmes majeurs d'intégration de données médicales des patients, d'approbation des nouveaux médicaments, etc. Cette communauté a besoin d'un lieu neutre pour discuter des problèmes techniques, et d'un contact plus direct avec la communauté du Web Sémantique. Le HCLSIG joue alors ce rôle, et pour plus d'efficacité il a été divisé en plusieurs sous groupes de travail pour se concentrer sur les différents problèmes. Le HCLSIG publie des notes et des articles sur les différents sujets, développe des stratégies de communication vers l'industrie en organisant des conférences et des rencontres industrielles, et il offre aussi un forum de discussion pour les experts.

Le travail de cette thèse s'inscrit clairement dans le cadre du Web Sémantique biomédical. D'une part, l'anatomie du cerveau joue un rôle important en neurosciences. Modéliser les connaissances neuroanatomiques sous forme d'une ontologie représentée avec un langage formel, qui permet, en plus, de les diffuser à grande échelle est donc un enjeu important. D'autre part, l'utilisation de ces connaissances ainsi que des langages du Web Sémantique pour l'annotation des images du cerveau, distribuées sur plusieurs sites, faciliterait leur gestion et leur intégration.

Le chapitre 2 présente l'anatomie du cerveau, les difficultés inhérentes à sa modélisation, un état de l'art des principales réalisations sur sa modélisation, ainsi que les limites de chacune de ces réalisations, notamment par rapport aux nouveaux besoins de la recherche en terme de partage de connaissances et de données expérimentales.

Chapitre 2

Modélisation de l'anatomie sulco-gyrale

Nous nous intéressons dans cette thèse à l'anatomie du cerveau, sa modélisation et sa représentation. En effet, l'anatomie joue un rôle important dans différents contextes. Par exemple, pour un neurochirurgien, l'anatomie sert comme repère lors des interventions chirurgicales, afin d'éviter de léser des zones fonctionnelles proches d'une tumeur. L'anatomie du cerveau a été étudiée pendant plusieurs dizaines d'années, essentiellement sur des cadavres [152] après extraction du cerveau. Une documentation assez riche est donc disponible sur l'anatomie du cerveau [152, 201]. Cependant, l'assistance informatique dont bénéficient les cliniciens aujourd'hui (en chirurgie par exemple) nécessite une prise en compte de la connaissance anatomique au niveau des systèmes et des applications informatiques. Par conséquent, une représentation informatique et formelle de la connaissance anatomique du cerveau devient indispensable, avec les défis que cela présente, notamment celui relatif à la gestion de la variabilité inter-individuelle qui caractérise l'anatomie du cerveau.

L'anatomie du cortex cérébral de l'être humain décrit l'organisation du cerveau au niveau des gyri et sillons [54]. La modélisation et la représentation de cette anatomie peut aider sa compréhension et surtout peut servir comme support pour les applications en neuroimagerie. Dans la section 2.1 nous faisons un rappel sur l'anatomie du cerveau, et l'anatomie sulco-gyrale en particulier ; dans la section 2.2 nous présentons les réalisations, aussi bien basées image que basées concept, les plus importantes sur la modélisation de l'anatomie sulco-gyrale. Enfin, dans la section 2.2.3 nous discutons les différentes réalisations et nous mettons en évidence les limites de chacune vis-à-vis des nouveaux besoins de la recherche translationnelle.

2.1 Rappels sur l'anatomie

Le cerveau est situé dans la cavité crânienne, c'est l'une des trois parties composant l'encéphale, la plus volumineuse, la plus complexe, et c'est le siège des facultés intellectuelles¹. Il est relié entre autres au tronc cérébral, à la moelle épinière et au cervelet [53]. Sa masse moyenne, bien que très variable, est d'environ 1300 g. Il est constitué de deux substances : la matière grise et la matière blanche. C'est la répartition hétérogène des neurones qui explique la différence de coloration dans le cerveau. En effet, c'est dans la substance grise que se concentrent les corps cellulaires des cellules nerveuses, qui, avec la glie constituent le cortex cérébral. C'est dans le cerveau que s'intègrent les grandes fonctions motrices, associatives et sensitives chez l'être humain.

Le cerveau baigne dans ce qu'on appelle le liquide céphalo-rachidien ou encore liquide cérébro-spinal.

Le cortex cérébral constitue la surface externe des deux hémisphères du cerveau, droit

¹<http://www.vulgaris-medical.com/encyclopedia/cerveau-980.html>

et gauche, globalement symétriques et réunis par le corps calleux, composé de fibres. Cette surface est extrêmement plissée. Différentes interprétations ont été données à ces plis. Certains auteurs disent [211] qu'ils sont dus aux tensions internes causées par les fibres nerveuses lors du développement, d'autres disent que c'est un moyen d'enfermer une grande surface dans un volume réduit. Les figures 2.1, 2.2 et 2.3 représentent, respectivement, une vue latérale, supérieure et sagittale du cerveau, où l'on peut constater ces plissures.

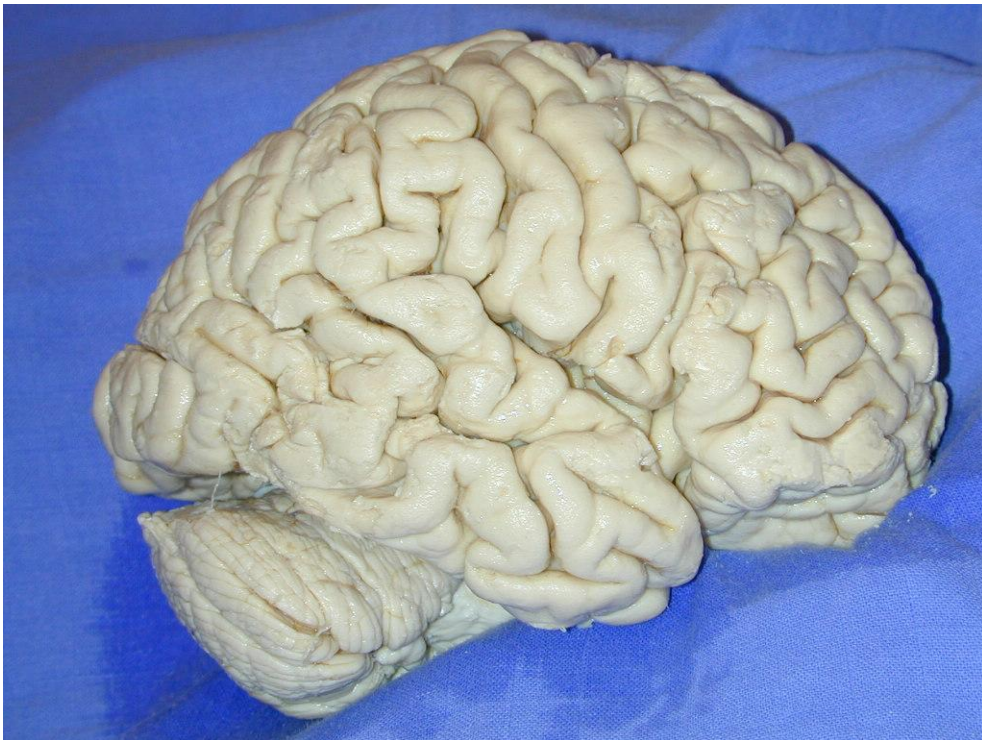


FIG. 2.1: Vue latérale d'un cerveau.

2.1.1 Définitions des concepts reliés au cortex cérébral

Structures corticales

Les structures les plus importantes du cortex cérébral sont : les sillons [152], les lobes et les gyri.

Sillons Ce sont les parties enfouies (figure 2.2) dues aux plissures du cortex. Les sillons sont relativement profonds. Ces plis sont donc appelés *sillons* ou *sulci* en anglais.



FIG. 2.2: Vue supérieure d'un cerveau. On distingue les deux hémisphères globalement symétriques.

Certains sillons sont des repères relativement constants d'un individu à l'autre, et presque symétriques entre les deux hémisphères cérébraux. Cette pseudo-ressemblance inter-individuelle des sillons fonde l'anatomie sulco-gyrale [152, 93, 141, 217].

Lobes Il y a cinq lobes qui constituent le cerveau humain : le lobe frontal, le lobe limbique, le lobe occipital, le lobe pariétal et le lobe temporal. Les frontières de ces lobes sont soit des sillons profonds ou des séparations fictives ou conventionnelles. La figure 2.4 montre les différents lobes.

On distingue clairement quatre lobes externes et un lobe interne, le lobe limbique en l'occurrence. D'autres considèrent qu'il y a deux lobes internes : le lobe limbique et l'insula, située au fond du sillon latéral², donc cachée entre le lobe temporal et les deux lobes situés au dessus, les lobes frontal et pariétal. C'est le fait qu'il soit proche du lobe limbique qui amène certains auteurs à considérer l'insula comme partie intégrante du lobe limbique.

²[http://fr.wikipedia.org/wiki/Lobe_\(cerveau\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Lobe_(cerveau))



FIG. 2.3: Coupe sagittale du cerveau passant par le plan inter-hémisphérique.

Gyri Ce sont les circonvolutions convexes entre les sillons qu'on appelle *gyri* (figure 2.2). Un gyrus partiellement interrompu par de petits sillons donne des *pars de gyrus*. Puisque les gyri sont définis par les sillons qui les bordent, et que ces derniers sont variables d'un individu à l'autre, alors les gyri sont également variables d'un individu à l'autre.

Pli de passage L'interruption d'un sillon correspond à l'émergence à la surface d'un pont de substance blanche dénommé usuellement *pli de passage* par les anatomistes.

Opercule Le terme opercule (du latin operculum signifiant couvercle), désigne une structure anatomique qui en recouvre une autre.

Composition

La matière cérébrale est composée principalement de neurones et de cellules gliales.

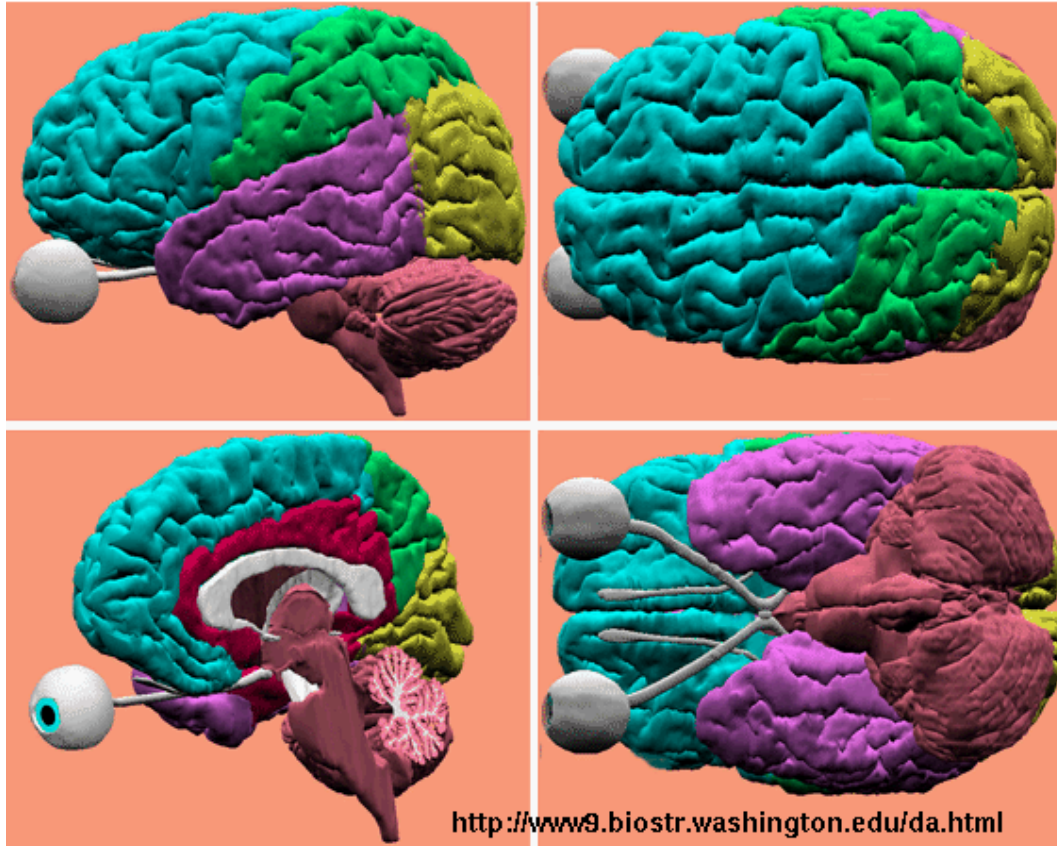


FIG. 2.4: Décomposition du cortex cérébral en cinq lobes : lobe frontal (bleu), lobe temporal (violet), lobe pariétal (vert), lobe occipital (jaune) et lobe limbique (rouge) [53].

Neurones Un *neurone* est une cellule du système nerveux spécialisée dans la communication et le traitement d'informations³. Chaque neurone est composé d'un corps cellulaire comportant un noyau, ainsi que deux types de ramifications : les dendrites (entrées) et un axone (sortie des informations). Axones et dendrites de neurones différents entrent en contact via des structures spécialisées : les synapses.

La figure 2.5 montre un schéma typique d'un neurone.

Cellules gliales Les cellules gliales sont beaucoup plus nombreuses que les neurones, elles peuvent se reproduire par mitose. Elles jouent un rôle primordial en assurant l'isolement des tissus nerveux, les fonctions métaboliques, le soutien squelettique et la protection

³http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/vie/d/neurone_209/

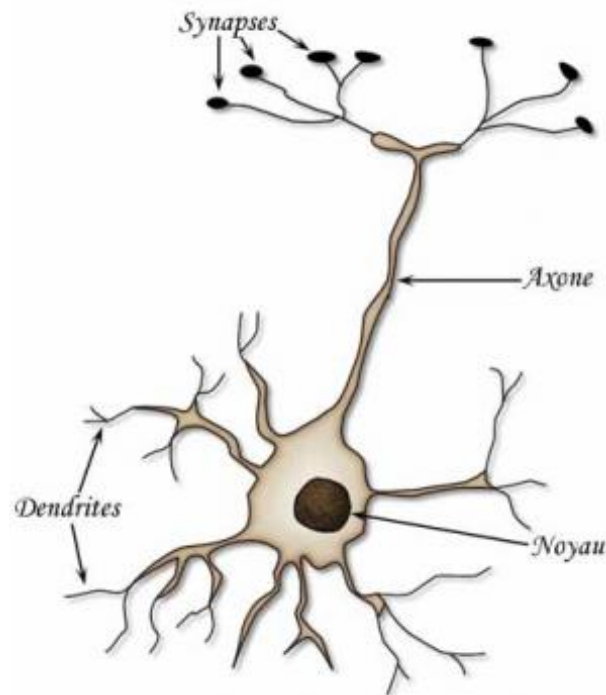


FIG. 2.5: Représentation schématique d'un neurone (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Neurone>).

vis-à-vis des corps étrangers en cas de lésions. Les cellules gliales jouent également un rôle actif dans la transmission de l'influx nerveux.

Matière grise et matière blanche Si on effectue une coupe axiale d'un cerveau on peut observer deux couches distinctes (figure 2.6). La couche superficielle est d'une couleur un peu foncée, c'est la *matière grise*, et l'autre couche, qui est profonde, est d'une couleur plus claire, c'est la substance blanche ou la *matière blanche*.

On observe également la présence de matière grise sur des structures profondes telles que le thalamus et le noyau caudé. Cette distinction de substance est due à la répartition hétérogène des neurones dans le cerveau. En fait, les corps cellulaires des neurones sont situés majoritairement dans la couche superficielle de substance grise, ils constituent le cortex cérébral. Par contre, la substance blanche est constituée essentiellement des fibres nerveuses. La matière grise constitue le cœur du traitement de l'information nerveuse, tandis que la substance blanche est constituée des fibres nerveuses (axones principalement)



FIG. 2.6: Une coupe axiale du cerveau montrant les deux couches correspondant à la matière grise et la matière blanche.

assurant la transmission des messages nerveux entre les neurones⁴.

Faisceau de fibres C'est un rassemblement de fibres nerveuses, associées en faisceau et empruntant le même trajet. Par exemple, le corps calleux est une commissure, un faisceau de fibres nerveuses reliant les deux hémisphères du cerveau, et assurant le transfert d'informations entre ceux-ci. En effet, il y a une grande densité des connexions qui composent la substance blanche.

La figure 2.7 montre des faisceaux de fibres construits à partir de données obtenues en IRM de diffusion.

⁴http://fr.wikipedia.org/wiki/Substance_grise

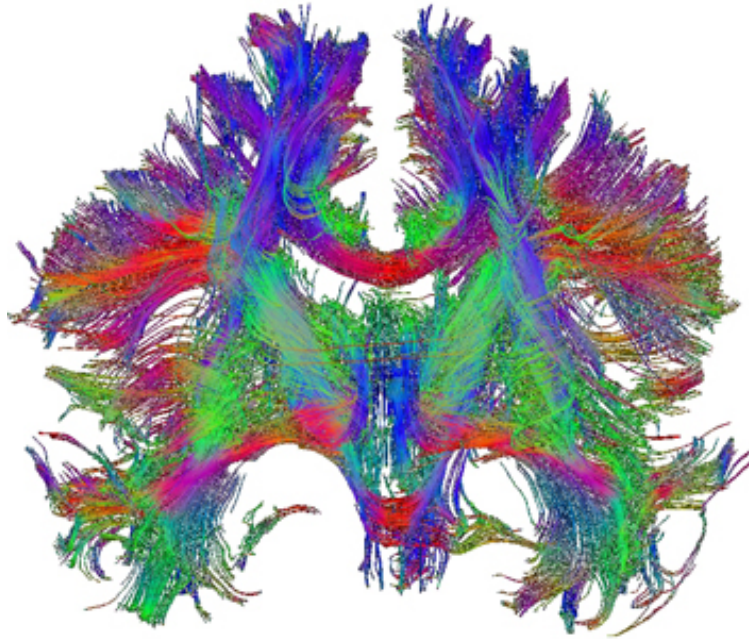


FIG. 2.7: Faisceaux de fibres obtenus à partir de données d'IRM de diffusion (http://www.biomed.ee.ethz.ch/research/bioimaging/brain/diffusion_fiber_tracking).

Tumeurs du cerveau

Ce sont des proliférations de cellules nerveuses, gliales, endothéliales, dans le cerveau et dans la moelle épinière⁵. Il s'agit, soit de tumeurs primaires qui naissent dans le cerveau, ou de métastases d'autres tumeurs. Il existe plusieurs variétés de tumeurs, mais les gliomes en représentent presque la moitié. Ces derniers peuvent être de faible ou forte malignité, quantifiées avec différents grades. Les symptômes d'une tumeur varient selon la localisation de cette dernière. Une tumeur en général se développe aux dépens des différentes structures comprises dans la boîte crânienne (méninges, vaisseaux, parenchyme cérébral, plexus choroïdes, parois des ventricules et nerfs crâniens).

Une tumeur, lorsqu'elle est de taille importante, peut décaler et déformer considérablement l'anatomie du cerveau. C'est le cas par exemple de la tumeur présentée sur la figure 2.8.

⁵<http://gfme.free.fr/maladie/tumeur.html>

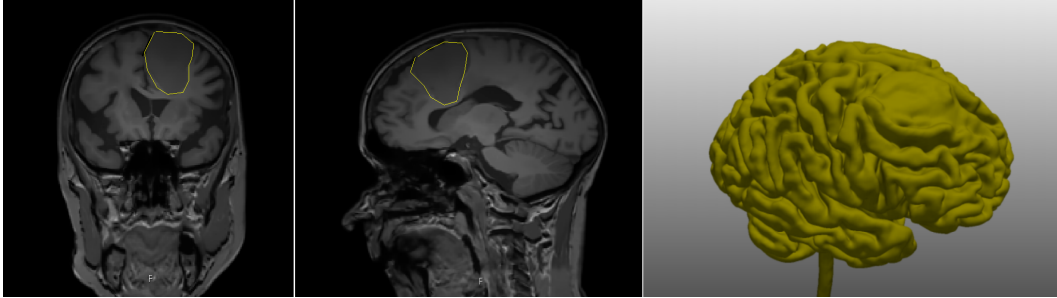


FIG. 2.8: Impact d'une tumeur sur l'anatomie du cerveau.

2.1.2 Imagerie et anatomie

L'imagerie médicale a bénéficié de progrès technologiques spectaculaires : tomodensitométrie (CT-scan), angiographie numérisée, IRM etc. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), qui est sûrement l'une des grandes innovations dans le domaine de l'imagerie médicale au cours des dernières décennies. Apparue au début des années 80, elle permet l'acquisition de vues 2D ou 3D du corps, notamment du cerveau. C'est une technique basée sur le principe de la résonance magnétique nucléaire, et qui a l'avantage de ne pas être invasive (elle n'utilise pas de radiations ionisantes), contrairement à d'autres techniques d'imagerie comme la TEP (Tomographie à émission de positons) ou encore le CT-scan. Ceci fait de l'IRM un outil privilégié pour la recherche biomédicale, et plus particulièrement pour les neurosciences. Dans les années 90, la technique de l'IRM fonctionnelle a été mise au point, elle permet la mesure des activités fonctionnelles des différentes zones du cerveau. D'autres types d'IRM existent tels que l'IRM de diffusion qui permet d'imager les phénomènes de diffusion des molécules d'eau, dont on arrive à déduire l'orientation des principaux faisceaux de fibres.

La figure 2.9⁶ montre une machine IRM 3 Tesla de Philips. La machine IRM peut avoir différentes géométries selon le constructeur. Dans les machines IRM fermées on dispose d'un tunnel, dont le diamètre est d'environ 60 cm, où est introduit le patient. L'élément le plus important est bien évidemment l'aimant. Il produit un champ magnétique principal, constant et de forte intensité. En imagerie médicale les valeurs des champs magnétiques utilisés varient entre 0.1 et 3 Tesla, avec néanmoins des intensités qui peuvent aller jusqu'à 17 Tesla pour des études sur des animaux. Dans des études cliniques chez l'homme, on peut aller jusqu'à une intensité de 11.7 Tesla.

Au cours d'un examen IRM on mesure l'aimantation résultante en chaque point des tissus analysés. Comme cette aimantation est proportionnelle à la quantité de noyaux d'hydrogène présents, et que les tissus se distinguent par leur contenu en eau, la carte des

⁶http://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie_par_r3%A9sonance_magn%C3%A9tique



FIG. 2.9: Une IRM 3-Tesla (http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Modern_3T_MRI.JPG).

aimantations résultantes reproduit l'anatomie des tissus⁷. Ce qui est mesuré plus précisément est la relaxation de cette aimantation après le phénomène de résonance magnétique. Les caractéristiques temporelles de cette relaxation dépendent fortement de l'état des tissus. Selon le réglage de la même machine IRM on peut obtenir différents types d'images correspondant à différents types de signal local (par exemple : images pondérées en T1 ; souvent utilisées pour l'anatomie (figure 2.8), images pondérées en T2* ; images fonctionnelles, où T1, T2, T2* sont les paramètres de relaxation). En revanche l'IRM ne permet pas l'étude des tissus durs ni donc la recherche de fractures où seul l'oedème péri-lésionnel pourra être observé.

L'IRM est d'une extrême importance aussi bien pour les cliniciens que pour les chercheurs. Elle permet par exemple à un neurochirurgien de localiser précisément la pathologie et son environnement, de suivre son évolution au cours du temps et le cas échéant préparer une intervention chirurgicale sur le cerveau. Pour les chercheurs, également, l'IRM est d'une grande importance. En effet, cette modalité d'imagerie permet de mesurer les valeurs pour certains paramètres biologiques dans un volume donné dans le cerveau. Les biomarqueurs sont définis comme des paramètres biologiques mesurables et quantifiables, servant en tant qu'indices d'évaluation en physiologie et en santé, tels que le risque de développer une affection, un désordre psychiatrique, des facteurs d'environnement et leurs effets, le diagnostic d'une maladie, un processus métabolique, l'abus d'une substance, etc. [153].

⁷<http://www.inrp.fr/Acces/biotic/neuro/techniques/imagerie/html/IRM.htm>

Traitements classiques effectués sur les images médicales

Si les nouvelles machines d'acquisition d'images nous permettent d'avoir des volumes 2D et 3D contenant des informations importantes, ces dernières ne peuvent pas être réellement exploitées sans des traitements informatiques automatisés qui permettent de mieux visualiser les volumes, de segmenter et quantifier les différents sous ensembles des volumes etc. De très nombreux traitements peuvent être effectués sur des images médicales, toutefois les plus fréquents sont la segmentation et le recalage.

Segmentation En imagerie, la segmentation est la division d'une image en zones homogènes afin de séparer les différents composants visibles et de les identifier. Les techniques de segmentation sont l'application des méthodes de classification développées en mathématiques et en statistiques, telles que le seuillage [157, 134]⁸, le clustering (k-means [126, 94, 41], fuzzy C-means [67, 108]), les contours actifs (snakes [110] & GVF [215]), le "region growing" [156], etc.

Recalage En traitement d'images, le recalage⁹ est une technique qui consiste en la mise en correspondance d'images, ceci afin de pouvoir comparer ou combiner leurs informations respectives. Cette mise en correspondance se fait par la recherche d'une transformation géométrique permettant de passer d'une image à une autre. Cette technique comprend de nombreuses applications allant de l'imagerie médicale, afin par exemple de fusionner plusieurs modalités d'imagerie, au traitement de vidéos comme le suivi de mouvement et la compression, ou encore la création de mosaïques d'images (panoramas). Une transformation géométrique peut être linéaire ou non linéaire. La transformation linéaire s'écrit sous forme d'un polynôme de degré 1. Les transformations rigides telles que la rotation et la translation, les transformations affines¹⁰, etc. sont des transformations linéaires. Les transformations non linéaires s'écrivent sous forme d'un polynôme d'ordre supérieur à 1, ce sont des transformations non rigides. En imagerie, ces transformations sont souvent représentées sous forme de champs de déformation.

2.1.3 Anatomie sulco-gyrale

Nous nous intéressons dans notre étude à l'anatomie sulco-gyrale, c'est-à-dire l'anatomie concernant les sillons et les gyri du cortex cérébral. Plus précisément, nous nous intéressons à sa modélisation et surtout à sa représentation en s'appuyant sur les langages du Web Sémantique, dont on a dit l'importance.

⁸<http://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/0130307963>

⁹<http://fr.wikipedia.org/wiki/Recalage>

¹⁰http://fr.wikipedia.org/wiki/Application_affine

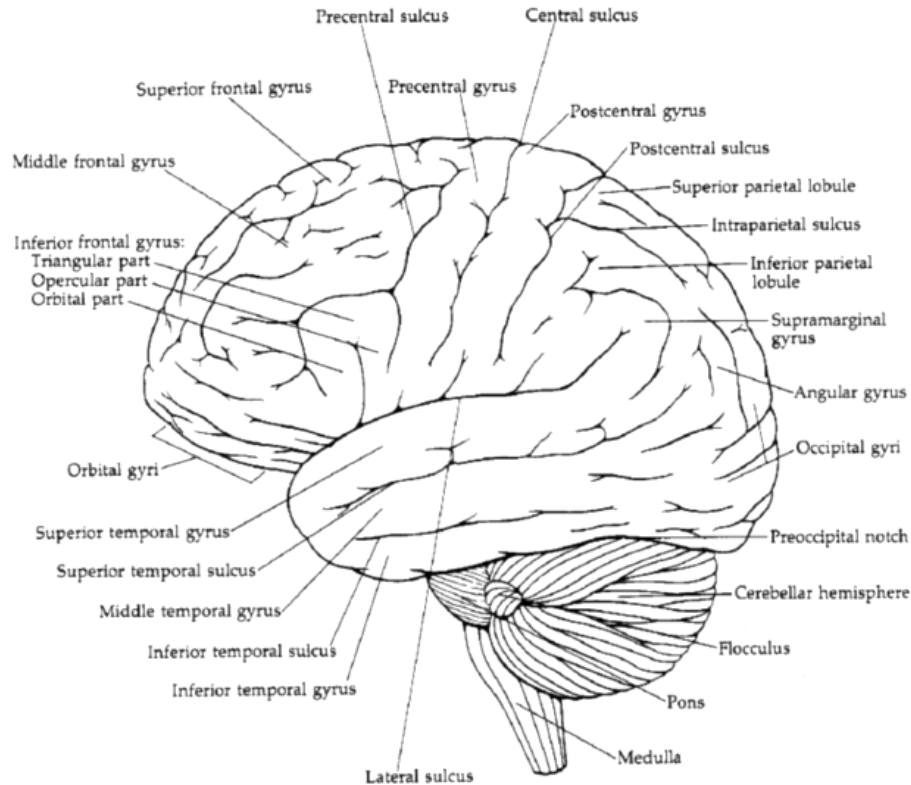


FIG. 2.10: Principales structures sulco-gyrales (<http://homepages.widged.com/mlange/teaching/CNL/helpers/lateral.gif>).

La figure 2.10¹¹ montre quelques structures anatomiques correspondant aux principaux gyri et sillons. Les gyri et les sillons sont, contrairement à ce qu'on peut croire, des structures 3D. Sur la figure 2.11 on peut observer comment d'une manière générale un gyrus s'étend en profondeur, formant ainsi des sillons qui s'étendent également en profondeur. Modéliser la connaissance sur l'anatomie sulco-gyrale consiste à recenser les différentes structures anatomiques sulco-gyrales, définir leur hiérarchie et les caractériser en leur donnant des définitions. Ces définitions peuvent se baser, par exemple, sur les relations entre les différentes structures anatomiques.

Après avoir recensé et fixé les concepts représentant l'anatomie du cortex, il faut définir une hiérarchie de ces derniers. Il s'agit de définir pour chaque concept un type. Dans le langage des ontologies cela peut être matérialisé par la relation *est-un* (*is-a*), par exemple

¹¹<http://homepages.widged.com/mlange/teaching/CNL/helpers/lateral.gif>

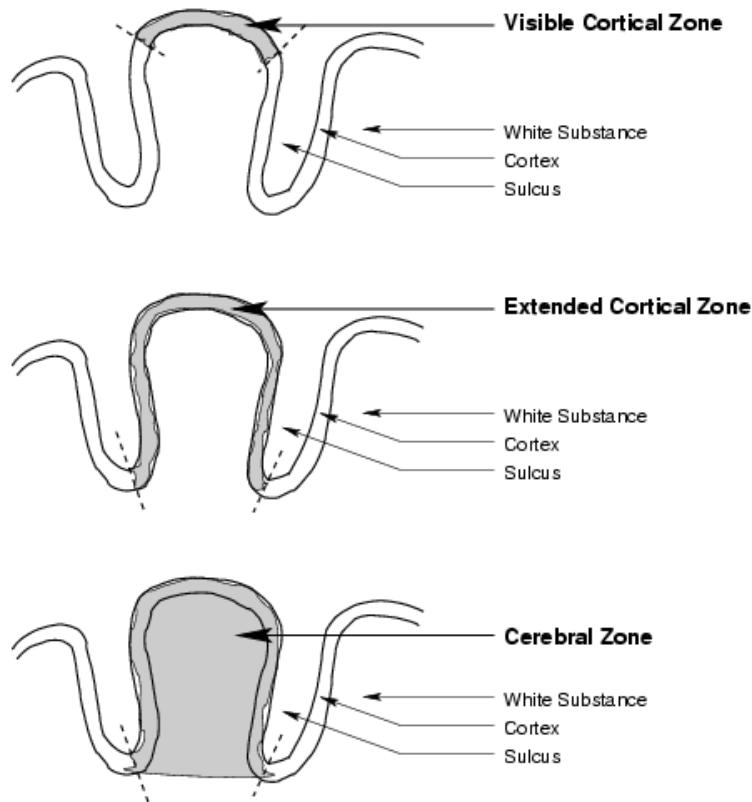


FIG. 2.11: Représentation spatiale 3D des structures anatomiques sulco-gyrales [53].

le gyrus précentral est un gyrus, un gyrus est une structure anatomique, etc. Au final on se retrouve avec une arborescence de concepts anatomiques, où les concepts de même type sont regroupés ensemble, par exemple tous les sillons sont des sous concepts (ou sous classes) du concept (ou classe) **Sulcus** et tous les gyri sont des sous concepts de la classe **Gyrus**. L'étape suivante consiste à définir explicitement et clairement la sémantique des concepts. Par exemple, les concepts désignant les structures anatomiques peuvent être définis par les relations spatiales qui caractérisent les structures anatomiques avec leurs voisinages, ou encore selon leurs propriétés intrinsèques, telle que leurs volumes. Le but étant que chaque structure anatomique identifiée ait une caractérisation unique qui définit le concept qui lui est associé. La dernière étape consiste à transformer la modélisation en une représentation compréhensible ou interprétable par les machines.

Chacune de ces étapes - recensement des concepts du domaine de l'anatomie cérébrale, définition de leur hiérarchie, leur caractérisation et leur représentation - présente plusieurs défis. Dans la section 2.1.4 nous allons voir justement les difficultés liées à la modélisation

de l'anatomie sulco-gyrale et sa représentation.

2.1.4 Difficultés inhérentes à la modélisation de l'anatomie sulco-gyrale

La modélisation de l'anatomie sulco-gyrale est une tâche particulièrement difficile. En fait, comprendre l'anatomie individuelle du cerveau et sa variabilité au sein d'une population est un problème difficile à cause de l'absence de modèles physiques pertinents, de la complexité des formes en particulier au niveau cortical, et du grand nombre de degrés de liberté impliqués [3].

La variabilité anatomique est la cause principale de la difficulté de modélisation de l'anatomie sulco-gyrale [152, 205, 222, 141]. Cette variabilité rend difficile la construction d'un modèle générique de l'anatomie. Elle est non seulement inter-individuelle mais aussi intra-individuelle. En effet, il y a une asymétrie entre l'hémisphère gauche et droit de chaque individu. La différence concerne aussi bien la forme des structures anatomiques que leur disposition : par exemple la continuité des gyri ou la connexion des sillons. Dans [152] par exemple, on a observé que dans la plupart des 25 sujets étudiés le sillon central est en une seule entité dans l'hémisphère gauche, alors qu'il l'est en plusieurs dans l'hémisphère droit.

Les connaissances anatomiques sont le résultat de la synthèse et de la généralisation de nombreuses observations, ce qui peut expliquer pourquoi les définitions des structures anatomiques sont parfois partielles, contradictoires, ou ambiguës [53].

Les différentes études de l'anatomie [152, 205, 222, 141] concernent le plus souvent une partie des structures anatomiques, et ces dernières ne sont pas définies de manière homogène. Par exemple, les sillons sont définis différemment dans l'atlas de Ono [152] et NeuroNames [31]. La hiérarchie NeuroNames traite les sillons comme des parties du cortex. Par exemple, `superior frontal sulcus` et `superior frontal gyrus` sont deux fils de `frontal lobe`. En revanche, l'atlas de Ono traite les sillons comme des creux remplis de liquide cérébro-spinal entre deux gyri. Enfin, l'absence de consensus autour d'un modèle de l'anatomie influe négativement sur l'automatisation de l'identification des structures anatomiques.

2.2 Modélisation et représentation de l'anatomie sulco-gyrale

Nous résumons dans cette section les contributions les plus importantes concernant la modélisation et la représentation des connaissances de l'anatomie sulco-gyrale. En effet, il est difficile de dissocier la modélisation de la connaissance et sa représentation. Cependant une bonne modélisation est celle qui est indépendante de sa représentation. Globalement on distingue deux approches de représentation de l'anatomie sulco-gyrale : une approche basée image et une approche basée concept. L'approche basée image consiste à représenter

une structure anatomique par une image, tandis que l'approche basée concept décrit une structure anatomique de manière abstraite [34]. Généralement, l'atlas est le support privilégié pour les descriptions anatomiques. Des atlas sous forme papier on est passé à des représentations informatisées des structures anatomiques, permettant la manipulation des scènes 3D et une meilleure visualisation. Ce type d'approche inclut également des représentations probabilistes résultant des études sur plusieurs sujets et donc susceptible de rendre compte de la variabilité anatomique. Cependant, l'approche basée image a l'inconvénient d'être difficilement utilisable par des programmes informatiques afin d'effectuer des tâches telles que l'indexation, en vue d'une recherche d'information par contenu efficace.

L'approche basée concept quant à elle a l'avantage d'être facilement utilisable par les programmes informatiques, du fait de leur description abstraite qui peut être formalisée. Néanmoins, elle ne permet pas la représentation des formes. Dans cette approche la variabilité des relations entre les structures anatomiques peut être représentée de manière symbolique via, par exemple, des valeurs indiquant une probabilité pouvant être estimée à partir de statistiques effectuées sur une population de sujets. L'inconvénient de cette approche basée concept est la difficulté de la mise en correspondance de la description abstraite de l'anatomie avec les abstractions provenant des images d'un individu particulier.

La section 2.2.1 étudie l'existant sur les approches basées image. La section 2.2.2 étudie les approches basées concept. Enfin la section 2.2.3 discute les deux approches, et présente les nouvelles perspectives qui peuvent répondre aux besoins actuels.

2.2.1 Approches basées image

Dans ce type d'approche, une structure anatomique est représentée par une image à laquelle on associe souvent une légende décrivant la structure anatomique en question et facilitant la compréhension de l'utilisateur. Comme on l'a déjà dit, les travaux de cette approche sont passés par trois étapes principales. La première étape consiste en des atlas classiques de type atlas de Ono [152]. Le plus souvent, ce sont des atlas imprimés sur du papier, composés d'illustrations sous forme de schémas ou de photos, accompagnés de textes explicatifs décrivant les différentes structures anatomiques. Les atlas numériques ou informatisés constituent un deuxième type d'atlas, qui consistent en un ensemble de représentations 2D ou 3D des structures anatomiques, stockées dans un ordinateur [170]. Les atlas informatisés ont l'avantage, par rapport aux atlas papier, de permettre la manipulation d'objets 3D illustrant mieux la nature tridimensionnelle des structures anatomiques. Enfin, le troisième type consiste en des atlas probabilistes dérivés de statistiques réalisées sur les observations de plusieurs sujets. La section 2.2.1 donne un aperçu des atlas classiques, la section 2.2.1 donne un aperçu des atlas numériques ou informatisés, et la section 2.2.1 donne un aperçu des atlas probabilistes.

Atlas classiques

Atlas de Talairach L'atlas de Talairach [199, 200] concerne également l'anatomie du cerveau. Il porte plus sur les structures anatomiques internes, et moins sur l'aspect surfacique externe des sillons et des gyri. L'atlas de Talairach a été réalisé sur un seul sujet sain uniquement, considéré comme le cerveau modèle. Le référentiel de Talairach est un système de coordonnées permettant de repérer n'importe quel point dans le cerveau d'un individu quelconque par rapport à l'atlas ou au cerveau modèle. Ce système est basé sur un ensemble de déformations permettant le recalage de tout cerveau sur le cerveau modèle défini dans l'atlas, indépendamment de sa taille et de ses spécificités anatomiques¹². Les points de repère anatomiques qui définissent ce référentiel sont facilement identifiables sur des images anatomiques produites par l'IRM par exemple. L'atlas de Talairach est l'un des atlas les plus utilisés dans les différentes études sur le cerveau. Son succès est venu du monde de l'imagerie cérébrale, notamment de l'imagerie fonctionnelle (PET puis IRMf) où les chercheurs avaient besoin de ramener leur observations sur une référence (système de coordonnées) anatomique commune. En effet, le référentiel de Talairach est devenu un standard permettant de comparer les activités observées à travers différents individus ou entre différentes études. Il tend néanmoins à être remplacé par le référentiel MNI [45] qui s'en inspire et constitue un modèle simplifié.

Atlas de Ono L'un des atlas les plus connus dans le monde de l'anatomie du cerveau est sans doute l'atlas de Ono [152]. Il concerne essentiellement les sillons, et très peu les gyri. L'étude a été faite sur vingt-cinq cerveaux extraits de cadavres de sujets sains. Dans l'atlas de Ono on décrit la forme, la taille et la localisation des sillons, mais aussi leur variation en calculant les fréquences d'occurrence des sillons, de leur forme, ainsi que leur relations avec leurs voisinages. Par conséquent on trouve dans l'atlas de Ono une étude de variabilité non seulement inter-hémisphérique de chaque sujet, mais aussi une étude de la variabilité inter-individuelle calculée sur les vingt-cinq sujets. Dans l'atlas de Ono les explications sont brèves, par contre de nombreux schémas et photos des différents sillons appuient les explications.

Autres atlas D'autres atlas existent, plus ou moins utilisés et qui concernent parfois seulement l'anatomie des parties du cerveau. L'atlas de Duvernoy [68, 140] porte sur l'anatomie des hémisphères et du diencephale. Il comprend des coupes sériées, frontales, sagittales et horizontales de 2 à 4 millimètres d'épaisseur intéressant les hémisphères cérébraux et le diencephale. Afin de préciser le niveau des coupes, chacune est vue suivant différents angles qui montrent à la fois la section elle-même et la surface voisine des hémisphères. Certaines structures telles que le lobe occipital, la substance grise profonde

¹²http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9f%C3%A9rentiel_de_Talairach

(noyaux de la base et thalamus) ainsi que l'hippocampe ont été étudiées en détail. L'étude a été réalisée à partir de photos de cerveaux obtenus par dissection, accompagnées de légendes et de textes explicatifs significativement plus importants que pour l'atlas de Ono.

L'atlas de Schaltenbrand et Wahren [179] a été réalisé sur cent onze sujets et contient des photographies des sections microscopiques et macroscopiques des structures anatomiques cérébrales. Comme l'atlas de Talairach, celui de Schaltenbrand et Wahren est utilisé avec succès dans des systèmes variés d'aide à la décision, et plus particulièrement dans la stimulation cérébrale profonde [180, 185].

Les atlas classiques sont certes bien adaptés pour une meilleure compréhension de l'anatomie sulco-gyrale, étant donnée leur richesse en description, cependant ils souffrent de plusieurs limites. D'abord dans ce type d'approche les atlas sont souvent réalisés sur un nombre restreint de sujets, et par conséquent l'étude de la variabilité inter-individuelle et inter-hémisphérique est souvent très partielle, voire totalement absente. Par ailleurs, de tels atlas sont difficiles à mettre en correspondance avec l'anatomie cérébrale de nouveaux sujets explorés à l'aide de différentes modalités d'imagerie in vivo. En outre, l'impression papier d'un atlas n'est sans doute pas très adéquate pour la représentation de l'anatomie du cortex, étant donné qu'elle impose des vues 2D des structures anatomiques qui sont en réalité des structures 3D. L'autre limite est la description en texte libre des structures anatomiques, ce qui les rend inutilisables par des programmes informatiques. Enfin de tels atlas papiers ne peuvent être universels [77], parce qu'en plus des limites rapportées ci-dessus, leur interprétation est souvent difficile, les données décrites ne sont pas quantifiables, l'évolution de leur contenu n'est pas permise et les différents atlas de ce type ne sont pas compatibles. Ces atlas peuvent néanmoins servir de base pour une description formalisée de l'anatomie sulco-gyrale, du fait de leur richesse en information et en explications.

Atlas informatisés

Un atlas informatisé est un ensemble de représentations 2D ou 3D de structures anatomiques identifiées, le tout stocké dans un ordinateur [170]. Les études sur les atlas informatisés ont tiré profit des avancées de l'informatique et des moyens de visualisation pour améliorer les atlas classiques. Les principaux apports de ces atlas sont la manipulation 3D des structures anatomiques et la possibilité de faire un lien entre l'anatomie et les différents domaines, notamment le domaine fonctionnel.

Parmi les principaux atlas informatisés on peut citer tout d'abord Voxel-Man¹³ [100]. C'est un moyen de navigation 3D dans le crâne et le cerveau. Il est pratique pour la compréhension de la morphologie, de l'anatomie fonctionnelle et de sa vascularisation. L'approche intégrée et le format interactif 3D sont assez bien adaptés pour une utilisation

¹³<http://www.voxel-man.de/gallery/>

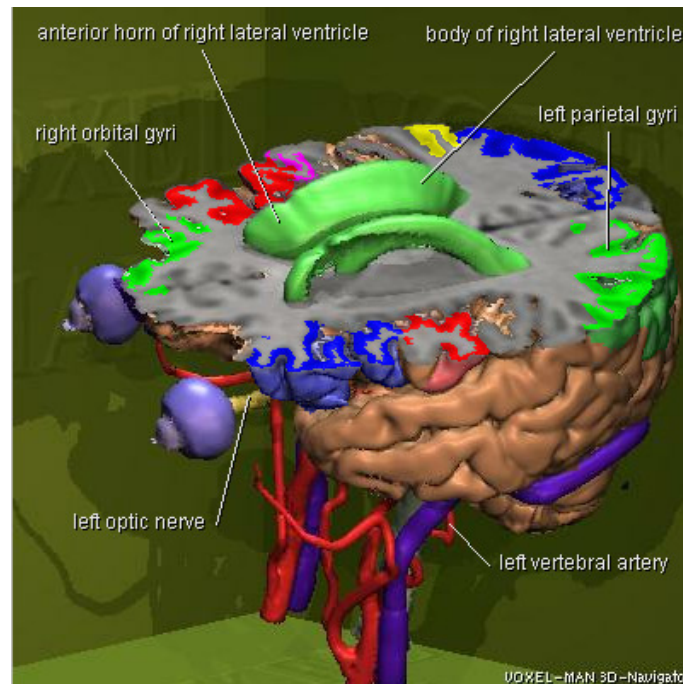


FIG. 2.12: Exploration interactive 3D avec l'atlas Voxel-Man (<http://www.voxel-man.de/gallery/>).

facile. C'est un nouveau type d'atlas anatomique et radiologique qui permet, contrairement aux atlas classiques, une exploration interactive d'un modèle anatomique tridimensionnel détaillé. Chaque structure anatomique est étiquetée, décrite et peut être affichée sur l'écran suite à une requête. Trente six scènes interactives sont ainsi définies pour explorer le crâne, l'anatomie du cerveau, les zones fonctionnelles, ainsi que les vaisseaux (figure 2.12).

Dans [111] les auteurs présentent un atlas tridimensionnel développé pour la visualisation spatiale des structures anatomiques complexes du cerveau humain. Cet atlas est développé pour une utilisation avec des données IRM, et est construit à partir de données IRM 3D de sujets sains dont les voxels ont été étiquetés semi-automatiquement. Dans cet atlas les objets spatiaux sont liés à des fichiers de description, afin d'associer à chaque structure du cerveau une connaissance neuroanatomique. Enfin, les auteurs montrent l'intérêt d'un tel atlas dans le planning chirurgical, dans la segmentation guidée par des modèles et dans l'enseignement de la neuroanatomie.

Dans [211], les auteurs présentent un travail très intéressant, où ils ont analysé la géométrie, la topographie, ainsi que l'organisation fonctionnelle du cortex cérébral humain, en utilisant les reconstructions surfaciques et les cartes corticales des hémisphères gauche

et droit d'un atlas numérique, Visible Human ¹⁴ en l'occurrence. Le mode de visualisation permet d'utiliser des techniques de gonflement et de dépliement du cerveau pour une meilleure représentation de la surface corticale, en particulier les zones corticales enfouies dans les replis sulcaux. L'idée développée par les auteurs dans ce travail a suscité un grand intérêt, en dépit du fait que l'implémentation réalisée à l'époque ne bénéficiait pas des outils de visualisation sophistiqués dont on dispose aujourd'hui.

Un autre travail intéressant est proposé dans [147]. Il s'agit d'un système de neuroimagerie basé-atlas pour l'analyse, la quantification, et la manipulation en temps réel des structures anatomiques cérébrales tridimensionnelles. Pour ce faire, les auteurs ont numérisé, segmenté, labellisé et recalé manuellement les atlas du cerveau classiques suivants : l'atlas de Talairach [199], l'atlas de Schaltenbrand [179] et l'atlas de Ono [152]. Cela a permis d'avoir un atlas qui combine les spécificités des trois atlas, auxquels ils ont développé et rajouté une extension tridimensionnelle. Cela permet aussi de mettre en correspondance les trois atlas de manière automatique.

Plusieurs autres atlas numériques ont été développés dans le but de les utiliser comme référentiels pour la localisation des activités fonctionnelles dans le cerveau. C'est le cas par exemple des systèmes décrits dans [25, 76, 208].

Avec l'avènement d'Internet quelques sites dédiés à l'anatomie ont vu le jour. Parmi ces sites on trouve Neur@nat¹⁵ dédié principalement à l'enseignement de l'anatomie via un atlas, constitué d'images, de dessins anatomiques et de descriptions des structures neuroanatomiques. La représentation sous forme de site Web a l'avantage de faciliter sa diffusion et son utilisation à grande échelle. D'autres sites, tel que Human Brain¹⁶, sont également consacrés à l'enseignement de la neuroanatomie sur Internet.

Même si les atlas informatisés apportent des améliorations considérables par rapport aux atlas classiques, ils restent limités dans le sens où : 1) ils ne tiennent pas compte vraiment de la variabilité anatomique inter-individuelle, vu qu'ils se basent le plus souvent sur un nombre très limité de sujets ; 2) les relations spatiales entre les structures neuroanatomiques, telles que les relations de voisinage, ne sont pas représentées de manière explicite ; 3) et enfin, ils restent inutilisables ou difficilement utilisables par des programmes informatiques.

Atlas probabilistes

Bien que les atlas informatisés aient apporté des améliorations aux atlas classiques, ils restent, comme on vient de le dire, néanmoins insuffisants. En effet, la variabilité inter-individuelle ne permet pas à un atlas construit à partir de l'anatomie d'un cerveau humain

¹⁴http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html

¹⁵<http://www.chups.jussieu.fr/ext/neuranat/>

¹⁶http://www.thehumanbrain.info/brain/bn_sections.php

unique de répondre aux besoins de la cartographie : comparaison dans les études de groupe et localisation précise de données fonctionnelles [15]. Les atlas informatisés reposent le plus souvent sur l'étude approfondie d'un ou quelques spécimens, supposés être prototypiques [53]. Leur utilité dépend de la possibilité de les mettre en correspondance avec les données d'imagerie d'un sujet ou d'un patient. Cette mise en correspondance peut être rendue difficile par la variabilité anatomique [129]. Afin de mieux représenter la variabilité anatomique inter-individuelle, les chercheurs ont développé les atlas probabilistes. Ces derniers s'appuient sur des analyses statistiques rigoureuses de la configuration de l'anatomie sulco-gyrale réalisées sur plusieurs sujets recalés dans un référentiel commun [71]. En effet, les atlas basés sur un des groupes contenant un grand nombre de sujets recalés dans un référentiel commun sont une illustration d'une solution plus générale, plus satisfaisante, qui consiste à exploiter la diversité et la complémentarité des images anatomiques et fonctionnelles pour créer un atlas probabiliste [98, 204]. Les atlas probabilistes devraient permettre de faciliter leur mise en correspondance avec les données d'imagerie d'un sujet ou d'un patient, ainsi que le recalage entre les différentes modalités [205]. Ils constituent un nouvel et puissant outil pour les applications cliniques et de recherche, permettant la détection des pathologies dans des individus ou dans des groupes d'individus.

Plusieurs atlas probabilistes ont vu le jour dès l'apparition de l'IRM. Certains d'entre eux portent sur la totalité du cortex tandis que d'autres se focalisent sur une partie de l'anatomie uniquement. Par exemple, dans [170] l'auteur propose un atlas du cerveau basé sur le moyennage d'IRM de sujets sains et destiné à évoluer au fur et à mesure de l'ajout de nouvelles données d'imagerie du cerveau, alors que dans [205] les auteurs proposent un modèle qui étudie la variabilité de six sillons uniquement. Cependant, la majorité des atlas probabilistes se focalisent sur la variabilité des structures anatomiques 3D, notamment des gyri et des sillons. Dans [102] les auteurs ont développé un modèle (template) à partir de 27 IRM T1 du même patient après des corrections et des pré-traitements effectués séparément sur chacune des IRM. Un autre atlas a été construit à partir de 12 IRM T2 et DP (Densité de Protons). Dans [47] les mêmes auteurs ont repris le modèle développé dans [102], auquel ils ont rajouté la segmentation de toutes les parties du cerveau, fournissant ainsi un modèle associé à chacune des structures segmentées. Enfin dans [10] les auteurs améliorent la segmentation des structures faite dans [47], en utilisant de nouvelles techniques plus performantes et plus optimisées. Ces trois derniers atlas ont été développés à l'Institut Neurologique de Montréal (MNI)¹⁷. En effet, le continent nord américain et plus particulièrement le MNI du McGill (Montréal) développe de nombreuses approches s'intéressant à l'anatomie macroscopique du cerveau [130]. Le MNI est à l'origine des principaux templates anatomiques de SPM (Statistical Parametric Mapping)¹⁸, un logiciel très utilisé, développé pour l'analyse des images du cerveau. Dans [204] les auteurs illustrent les défis mathématiques que représente la construction d'atlas du cerveau en se

¹⁷<http://www.mni.mcgill.ca/>

¹⁸<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>

basant sur une population donnée, notamment des populations atteintes de maladies telles que la maladie d'Alzheimer. Plus récemment, les atlas histologiques ont fait leur apparition [39, 216], réalisés chimiquement sur des coupes d'encéphale post-mortem. Plusieurs autres atlas probabilistes ont été développés, nous les aborderons dans le chapitre 4, étant donné qu'ils consistent aussi à identifier et étiqueter les structures anatomiques du cerveau, notamment avec les *Statistical Probability Anatomy Maps* (SPAM) de Louis Collins et al. [45, 46], qui sont des cartes volumiques calculées dans le repère de *Talairach*, dont la valeur de chaque voxel indique sa probabilité d'appartenir à une structure anatomique donnée.

Les atlas probabilistes sont sans doute ceux qui ont connu le plus de succès, et sont toujours les plus utilisés dans la communauté de l'imagerie cérébrale. Ils ont été notamment utilisés pour fournir des a priori anatomiques pour la segmentation des images du cerveau. Néanmoins, bien qu'ils constituent une solution satisfaisante pour la représentation de la variabilité anatomique inter-individuelle, ils ne font pas beaucoup mieux que les atlas informatisés quant à la mise en correspondance des images anatomiques. Aussi, tout comme les atlas classiques et informatisés, ils ne représentent pas les relations spatiales entre les structures anatomiques d'une manière explicite, et utilisent des référentiels différents, ce qui les rend difficilement utilisables. Pour toutes ces raisons, et bien d'autres, les chercheurs ont été amenés à explorer une autre approche de représentation de l'anatomie, c'est l'approche basée concepts détaillée dans la section 2.2.2.

2.2.2 Approches basées concepts

Les atlas de l'approche basée image permettent de visualiser les structures anatomiques et la mise en correspondance des images sans, cependant, tenir compte de ce que ces images représentent réellement. Parmi ces atlas, seuls quelques uns associent un nom à une structure que l'on sélectionne, et aucun d'entre eux ne permet d'accéder aux différentes informations (fonctionnelle, neurochimique, ou pathologique) qui lui sont associées [142]. Les atlas basés image permettent une bonne représentation de l'anatomie, sans pour autant lui donner du *sens*. C'est ce sens, qu'on appelle aussi sémantique, qui est de nature abstraite (ou symbolique) et non numérique, que les méthodes basées concepts associent aux éléments d'une image, tels que les structures anatomiques du cortex cérébral. L'approche basée concepts modélise la connaissance anatomique indépendamment de sa représentation et de son mode d'acquisition. Elle est par nature indépendante des différentes techniques de représentation d'images, de leur résolution spatiale ou temporelle, et des modalités d'imagerie. C'est justement l'approche conceptuelle qui unifie le sillon central gauche d'un individu sur une IRM et le même sillon du même individu sur un scanner [53]. C'est également une approche de nature générique, c'est-à-dire qu'elle permet d'instancier l'anatomie de tout nouvel individu à partir du modèle symbolique. Rosse parle [174] de *connaissances canoniques*, qu'il définit comme le résultat de la synthèse qualitative et de la généralisation d'observations individuelles. Ces connaissances sont néanmoins difficiles à décrire de

façon abstraite, particulièrement dans un domaine complexe tel que l'anatomie du cerveau. Cependant, une fois accomplie, cette description permet une meilleure compréhension de l'anatomie, et un traitement partiel de la variabilité des formes des structures anatomiques. De plus, une fois représentée de manière structurée et formelle, elle peut être utilisée par des programmes informatiques afin d'effectuer divers traitements automatisés. Enfin, dans de telles approches, les images peuvent être utilisées pour aider à la compréhension de la description abstraite de l'anatomie, cependant elles ne constituent qu'un élément de la description abstraite, qui est la vraie information.

Dans ce qui suit on introduit l'approche basée concept, et on décrit sommairement les principales réalisations dans le domaine de l'anatomie du cerveau.

Introduction aux approches basées concept

Les approches basées concept consistaient au départ en de simples terminologies définissant le champ lexical d'un domaine particulier, où les structures des terminologies reflètent les relations sémantiques entre leurs termes. La première terminologie publiée en 1895 sur l'anatomie était *Nomina Anatomica*¹⁹ [42]. En 1998, la nomenclature *Nomina Anatomica* a été remplacée par *La Terminologica Anatomica (TA)* ou *Terminologie Anatomique (TA)* en français [43], considérée comme la terminologie officielle concernant l'anatomie humaine. Cette terminologie a été publiée suite à neuf années de travail du Comité fédératif de la terminologie anatomique (FCAT - Federative Committee on Anatomical Terminology)²⁰. Ce Comité est un groupe de travail spécialisé de la Fédération internationale des Associations d'anatomistes (IFAA - International Federation of Associations of Anatomists) qui a mandaté et approuvé ce travail. La Terminologie Anatomique (TA) est officiellement publiée en latin accompagnée d'une version en anglais, et récemment des utilisateurs francophones ont entamé sa traduction en français [16]. La Terminologie Anatomique contient environ 7500 termes de l'anatomie humaine macroscopique, classés selon une hiérarchie de termes. La position d'un terme dans la hiérarchie, son code et sa typographie indiquent les relations qui les lient à ses parents et à ses frères. Ces relations sont soit des relations de spécialisation, ou des relations de type "partie-tout".

Les deux terminologies précédentes concernent l'anatomie de tout le corps humain. Cependant, elles ne référencent pas toutes les structures anatomiques, et les principes de hiérarchie ne sont pas appliqués avec rigueur dans l'organisation des termes. Bowden [31] a constaté que *Nomina Anatomica* ne référence pas toutes les structures de l'anatomie cérébrale, et que c'est à un utilisateur humain ayant déjà des connaissances anatomiques d'y interpréter la position d'un terme en fonction de ses parents et de ses frères. De ces deux constats résulte *NeuroNames* [31, 32], une terminologie de la neuroanatomie dont

¹⁹http://en.wikipedia.org/wiki/Nomina_Anatomica

²⁰[http://fr.wikipedia.org/wiki/Terminologica_Anatomica_\(TA\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Terminologica_Anatomica_(TA))

le but est de fournir une meilleure standardisation de la terminologie neuroanatomique utilisée pour la recherche scientifique, la pratique clinique et pour l'enseignement, afin de faciliter l'utilisation de la neuroanatomie classique par des applications informatisées de neuroimagerie quantitative. *NeuroNames* regroupe 783 structures anatomiques cérébrales des humains et des primates, désignées par 5000 termes en anglais et en latin, et organisées selon une hiérarchie de composition sur 9 niveaux. Les structures anatomiques sont mutuellement exclusives, et la description se veut exhaustive, puisque toutes les sous-structures occupant le volume total de chaque super-structure sont identifiées. De fait, *Nomina Anatomica* couvre 70% de *NeuroNames*. Aujourd'hui, *Neuronames* est maintenue par l'Université de Washington, et contient plus de 15.000 termes neuroanatomiques²¹.

La construction d'une terminologie n'est cependant pas une tâche aisée. Rector identifie [163] quelques unes des difficultés rencontrées par les terminologies cliniques, dont la principale est liée au fait que le domaine à modéliser et les applications possibles sont vastes, et par conséquent difficiles à formaliser. Ce manque de formalisation limite l'utilisation des terminologies par des outils informatiques. Par ailleurs, les terminologies consistent en général à recenser les termes d'un domaine et définir leur organisation à travers un principe de classement, établi selon des critères implicites et souvent hétérogènes [78]. Elles ne fournissent pas de définitions explicites aux structures représentées, et l'information déduite de la position d'un terme dans la hiérarchie n'est pas suffisante pour le caractériser complètement [165]. Cette absence de définition explicite est une des limites de l'approche terminologique car deux applications intervenant dans des contextes différents peuvent faire appel au même terme, mais avec des différences sémantiques qui ne peuvent pas être prises en compte [53]. L'approche terminologique porte sur la définition des termes à utiliser sans leur associer un sens ou une sémantique explicite, c'est donc à l'utilisateur humain d'interpréter ce qui est implicite. De plus, la construction d'une terminologie n'est pas basée, le plus souvent, sur des principes qui lui permettent d'être générique et consensuelle. Or, l'un des objectifs de la modélisation de connaissances d'un domaine est que ces dernières soient de nature générique et consensuelle.

Les terminologies constituent alors un pas en avant dans la modélisation de connaissances symboliques, notamment sur l'anatomie. Cependant, il est nécessaire de passer de la notion de "terme" à la notion de "concept". Un terme référence un concept, et un concept représente le sens ou la sémantique du terme qui le référence. Un concept est même défini comme une unité de la pensée [162].

Afin de pouvoir effectuer des traitements automatiques par des programmes informatiques, les concepts doivent avoir une représentation formelle et organisée de manière logique et exploitable suivant les règles et la philosophie de l'ingénierie de connaissances. C'est ainsi que les ontologies, définies dans le premier chapitre, ont suscité beaucoup d'attention dans la communauté de la représentation de connaissances biomédicales en général,

²¹<http://en.wikipedia.org/wiki/NeuroNames>

et anatomiques en particulier. UMLS (Unified Medical Language System) [124] est l'un des premiers systèmes qui a apporté des améliorations aux terminologies simples, décrites précédemment. Il a été initié en 1986 par Donald Lindberg. UMLS est une compilation de plusieurs vocabulaires contrôlés (sources terminologiques, dont NeuroNames)²². Il fournit une structure de “mapping” (ou de mise en correspondance) entre les sources terminologiques, et permet la traduction entre les différents systèmes de terminologies. Il peut être aussi vu comme un thésaurus ou une ontologie des concepts biomédicaux. UMLS facilite également les traitements sur la langue naturelle en disposant d'une base d'informations lexicographiques. Il est composé des éléments suivants :

- **Un Métathésaurus** : c'est la base de données d'UMLS, une collection de concepts et de termes issus de diverses sources terminologiques, ainsi que leurs relations. Chaque concept du Métathésaurus a des attributs qui permettent d'en définir le sens ;
- **Un réseau sémantique** : consiste en un ensemble de catégories et relations qui sont utilisées pour classer et relier les entités dans le métathésaurus, il permet d'assigner pour chaque concept du métathésaurus un ou plusieurs types sémantiques ;
- **Un lexique spécialiste** : c'est une base de données d'informations lexicographiques à utiliser dans les traitements de la langue naturelle. Pour chaque terme n'apparaissant pas dans le métathésaurus on spécifie des informations syntaxiques, morphologiques et orthographiques ;
- Un ensemble **d'outils logiciels** tels que MetamorphoSys, un logiciel qui peut être utilisé pour personnaliser le Métathésaurus pour des applications spécifiques, par exemple par l'exclusion de certaines sources de vocabulaires.

L'objectif d'UMLS est d'aider les professionnels de la santé et les chercheurs à utiliser les informations médicales issues de différentes sources. Il est constitué de plus de 800.000 concepts et 10 millions de relations, définis à partir de plus de 100 terminologies médicales existantes [81]. Cependant, UMLS reste une terminologie bien qu'elle se rapproche de la définition d'une ontologie, parce qu'elle n'est pas fondée sur des principes formels rigoureux, définis dans le premier chapitre, qui permettent de bâtir des systèmes logiquement cohérents à partir desquels il soit possible de raisonner [91]. C'est en revanche le cas de *GALEN*, qui décrit [164] un référentiel terminologique clinique unifié, qui est une ontologie décrite dans un premier temps en utilisant la logique de description GRAIL [161], et disponible actuellement en OWL²³. Concernant l'anatomie, l'ontologie *GALEN* définit environ 10.000 concepts anatomiques. Plusieurs ontologies spécialisées existent dans différents domaines, *Gene Ontology* [8] par exemple est spécialisée dans la génomique, le *Digital Anatomist Foundational Model* en anatomie, etc.

Dans la section 2.2.2 on s'intéresse aux ontologies spécialisées en anatomie du cerveau humain, plus particulièrement on étudie deux ontologies : *Digital Anatomist Foundational*

²²http://en.wikipedia.org/wiki/Unified_Medical_Language_System

²³<http://www.co-ode.org/galen/>

Model [173] et la modélisation de connaissances neuroanatomiques effectuée par Dameron [53].

Principales réalisations en neuroanatomie

FMA Le *Digital Anatomist Foundational Model of Anatomy (FMA)*²⁴ [173] est une source de connaissances évolutive pour l'informatique biomédicale, où sont décrites les classes et les relations nécessaires pour une représentation symbolique de la structure phénotypique du corps humain. Elle est développée et maintenue par le groupe de l'informatique structurée²⁵ de l'Université de Washington. La connaissance de l'anatomie, fondamentale pour les sciences médicales, doit être cohérente dans toutes les disciplines qui l'utilisent. *FMA* est développée non seulement pour aider à la standardisation de la terminologie médicale, mais aussi et surtout pour aider à construire des modules d'inférence dans des applications biomédicales.

A ce jour *FMA* contient environ 75,000 concepts anatomiques, correspondant à plus de 120,000 termes, et plus de 2.1 million d'instances de plus de 168 relations. Elle représente les entités anatomiques à différentes échelles : molécules biologiques, cellules, tissus, organes, systèmes d'organes, et grandes parties du corps. Elle contient les concepts anatomiques et les relations nécessaires pour la modélisation de la structure du corps humain en entier et sa représentation symbolique. La connaissance anatomique y est structurée sous une forme qui peut être lue aussi bien par des humains que par des machines. Elle fournit un modèle pour la représentation symbolique des fonctions physiologiques multi-échelles [49].

Les concepts dans *FMA* sont regroupés en classes partageant des caractéristiques structurelles portant sur les relations de spécialisation, de composition, les relations spatiales et les relations indiquant une transformation. Ils forment ainsi une hiérarchie de spécialisation (figure 2.13) dans un modèle qui doit à la fois représenter l'anatomie canonique et permettre un traitement de requêtes [173, 174], c'est-à-dire un modèle prototypique de l'anatomie, qui permet de traiter des requêtes et d'effectuer des raisonnements sur les instances de ses classes et de ses relations.

L'ontologie *FMA* est d'utilisation libre. Le groupe de recherche de l'Université de Seattle a développé un explorateur Web qui s'appelle *FME*²⁶ (Foundational Model Explorer), il permet de naviguer dans la base de connaissances *FMA* et explorer ses concepts (figure 2.14).

FMA tend à devenir une référence pour la communauté de l'anatomie. Elle est fondée sur des principes ontologiques et définit explicitement les classes et leur taxonomie ainsi que les relations entre les différentes classes, l'ensemble dans une hiérarchie dont la racine est :

²⁴<http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/AboutFM.html>

²⁵<http://sig.biostr.washington.edu/index.html>

²⁶<http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/FME/index.html>

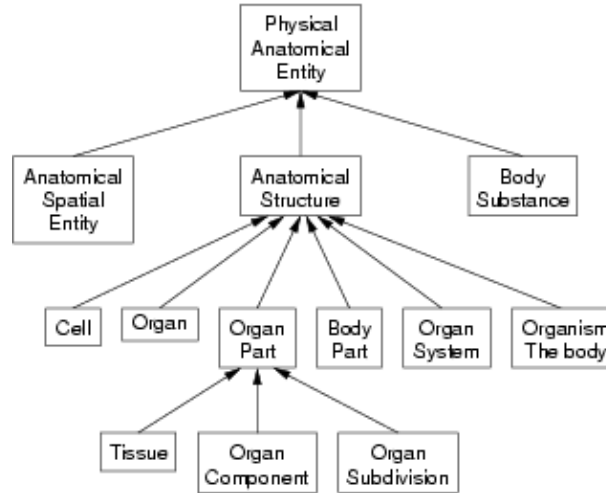


FIG. 2.13: Organisation taxonomique de l'ontologie de l'anatomie de Digital Anatomist, selon [173].

Anatomical Entity. Elle est dite une ontologie de domaine pour sa description générique, abstraite et cohérente de l'anatomie aussi bien microscopique que macroscopique, utile pour les différentes sciences biomédicales, ainsi que pour le caractère fondamental que joue l'anatomie dans ces dernières.

Composants de *FMA* L'ontologie *FMA* est composée des quatre éléments suivants :

1. Taxonomie de l'anatomie (Anatomy taxonomy (*At*)) : elle classe les entités anatomiques selon les caractéristiques qu'elles partagent, et grâce auxquelles elles peuvent être distinguées les unes des autres ;
2. L'abstraction structurelle anatomique (Anatomical Structural Abstraction (*ASA*)) : spécifie les relations "partie-tout" et les relations spatiales qui existent entre les entités représentées dans *At* ;
3. Abstraction de la transformation anatomique (Anatomical Transformation Abstraction (*ATA*)) : elle spécifie la transformation morphologique des entités représentées dans *At* durant le cycle de vie prénatal et postnatal ;
4. Métaconnaissances (Metaknowledge (*Mk*)) : spécifie les principes, les règles et les définitions selon lesquelles les classes et les relations des trois autres composants sont représentés.

Par conséquent, l'ontologie *FMA* peut être représentée par le schéma d'abstraction suivant : $\mathbf{FMA} = (\mathbf{At}, \mathbf{ASA}, \mathbf{ATA}, \mathbf{Mk})$.

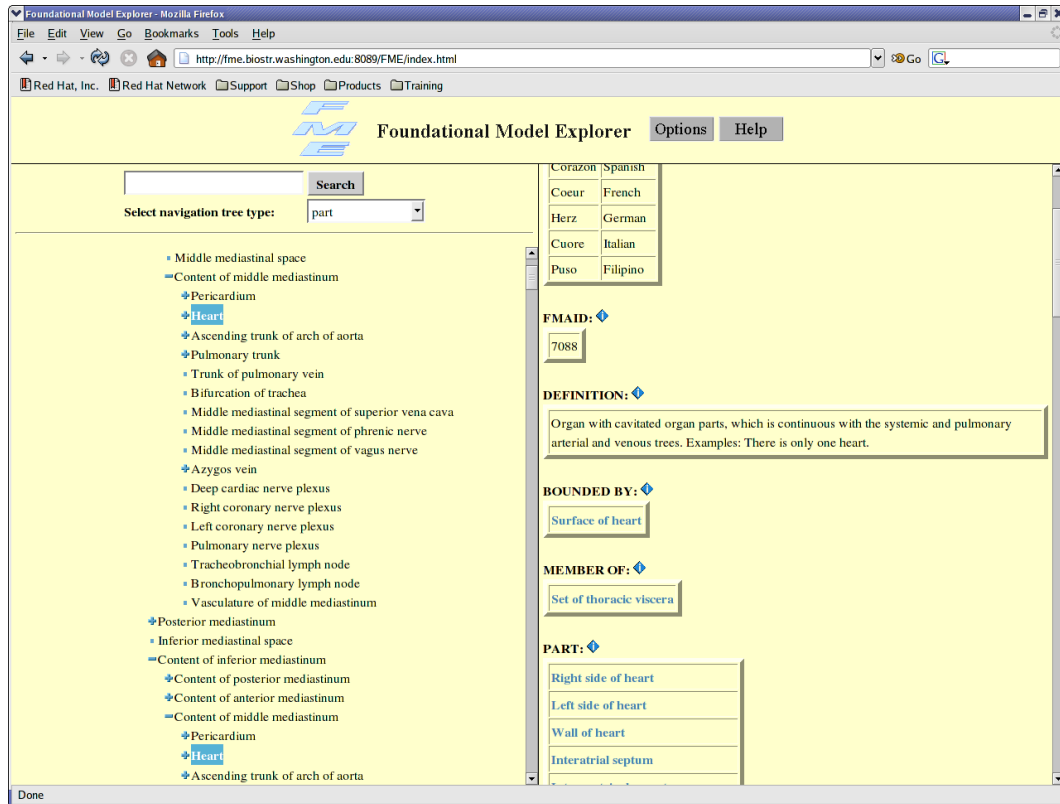
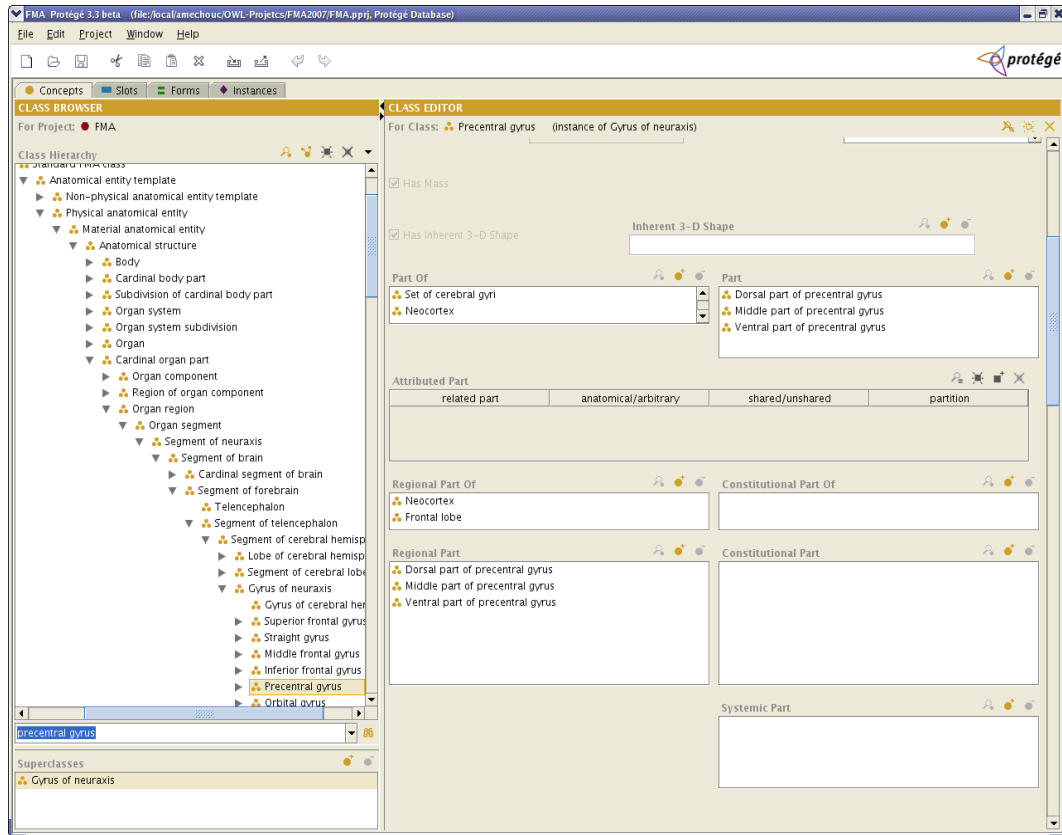


FIG. 2.14: Le Foundational Model Explorer (*FME*) : explorateur de la base *FMA* (<http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/FME/index.html>).

Représentation de *FMA* L'ontologie *FMA* est implémentée en Protégé-Frames (figure 2.15). Ses données sont stockées dans une base de données relationnelles MySQL, et sont entrées/modifiées par les auteurs de *FMA* via l'éditeur Protégé. Cependant, la représentation en frames, bien qu'elle ait des avantages, ne permet pas le partage des connaissances anatomiques dans le cadre du Web Sémantique et ne permet pas non plus de vérifier automatiquement la cohérence de ces dernières à l'aide des raisonneurs basés sur la logique du premier ordre, pour lesquels la littérature est assez riche. En outre, *FMA* est une ontologie de grande taille, ce qui rend la tâche de vérification de cohérence difficile, voire impossible, si celle-ci doit être faite manuellement. C'est pourquoi des traductions de *FMA* ou de parties de *FMA* en OWL(DL) ont été développées [82, 55, 149]. Cependant ces traductions en OWL présentent plusieurs limites : 1) d'abord elles se limitent le plus souvent à des parties de *FMA* ; 2) certaines caractéristiques de *FMA* frames, telles que les méta-classes, ne peuvent pas être représentées en OWL DL ; 3) et l'une des grandes limites

FIG. 2.15: La représentation de *FMA* en Protégé Frames.

de ces traductions est liée à la grande taille des ontologies obtenues par la traduction en OWL, ce qui rend la tâche de raisonnement et de vérification de cohérence par des raisonneurs extrêmement complexe, voire impossible.

La connaissance sulco-gyrale dans *FMA* La localisation des sillons et des gyri dans la hiérarchie de *FMA* est illustrée sur la figure 2.16. Il faut dire que la terminologie des concepts neuroanatomiques dans *FMA* est reprise de la terminologie *NeuroNames* [31], avec une nouvelle structuration pour ces concepts, qui satisfait les principes de modélisation retenus pour *FMA*, complétée par des définitions qui les relient à d'autres concepts via des relations [128]. Cependant, les définitions des sillons et des gyri dans *FMA* ne sont pas complètes. D'abord, il n'y a aucune définition pour les sillons, hormis l'identifiant et les synonymes ; en revanche les gyri sont définis par plusieurs relations dont les principales

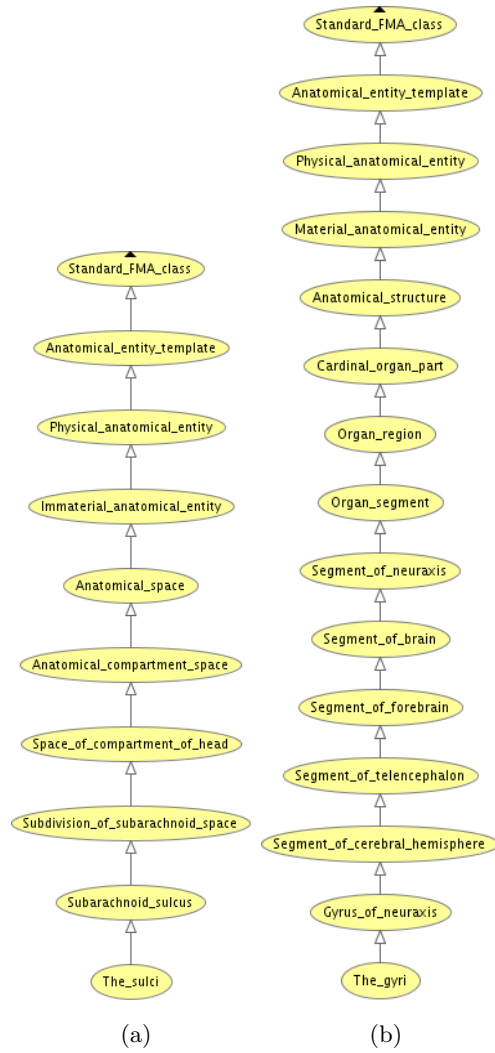


FIG. 2.16: (a) : Position des sillons dans la hiérarchie des concepts dans *FMA*, (b) Position des gyri dans la hiérarchie des concepts dans *FMA*.

sont :

- ***Attributed_Continuous_With*** : Cette propriété exprime la continuité de deux entités, avec indication de l'orientation, ce qui signifie que non seulement on dit que deux entités sont en continuité l'une avec l'autre, mais aussi on spécifie la position de l'une par rapport à l'autre. Par exemple, si on dit que la partie inférieure du gyrus précentral est en continuité avec la partie inférieure du gyrus postcentral, on rajoute le fait que le gyrus précentral est antérieur au gyrus postcentral ;
- ***Bounded_By*** : *Bounded_By* relie deux entités (deux concepts) : la première de dimension n et la seconde de dimension $n - 1$. Par exemple, elle pourrait être utilisée pour exprimer le fait qu'un gyrus est bordé par un sillon, mais à ce moment là si le gyrus est de dimension 3, il faudrait considérer le sillon comme une entité de dimension 2, ce qui n'est pas le cas en réalité. La propriété inverse de *Bounded_By* est *Bounds* ;
- ***Part*** : Cette relation décrit un composant physique matériel ou non matériel d'une structure anatomique, qui, avec d'autres composants hétérogènes constituent l'intégralité d'une structure anatomique ; son inverse est *Part_Of* ;
- ***Continuous_With*** : On parle de continuité lorsqu'il s'agit d'une frontière conventionnelle entre deux entités, par exemple un pli de passage. La partie inférieure d'un gyrus est souvent en continuité avec sa partie supérieure ;
- ***Location*** : C'est une relation dont la valeur est une instance de classe qui décrit les structures adjacentes et leur position relative (ou quantitative), ou encore les coordonnées par rapport à la structure anatomique cible ;
- ***Member_Of*** : Cette relation spécifie les ensembles anatomiques dont une structure anatomique fait partie ;
- ***Regional_Part*** : C'est une relation qui décrit une subdivision topologique ou morphologique de l'aggrégat de tous les composants (constituants) majeurs d'une structure anatomique, qui, avec d'autres parties régionales (regional parts), constituent l'intégralité d'une structure anatomique. Son inverse est *Regional_Part_Of*.

D'autres relations de type booléennes sont définies : *Has_Dimension* pour indiquer si une structure anatomique a une dimension ou pas, *Has_Mass* pour indiquer si une structure anatomique a une masse ou pas, *Has_Boundary* pour indiquer si une structure anatomique a des structures anatomiques voisines ou pas, etc.

En conclusion, *FMA* constitue un bon modèle pour l'anatomie humaine, qui, cependant, n'offre pas de définitions complètes pour l'anatomie de certains organes. Cela est particulièrement vrai pour l'anatomie sulco-gyrale du cerveau, où il faudrait non seulement compléter les définitions des sillons, mais aussi définir les gyri à un niveau de granularité plus fin, ce qui n'est pas le cas actuellement, puisque seuls les grands gyri y sont définis.

Modélisation des connaissances anatomiques sur le cortex cérébral [53] Le travail effectué par Dameron sur la modélisation des connaissances sur le cortex cérébral est particulièrement intéressant. Il propose une ontologie de l'anatomie sulco-gyrale chez l'adulte. La modélisation proposée s'est inspirée des travaux déjà existants sur la modélisation symbolique de l'anatomie et les théories existantes sur l'aspect taxonomique et méréotopologique de la modélisation de connaissances. Une méthode de gestion de cohérence sémantique basée sur les propriétés des relations est également proposée [56]. Enfin une implémentation du modèle est réalisée en XML, et consultable sur le Web en HTML²⁷ (figure 2.17).

The screenshot shows a web browser window titled 'Laboratoire IDM : Cortex Knowledge Base - Mozilla Firefox'. The address bar shows the URL 'http://idm.univ-rennes1.fr/~odameron/anatomy/abstractModel/'. The page content is divided into two main sections: 'Concepts list' on the left and 'Terminology' on the right.

Concepts list

- Hemisphere
 - [FRONTAL LOBE](#)
 - lobeFrontal : Orbital Gyri
 - [PreCentral Gyrus](#)
 - [Superior Pars of PreCentral Gyrus](#)
 - [Inferior Pars of PreCentral Gyrus](#)
 - [Superior Frontal Gyrus](#)
 - [Medial Pars of Superior Frontal Gyrus](#)
 - [Superior Pars of Superior Frontal Gyrus](#)
 - [Inferior Pars of Superior Frontal Gyrus](#)
 - [Intermediate Frontal Gyrus](#)
 - [Superior Pars of Intermediate Frontal Gyrus](#)
 - [Inferior Pars of Intermediate Frontal Gyrus](#)
 - [Inferior Frontal Gyrus](#)
 - [Orbital Pars of Inferior Frontal Gyrus](#)
 - [Triangular Pars of Inferior Frontal Gyrus](#)
 - [Opercular Pars of Inferior Frontal Gyrus](#)
 - [Gyrus Rectus](#)
 - [Medial Orbital Gyrus](#)
 - [Lateral Orbital Gyrus](#)
 - [Anterior Orbital Gyrus](#)
 - [Posterior Orbital Gyrus](#)
 - [Subcentral Gyrus](#)
 - [ParaCentral Lobule](#)
 - [Transverse Frontopolar Gyrus](#)
 - [Superior Pars of FrontoPolar Gyrus](#)
 - [Middle Pars of FrontoPolar Gyrus](#)
 - [Inferior Pars of FrontoPolar Gyrus](#)
 - [FrontoMarginal Gyrus](#)
 - [PARIETAL LOBE](#)
 - [Post Central Gyrus](#)

Terminology

Designation	Terminology	CUI	LUI	SUI
Inferior Frontal Gyrus	NeuroNames	C0152298	L0178926	S0379100
Gyrus Frontalis Inferior	NominaAnatomica			
Gyrus Frontalis Inferior	NominaAnatomica			

Anatomical Composition

Direct anatomical parts

- [Orbital Pars of Inferior Frontal Gyrus](#)
- [Triangular Pars of Inferior Frontal Gyrus](#)
- [Opercular Pars of Inferior Frontal Gyrus](#)

Contained sulci

- [Horizontal Ramus](#)
- [Ascending Ramus](#)

Anatomical continuity

- [Lateral Orbital Gyrus](#)
- [Posterior Orbital Gyrus](#)
- [PreCentral Gyrus](#)
- [Inferior Pars of PreCentral Gyrus](#)

FIG. 2.17: Implémentation du modèle abstrait de l'anatomie sulco-gyrale proposé par Dameron [53].

Sources de modélisation Dans ce modèle, les auteurs ont extrait les connaissances de différentes sources : atlas anatomiques, terminologies existantes (*NeuroNames* en par-

²⁷<http://idm.univ-rennes1.fr/~odameron/anatomy/abstractModel/>

ticulier), articles de recherche scientifique sur l'anatomie, chirurgie, discussions avec des neuroanatomistes et des neurochirurgiens et participations à des dissections [53]. Les relations anatomiques y sont définies rigoureusement selon les théories formelles sur les relations taxonomiques, méréologiques et topologiques. Dans cette modélisation trois niveaux hiérarchiques sont distingués, correspondant à différentes granularités (figure 2.18) :

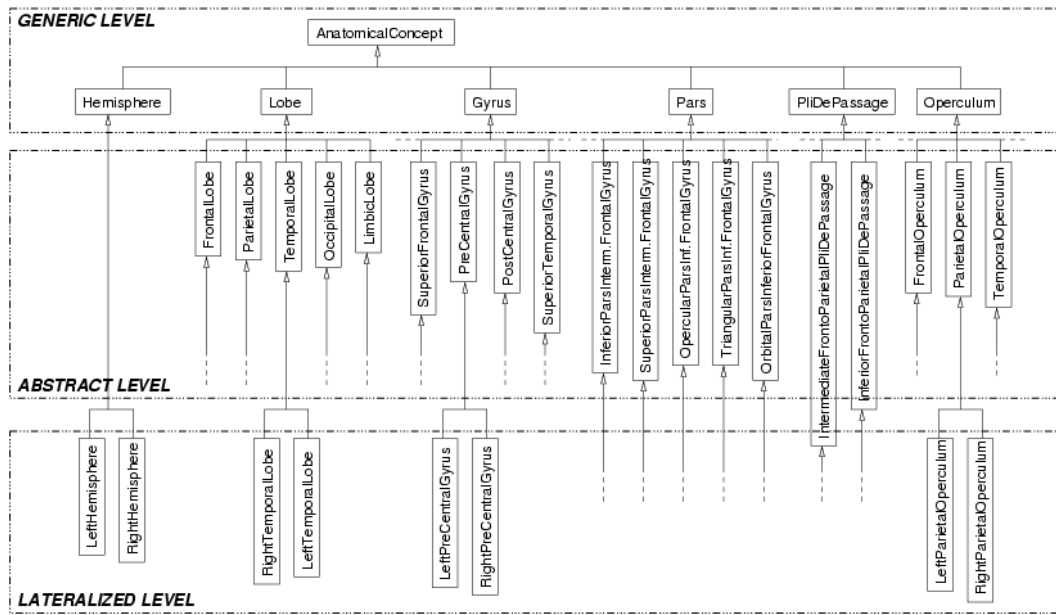


FIG. 2.18: Les trois niveaux correspondant à la hiérarchie taxonomique des structures anatomiques corticales définis dans [53].

- **Niveau générique** : dans ce niveau on représente les concepts généraux qui ont une faible valeur descriptive, tels que **Sulcus** et **Gyrus**. Les concepts de ce niveau sont subsumés par **AnatomicalConcept** ;
- **Niveau abstrait** : les concepts de ce niveau décrivent l'anatomie du cortex d'un hémisphère, ils décrivent les structures anatomiques telles que **Central Sulcus** et **PreCentral Gyrus**, subsumés respectivement par **Sulcus** et **Gyrus** issus du premier niveau ;
- **Niveau latéralisé** : ce niveau décrit l'anatomie du cortex entièrement, en distinguant notamment les structures anatomiques des hémisphères gauche et droit. Par exemple **Right Central Sulcus** et **Left Central Sulcus** sont deux concepts du niveau latéralisé subsumés par le concept **Central Sulcus** du niveau abstrait.

Les auteurs ont opté pour une démarche de modélisation semblable à celle suivie par [174] dans le *Digital Anatomist*, et ils ont montré que leur modèle de l'anatomie sulco-

gyrale peut être intégré dans celui de *Digital Anatomist*. L'autre aspect original et important de la démarche de Dameron est la modélisation rigoureuse et formelle des relations méréologiques (relations de composition) et des relations topologiques, reliant et caractérisant les structures anatomiques cérébrales, non seulement en surface mais aussi avec leur prolongement en profondeur. Enfin, la grande originalité du modèle proposé réside dans sa modélisation claire de l'anatomie sulco-gyrale tout en respectant des travaux théoriques antérieurs de nature ontologique. C'est aussi un modèle qui fait le compromis entre une modélisation rigoureuse et la représentation de cette dernière par un formalisme qui permet de pratiquer du raisonnement automatique basique. Cependant, la représentation en XML, réalisée par les auteurs, ne permet pas d'effectuer un raisonnement fructueux.

Implémentation du modèle La base de connaissances symboliques a été représentée en XML et consultable en HTML. La figure 2.17 présente deux fenêtres : sur la fenêtre de gauche est représentée la hiérarchie des concepts de l'anatomie sulco-gyrale, et sur la fenêtre de droite les descriptions de ces concepts. Il suffit pour l'utilisateur de sélectionner un concept à gauche pour que sa description détaillée, ainsi que ses relations avec les autres concepts soient affichées à droite. Ce mode de représentation (en HTML) est convivial pour un utilisateur humain, notamment dans la tâche de l'enseignement de l'anatomie sulco-gyrale et sa compréhension.

L'ontologie de *FMA* versus l'ontologie de *Dameron* Il est difficile de comparer la modélisation de l'anatomie dans le *Digital Anatomist FMA* et celle de *Dameron* pour la simple raison qu'elles ne se situent pas à la même échelle. *FMA* modélise l'anatomie de tout le corps humain de son niveau le plus élémentaire qui est la cellule à l'organisme tout entier, alors que l'étude de *Dameron* se focalise uniquement sur la modélisation des connaissances sur le cortex cérébral. Toutefois, si on compare les deux modélisations seulement sur l'anatomie sulco-gyrale, on constate que la modélisation de *Dameron* est plus complète, notamment par rapport à la définition des concepts anatomiques. Par contre elles sont proches sur le plan terminologique et taxonomique. C'est justement là que réside l'importance de l'ontologie *FMA* dont l'un des objectifs est de définir les concepts, la taxonomie et les relations nécessaires à la description de tous les organes, pour qu'ils soient repris dans des ontologies de l'anatomie plus spécialisées et plus détaillées.

2.2.3 Discussion des deux approches (basées image et basées concept)

Les supports traditionnels de la représentation des connaissances anatomiques (atlas papier et atlas informatisés) ont beaucoup apporté à la compréhension de la neuroanatomie, cependant elles souffraient de plusieurs limites relatives, entre autres, à la représentation, à la navigation, à l'évolution, au partage et à l'utilisation par des pro-

grammes informatiques. De plus, ils gèrent mal la variabilité anatomique inter-individuelle, et sont difficiles à mettre en correspondance avec les données d'imagerie d'un sujet ou d'un patient. Des améliorations sont alors apportées par une nouvelle génération d'atlas, les atlas probabilistes, notamment pour la représentation de la variabilité anatomique, et ce grâce à des modèles basés sur des études statistiques et mathématiques poussées. Cette nouvelle approche a gagné beaucoup d'intérêt au sein de la communauté de la neuroanatomie et de la neuroimagerie. Cependant, les connaissances ainsi représentées ne sont utilisables que par des applications très spécifiques et par des utilisateurs très connaisseurs de ces approches, ce qui limite leur utilisation à grande échelle. Les approches symboliques visent à définir un cadre cohérent d'intégration des ressources anatomiques, afin qu'elles soient utilisables dans différents contextes aussi bien par des humains que par des machines. Néanmoins, les premières approches symboliques, les approches terminologiques, souffraient de manque d'expressivité et de cohérence, et ne définissaient pas la sémantique des termes utilisés. Leur richesse et leur utilisation dans le raisonnement restent limitées, même avec des réalisations telles que *UMLS*, qui fédère plusieurs systèmes existants. Les ontologies, par leur aspect formel, rigoureux et riche en sémantique, ont été utilisées pour repousser ces limites. Des ontologies de l'anatomie ont été développées, l'ontologie de *FMA* pour l'anatomie de tout le corps humain et celle de *Dameron* pour l'anatomie sulco-gyrale en sont de bons exemples. Cependant, ces dernières, et malgré tous les avantages qu'elles présentent, se prêtent mal au raisonnement automatique, du fait de leur représentation inadéquate. Par ailleurs, les approches symboliques ne permettent pas une manipulation 3D des structures anatomiques telle que les atlas numériques le permettent. Cela crée un manque de concordance entre les informations perceptuelles que l'on peut extraire des images et leur description symbolique.

Compte tenu des avantages et limites de chacune des deux approches, nous croyons que la meilleure approche serait celle qui combine les atlas numériques avec les représentations symboliques. Ainsi, les connaissances seront décrites dans une ontologie formelle, avec une sémantique riche pour les concepts, et se basant sur des théories et principes solides et communément adoptés, permettant leur partage et leur utilisation aussi bien par des êtres humains que des programmes informatiques, et pouvant être complétées par des connaissances quantitatives issues d'atlas numériques.

Chapitre 3

Contribution : l'ontologie sulco-gyrale en OWL DL

Notre première contribution dans le cadre de la thèse consiste en une représentation formelle et partageable des connaissances anatomiques sulco-gyrales. Cela a été réalisé en deux étapes principales : la première étape consistait à étudier l'état de l'art relatif à la modélisation des connaissances neuroanatomiques, choisir les réalisations fondées sur des principes ontologiques, les analyser, les comparer, et créer une ontologie se basant sur les modélisations retenues, enfin compléter l'ontologie créée à partir d'autres ressources sur l'anatomie sulco-gyrale. La deuxième étape consistait à étudier les langages de représentation de connaissances dans le cadre du Web Sémantique, choisir celui qui permet une représentation qui soit, en même temps, partageable et exploitable par les outils de raisonnement, enfin représenter l'ontologie créée à la première étape avec le langage retenu.

La section 3.1 rappelle les motivations qui nous ont amenés à développer l'ontologie sulco-gyrale ; la section 3.2 énumère les défis à relever pour développer une telle ontologie ; la section 3.3 résume les sources qui ont servi à la modélisation de l'ontologie et justifie les choix effectués ; la section 3.4 détaille la structuration de l'ontologie et les relations méreologiques et topologiques qui relient les concepts de l'ontologie ; enfin, la section 3.5 décrit la représentation de l'ontologie avec le langage OWL DL ainsi les adaptations faites pour que cette représentation soit possible.

3.1 Introduction

Nous avons parlé de l'intérêt du partage, au sein de la communauté biomédicale, de connaissances neuroanatomiques complètes, cohérentes, réutilisables, consensuelles, facilement accessibles et détaillées. En effet, de ce partage résultent de nombreux bénéfices, notamment dans l'enseignement de l'anatomie et la facilitation de la collaboration entre les chercheurs. L'un des intérêts du partage de connaissances anatomiques sur le cortex cérébral est, en effet, de faciliter l'enseignement et la compréhension de l'anatomie du cerveau, en associant du sens aux images anatomiques. Hohne et al [101] par exemple ont développé un modèle de l'anatomie du cerveau utilisé dans l'enseignement en médecine, où la connaissance symbolique de haut niveau est reliée à un modèle voxelique d'un cerveau segmenté. Par ailleurs, les applications qui s'appuient sur les connaissances anatomiques peuvent communiquer entr'elles si ces connaissances sont représentées de manière uniforme et formelle. En effet, élaborer un modèle de l'anatomie qui soit indépendant des différents types d'applications qui y font référence a l'avantage de rendre plus simple la gestion et l'évolution des connaissances et de leur représentation. Cela permet également d'améliorer la cohérence sémantique entre les contextes applicatifs [53]. Enfin, la représentation des connaissances dans des modèles symboliques a le mérite de pouvoir caractériser les structures anatomiques aussi bien du niveau microscopique, telles que les neurones, que du niveau macroscopique telles que les structures composant le cerveau. Elle permet aussi d'établir un lien entre ces deux niveaux de granularité. Par exemple, un modèle symbol-

ique générique, formel et partageable, décrivant l'anatomie cellulaire du système nerveux, a été élaboré par Larson et al. [117].

Les technologies du Web Sémantique, dont on dispose aujourd'hui, constituent un moyen précieux pour la diffusion à grande échelle des connaissances sous forme d'ontologies. En effet, le langage OWL a été spécialement défini pour la représentation des ontologies dans le cadre du Web Sémantique. Il nous paraît alors judicieux d'exploiter ce langage pour représenter nos connaissances anatomiques. Par ailleurs, nous avons parlé de l'utilité de représenter les connaissances avec un langage formel, afin de permettre des raisonnements et des traitements automatiques sur ces dernières. OWL DL est une variante de OWL qui est basée sur une logique de description décidable et assez expressive. Nous avons donc choisi cette variante de OWL pour la représentation de notre ontologie. L'autre objectif de la thèse, qui motive la représentation des connaissances neuroanatomiques sous forme d'une ontologie formelle est de pouvoir l'utiliser dans un processus d'interprétation et d'annotation sémantique des entités anatomiques localisées dans des images IRM du cerveau. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons à l'annotation sémantique de l'anatomie sulco-gyrale surfacique, fournissant des repères anatomiques lors de la préparation des procédures chirurgicales en neurochirurgie. Par ailleurs, l'interprétation et la description du contenu anatomique des images du cerveau, basée sur une ontologie ayant une sémantique riche, est d'une grande importance pour l'intégration des données (images) et la recherche d'images par le contenu. Notre ontologie sulco-gyrale, ainsi que sa représentation, devraient alors répondre à ces différents objectifs.

3.2 Défis à relever

Les défis à relever sont nombreux. D'abord la modélisation des connaissances d'un domaine requiert une étude et une compréhension approfondie du domaine, une connaissance détaillée des réalisations déjà existantes et adoptées dans la communauté, ainsi que leurs avantages et leurs limites. Ceci suppose une collaboration avec les experts du domaine pour comprendre leurs besoins réels et déterminer avec eux la modélisation la plus pertinente pour les satisfaire. Cela ne suffit pas, il faut aussi suivre les évolutions des langages de représentation de connaissances et des capacités de raisonnement qu'ils offrent, afin de représenter l'anatomie sulco-gyrale de la meilleure manière qui soit, en tenant compte de sa spécificité relative à la variabilité inter-individuelle. L'autre défi est de pouvoir modéliser et représenter des connaissances qui soient, en même temps, assez génériques pour être partagées et pouvoir les utiliser dans des applications réelles afin de répondre à des besoins applicatifs en neuroimagerie.

Notre objectif était donc de tirer profit des travaux déjà réalisés en neuroanatomie, les confronter les uns aux autres, les compléter avec des experts et les représenter sous forme d'une ontologie écrite dans un langage du Web Sémantique basé sur une logique formelle.

Terminology							
Designation	Terminology	CUI	LUI	SUI	Anatomical continuity	Contiguous sulci	Contiguous structures
Angular Gyrus	UMLS						
Gyrus Angularis	NominaAnatomica				• Supramarginal Gyrus	• Intraparietal Sulcus	• Superior Parietal Gyrus by Intraparietal Sulcus
Gyrus Angulaire	NominaAnatomica						

FIG. 3.1: Définition du concept **Angular gyrus** dans la modélisation de Dameron.

3.3 Sources de modélisation

Les principales sources qui nous ont servi dans la modélisation des connaissances sulco-gyrales sont l'ontologie de *FMA* [173] et la modélisation de *Dameron* [53]. En effet, ce travail de thèse se situe dans le prolongement de celui accompli par Dameron [53]. L'approche suivie par ce dernier étant rigoureuse et respectant des principes ontologiques. Nous l'avons alors considérée comme une source de connaissances principale, nous avons repris les principaux concepts et relations définis dans [53] pour construire notre ontologie. La hiérarchie des concepts dans notre ontologie est donc très similaire à celle définie dans [53]. Cependant l'ontologie de Dameron n'était pas une source suffisante pour les raisons suivantes : 1) la liste des concepts n'était pas complète, par exemple **Inferior Occipital Gyrus** n'y est pas défini ; 2) et les définitions des concepts n'étaient pas disponibles pour une grande partie des sillons, et n'étaient pas adéquates pour un raisonnement impliquant toutes les caractéristiques topologiques et directionnelles des structures anatomiques sulco-gyrales, par exemple les relations directionnelles (qu'on appelle ici orientations) entre les différentes structures corticales n'étaient pas spécifiées dans la définition de beaucoup de concepts tels que **Diagonal Sulcus**. Pour toutes ces raisons nous avons été amenés à utiliser d'autres sources de connaissances sur l'anatomie du cortex cérébral. L'ontologie *FMA* [173] est aujourd'hui la principale ontologie de l'anatomie humaine. Son fondement sur des principes ontologiques solides et le consensus qu'elle réunit au sein de la communauté biomédicale nous ont amenés à la considérer comme un élément supplémentaire dans la modélisation de notre ontologie. De plus, la modélisation faite par Dameron s'est inspirée de *FMA*. Il nous a paru nécessaire de nous aligner sur *FMA*, au moins en adoptant la même terminologie, afin de nous assurer que notre ontologie offre un vocabulaire partagé.

Par ailleurs, *FMA* nous a permis de : 1) compléter la liste des concepts manquants dans l'ontologie de Dameron, par exemple **Polar Part Of Middle Frontal Gyrus** ; 2) définir des concepts qui ne figuraient pas dans l'ontologie de Dameron, par exemple **Angular gyrus** est défini dans la modélisation de Dameron uniquement par son voisinage (figure 3.1), sans donner les orientations par rapport aux structures voisines, alors que dans *FMA* on spécifie ces orientations (figure 3.2) ; 3) et enfin, *FMA* nous a fourni des définitions

intéressantes des relations méréotopologiques telles que les relations attribuées qui modélisent les relations d'orientation entre deux structures anatomiques voisines (figure 3.2).

related object	coordinate	laterality
Posterior part of superior temporal gyrus	Anterior	
Posterior part of middle temporal gyrus	Inferior	
Superior occipital gyrus	Posterior	
Supramarginal gyrus	Anterior	
Superior parietal lobule	Superior	

FIG. 3.2: Une partie de la définition du concept *Angular gyrus* dans *FMA*.

Cependant, dans *FMA* on ne définit que les gyri, aucune définition n'a été attribuée aux sillons. C'est donc une source qui nous a aidés à améliorer le contenu de l'ontologie de Dameron, mais qui n'était pas suffisante. On a alors été amenés à considérer d'autres sources qui pourraient nous aider à compléter notre ontologie. L'atlas de Ono [152] s'est avéré d'une grande utilité, étant donné qu'il est spécialisé dans l'étude des sillons du cortex cérébral, et que les définitions de ces derniers n'étaient disponibles ni dans la modélisation de Dameron ni dans *FMA*. L'atlas de Ono nous a permis alors de compléter considérablement notre ontologie. Enfin, la collaboration étroite avec un expert, neurochirurgien et professeur en anatomie, nous a été très utile. Son aide était précieuse dans l'analyse de *FMA*, dans la compréhension des besoins réels en termes d'anatomie et dans la façon de représenter les connaissances neuroanatomiques afin que le processus de l'annotation de l'anatomie sulco-gyrale réponde au mieux aux attentes cliniques.

3.4 Les différents éléments de l'ontologie

La taxonomie des concepts dans notre ontologie est proche de celle de *FMA* et de la modélisation de Dameron. Cependant, et comme cela a déjà été mentionné, notre ontologie doit pouvoir être utilisée pour l'annotation de structures anatomiques localisées dans des images IRM du cerveau, et extraites par des outils d'imagerie. Par conséquent, des concepts spécifiques à l'application devraient être utilisés pour décrire les structures mises en jeu dans les images. Or, ces concepts ne sont pas forcément génériques, c'est-à-dire utiles quelle que soit l'application, et leurs appellations peuvent différer d'une application à une autre. Par conséquent, et afin d'être conforme au principe du partage de connaissances, nous avons séparé les concepts applicatifs des concepts génériques, et nous les avons représentés dans deux ontologies différentes : la première est appelée "ontologie applicative" et la seconde "ontologie partageable" ou "générique". L'ontologie applicative hérite de l'ontologie partageable afin de relier les concepts applicatifs aux concepts anatomiques génériques dont la sémantique est très riche.

3.4.1 Hiérarchie des concepts

La figure 3.3 montre la hiérarchie des concepts anatomiques de notre ontologie. Elle est construite sur la relation de subsumption entre les concepts. Tous les concepts sont subsumés par le concept AE (**Anatomical Entity**). Ensuite les concepts représentant des structures anatomiques constituées de matière (qui ont une existence physique), tels que les gyri, sont subsumés par le concept MAE (**Materiel Anatomical Entity**). Les concepts représentant des structures anatomiques n'ayant pas d'existence physique, c'est-à-dire qui ne sont pas constituées de matière, tels que les sillons, sont subsumés par le concept NMAE (**Non Material Anatomical Entity**).

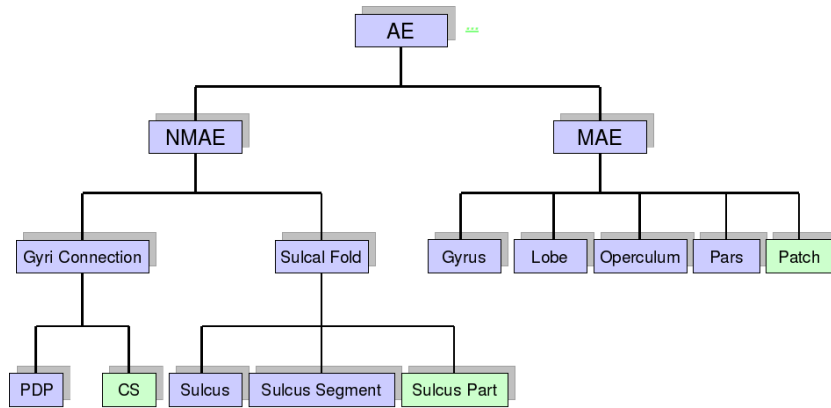


FIG. 3.3: Hiérarchie des concepts dans l'ontologie sulco-gyrale.

Nous avons utilisé deux couleurs sur la figure 3.3 : les concepts dans les rectangles violets sont ceux de l'ontologie partageable. Ils décrivent les structures anatomiques du cortex cérébral pour lesquels les termes et les définitions réunissent un certain consensus dans la communauté. Ce sont principalement : **Gyrus**, **Lobe**, **Operculum**, **Sulcus** et **PlidePassage**. Les nouvelles classes ajoutées à l'ontologie partageable, c'est-à-dire qui n'étaient pas définies dans les ontologies exploitées pour construire notre ontologie partageable, sont les suivantes :

- **Pars** : les sous concepts de cette classe permettent de définir les différentes régions d'une structure anatomique. Cela permet de définir l'anatomie sulco-gyrale avec un niveau de détail plus fin et de distinguer les différentes zones fonctionnelles localisées dans une même structure anatomique. Par exemple le gyrus postcentral peut être décomposé en deux régions : le gyrus postcentral supérieur et le gyrus postcentral inférieur. Ces régions sont appelées *Pars* ;
- **SulcusSegment** : de la même manière que pour les *Pars*, les segments de sillons définissent les différentes parties d'un sillon. Par exemple le sillon précentral est

composé de trois segments : le sillon précentral supérieur, le sillon précentral intermédiaire et le sillon précentral inférieur.

Les concepts dans les rectangles verts sont ceux de l'ontologie applicative, spécifiques à notre application d'annotation des structures anatomiques sulco-gyrales. Ils représentent les entités anatomiques qu'on extrait des images du cerveau :

- **Patch** : un patch (figure 3.4) correspond à une délimitation surfacique d'une partie d'un gyrus ou d'une partie d'un pars. Il est extrait par des outils automatiques, en interaction avec l'utilisateur, à partir d'une image IRM du cerveau ;
- **SulcusPart** : un sulcus part (figure 3.4) correspond à une partie d'un sillon ou une partie d'un segment de sillon. Il est également extrait automatiquement par des outils numériques de l'imagerie ;
- **ConventionalSeparation** : une séparation conventionnelle (figure 3.4) est une séparation fictive définie par l'utilisateur pour séparer deux parties d'un gyrus ou couper un pli de passage. Un patch est délimité par un ensemble de séparations conventionnelles et de parties de sillons.

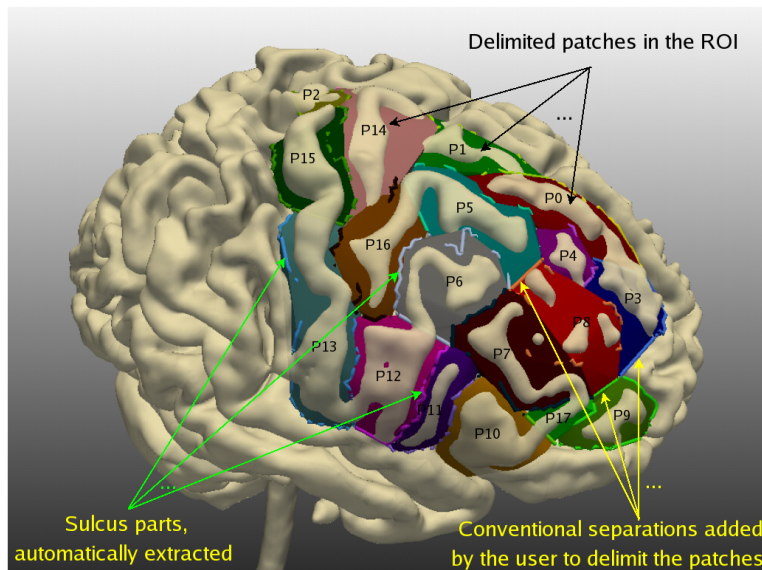


FIG. 3.4: Illustration des concepts de l'ontologie applicative : Patch, SulcusPart et ConventionalSeparation.

Dans l'ontologie partageable les structures anatomiques sont définies par leurs relations méréotopologiques, d'orientation, de continuité et de composition avec leur voisinage. Un gyrus par exemple est défini par les sillons qui le bordent, le lobe auquel il appartient, les structures anatomiques avec lesquelles il est contigu, etc. L'ensemble des relations utilisées

pour relier les concepts de l'ontologie seront détaillées dans la section 3.4.2.

En revanche, dans l'ontologie applicative les entités anatomiques sont définies essentiellement par leur relations topologiques et d'orientation avec leur voisinage. En effet, dans le cadre de l'application d'annotation, le raisonnement porte sur les instances extraites des images du cerveau, c'est-à-dire les entités anatomiques définies dans l'ontologie applicative. Les relations de voisinage et d'orientation, qui relient ces instances, sont facilement calculables par les programmes numériques, et sont suffisantes pour contraindre le processus d'annotation à converger rapidement vers une solution.

Dans notre ontologie sulco-gyrale (ontologie applicative et ontologie partageable) nous avons défini, pour chaque hémisphère, 49 concepts pour les gyri, 3 operculum, 17 pars de gyri, 44 sillons, 44 parties de sillons, ainsi que les relations dont une partie est définie ci-dessous.

3.4.2 Les relations méréotopologiques de l'ontologie

La définition des relations méréotopologiques de l'ontologie s'est basée sur les définitions données dans [80]¹. Il est toujours difficile de modéliser et de formaliser les relations méréotopologiques et spatiales entre les structures anatomiques du cerveau, étant donné leur variabilité. Cependant, leur formalisation est nécessaire pour, d'une part, pouvoir les utiliser dans des raisonnements automatiques, et de l'autre part faciliter leur compréhension et leur représentation.

Le tableau sur la figure 3.5 résume les différentes relations méréologiques utilisées pour relier les concepts anatomiques dans l'ontologie. Il s'agit de relations binaires, c'est-à-dire qui relient uniquement deux concepts anatomiques. Pour chaque relation on définit : son domaine ; à savoir les concepts qui constituent l'ensemble de départ de la relation ; son codomaine (ou range) qui constitue l'ensemble d'arrivée de la relation ; sa relation inverse, et ses autres caractéristiques telles que la transitivité, la symétrie, etc.

Mereological Properties							
Property	domain	range	inverse	transitive	symmetric	functional	inverse functional
hasAnatomicalPart	MAE	MAE	isAnatomicalPartOf	yes	no	no	no
►hasDirectAnatomicalPart	MAE	MAE	►isDirectAnatomicalPartOf	no	no	no	yes
hasSegment	SF	SF	isSegmentOf	yes	no	no	no
►hasDirectSegment	SF	SF	►isDirectSegmentOf	no	no	no	yes

FIG. 3.5: Les principales relations méréologiques définies dans l'ontologie et leurs caractéristiques.

¹<http://idm.univ-rennes1.fr/~obierlai/>

De même, les relations topologiques sont résumées dans le tableau sur la figure 3.6. Là aussi on définit pour chaque relation son domaine, son co-domaine et ses principales caractéristiques.

Topological Properties							
Binary relations	domain	range	Inverse	transitive	symmetric	functional	inverse functional
isMAEBoundedBy	MAE	(SF GyriConnection)	MAEBounds	no	no	no	no
isSFBoundedBy	SF	SulciConnection	SFBounds	no	no	no	no
isInterruptedBy	SF	(PliDePassage Operculus)	interrupts	no	no	no	no
isMAEConnectedTo	MAE	MAE	no	no	yes	no	no
isSFConnectedTo	SF	SF	no	no	yes	no	no
isMAEContiguousTo	MAE	MAE	no	no	yes	no	no
isSFContiguousTo	SF	SF	no	no	yes	no	no

FIG. 3.6: Les principales relations topologiques définies dans l'ontologie et leurs caractéristiques.

D'autres relations spatiales ont été définies, notamment les relations d'orientation *anteriorTo*, *posteriorTo*, *inferiorTo*, *superiorTo*, *medialTo* et *lateralTo* entre les structures anatomiques voisines. Ces relations d'orientation représentent une connaissance importante, et discriminante lors du raisonnement lorsqu'elles sont combinées avec les autres relations méréotopologiques. Par exemple, il est plus facile de reconnaître une partie du sillon central lorsqu'on sait qu'elle borde une partie du gyrus précentral postérieurement, que lorsqu'on sait seulement qu'elle borde une partie du gyrus précentral, parce que plusieurs autres sillons peuvent border le gyrus précentral, tels que le sillon précentral, alors que seulement le sillon central le borde postérieurement. Les relations d'orientation ont comme domaine et co-domaine des entités anatomiques, gyri et sillons, et ne sont pas transitives étant donné le caractère approximativement sphérique du cerveau.

Les principales relations reliant les concepts dans l'ontologie et ce qu'elles représentent concrètement sont illustrées sur la figure 3.7.

✓ La relation *isMAEBoundedBy* relie une entité matérielle anatomique et des sous classes de *Sulcal Fold*. Lors de la description des instances mises en jeu dans une image, cette relation relie une instance de *Patch* et une instance de *Sulcus Part* ou d'une *Conventional Separation*. Le schéma (b) sur la figure 3.7 illustre deux exemples d'utilisation de la relation *isMAEBoundedBy*, afin d'exprimer par exemple que deux entités anatomiques, *MAE1* et *MAE2*, séparées par une séparation conventionnelle sont bordées par cette dernière, ou encore pour exprimer qu'une entité anatomique matérielle *MAE* est bordée par une instance d'une sous classe de *Sulcal Fold*. L'image (a) sur la figure 3.7 montre l'utilisation de la même relation pour décrire les instances extraites des images, afin d'exprimer par

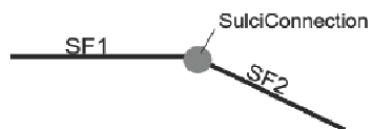
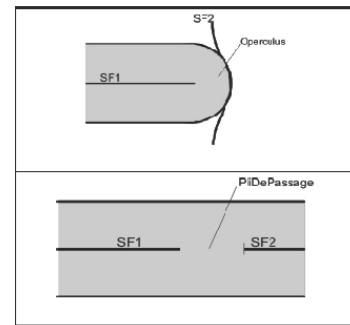
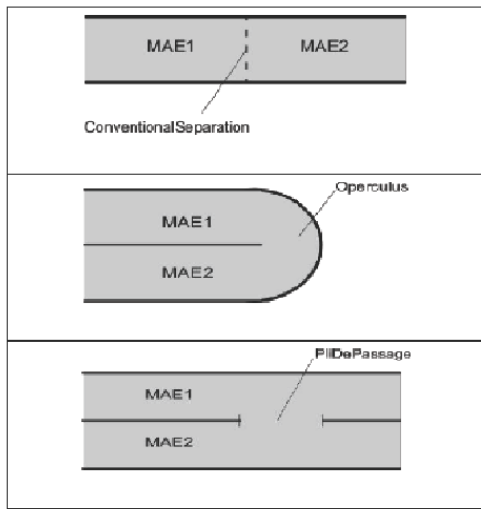
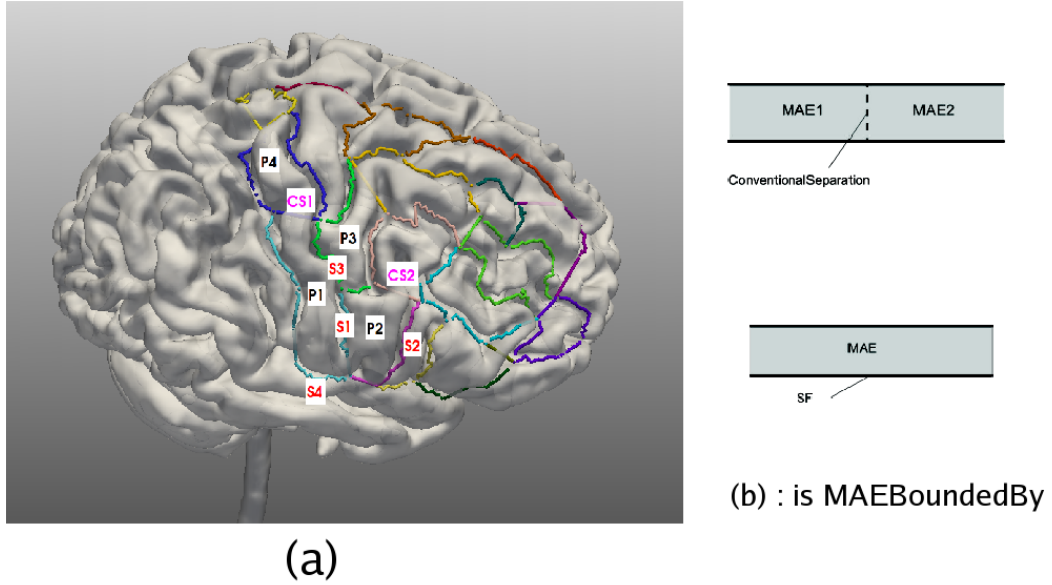


FIG. 3.7: Différents schémas explicitant la sémantique des relations de l'ontologie.

exemple que le patch *P1* est bordé par la partie de sillon *S1* et la séparation conventionnelle *CS1*. La relation inverse de **isMAEBoundedBy** est **MAEBounds** : **isMAEBoundedBy** = **MAEBounds**⁻¹. **MAEBounds** est utilisé dans l'ontologie, par exemple, dans la définition du sillon central, pour exprimer le fait que ce dernier borde le gyrus précentral et le gyrus postcentral.

✓ La relation **isMAEConnectedTo** exprime que deux entités anatomiques matérielles sont connectées. On dit que deux entités anatomiques matérielles *MAE1* et *MAE2* sont connectées si elles sont séparées par une séparation conventionnelle, ou réunies par un operculus ou un pli de passage (schéma (c) figure 3.7). La même relation est utilisée pour exprimer la connectivité entre les instances de patches extraits d'une image. Par exemple sur la figure 3.7 (image (a)) les patches *P1* et *P2* sont connectés car ils sont réunis par un operculus. Dans l'ontologie **isMAEConnectedTo** est utilisée pour exprimer, par exemple, le fait que le gyrus précentral est connecté avec le gyrus postcentral.

✓ La relation **isSFContiguousTo** exprime que deux Sulcal Fold sont contigus. On dit que deux Sulcal Fold *SF1* et *SF2* sont contigus s'ils sont séparés par un pli de passage ou réunis par un operculus (schéma (d), figure 3.7). La même relation est utilisée pour exprimer que des parties de sillons et des séparations conventionnelles sont contiguës, par exemple les parties de sillons *S1* et *S4* (image (a) sur la figure 3.7) sont contiguës car elles sont séparées par un pli de passage. Dans l'ontologie **isSFContiguousTo** est utilisée pour exprimer, par exemple, le fait que le sillon central est contigu avec le sillon latéral.

✓ La relation **isSFConnectedTo** exprime que deux Sulcal Fold sont connectés. On dit que deux Sulcal Fold *SF1* et *SF2* sont connectés s'ils partagent une Sulci Connection, appelée aussi point de jonction (schéma (e), figure 3.7). La même relation est utilisée pour exprimer que des parties de sillons et des séparations conventionnelles sont connectées entr'elles, par exemple les parties de sillons *S1* et *S3*, la partie de sillon *S2* et la séparation conventionnelle *CS2* (image (a) sur la figure 3.7) sont connectées car elles partagent des points de jonction. **isSFConnectedTo** est utilisée dans l'ontologie pour exprimer, par exemple, le fait que la partie inférieure du sillon précentral est connectée au sillon latéral.

✓ La relation **isMAEContiguousTo** exprime que deux entités anatomiques matérielles sont contiguës. On dit que deux entités anatomiques matérielles *MAE1* et *MAE2* sont contiguës si elles sont séparées par un Sulcal Fold (schéma (f), figure 3.7). La même relation est utilisée pour exprimer la contiguité entre les instances de patches extraits d'une image. Par exemple les patches *P2* et *P3* (image (a) sur la figure 3.7) sont contigus car ils sont séparés par des parties de sillons, et un sillon est une sous classe de Sulcal Fold dans l'ontologie. **isMAEContiguousTo** est utilisée dans l'ontologie pour exprimer, par exemple, le fait que le gyrus précentral est contigu au gyrus postcentral.

Les relations expliquées sur les différents schémas de la figure 3.7 sont une partie des relations génériques relatives à la neuroanatomie. D'autres relations sont définies dans l'ontologie applicative, qui sont moins génériques, telles que la relation **partOf** dont le

domaine et le co-domaine sont des entités anatomiques matérielles ; celle-ci est utilisée pour exprimer le fait qu'une entité anatomique matérielle est partie d'une autre entité matérielle. Elle est notamment utilisée pour exprimer le fait qu'un patch fait partie d'un gyrus particulier.

3.4.3 Modélisation et représentation de la variabilité anatomique sulco-gyrale

L'un de nos objectifs était aussi de proposer une modélisation et une représentation adéquates de la variabilité anatomique sulco-gyrale inter-individuelle. Pour ce faire, nous avons exploité les différents opérateurs des logiques de description (l'opérateur ET (intersection) = AND, l'opérateur OU (union) = OR, l'opérateur SAUF (exclusion) = NOT, etc.). En effet, la variabilité anatomique concerne les sillons, et donc les gyri, étant donné que les gyri sont délimités par les sillons. Par exemple, deux sillons sur le cortex peuvent être connectés chez certains individus et contigus chez d'autres. Nous avons considéré que dans le cas général, les deux situations peuvent se présenter, et nous les avons donc prises en compte toutes les deux dans la modélisation. Ceci est fait grâce aux constructeurs d'union ($\sqcup$) et d'intersection ($\sqcap$) des logiques de description. Par exemple le sillon `RightAscendingRamus` est connecté, chez certains individus, avec les sillons `RightHorizontalRamus` et `RightInferiorFrontalSulcus`, et il est contigu avec ces derniers chez d'autres individus. Cela peut être représenté en logiques de description comme suit :

```

RightAscendingRamus  $\sqsubseteq$  Sulcus  $\sqcap$ 
  ( $\exists$  isSFConnectedTo.RightHorizontalRamus  $\sqcup$ 
    $\exists$  isSFContiguousTo.RightHorizontalRamus)  $\sqcap$ 
  ( $\exists$  isSFConnectedTo.RightInferiorFrontalSulcus  $\sqcup$ 
    $\exists$  isSFContiguousTo.RightInferiorFrontalSulcus)  $\sqcap$ 
   $\exists$  inferiorTo.RightInferiorFrontalSulcus  $\sqcap$ 
   $\exists$  posteriorTo.RightHorizontalRamus  $\sqcap$ 
  ...

```

Parfois aussi, un sillon peut être composé d'un certain nombre de segments de sillons, sans que ce nombre soit le même chez tous les individus. C'est le cas par exemple du sillon `RightPreCentralSulcus`, qui est en deux parties (`RightSuperiorPreCentralSulcus` et `RightInferiorPreCentralSulcus`) chez certains individus et en trois parties chez d'autres individus (`RightSuperiorPreCentralSulcus`, `RightIntermediatePreCentralSulcus` et `RightInferiorPreCentralSulcus`). Ceci peut être exprimé, en logiques de description, en utilisant les restrictions de cardinalités ($\leq$, $\geq$, $=$) comme suit :

```

RightPreCentralSulcus ⊆ Sulcus ⊓
  ((⊓ hasSegment.RightSuperiorPreCentralSulcus ⊓
    ⊓ hasSegment.RightInferiorPreCentralSulcus) ⊔
   (⊓ hasSegment.RightSuperiorPreCentralSulcus ⊓
    ⊓ hasSegment.RightInferiorPreCentralSulcus ⊓
    ⊓ hasSegment.RightIntermediatePreCentralSulcus)) ⊓
  ≥ 2 hasSegment ⊓
  ≤ 3 hasSegment ⊓
  ...

```

Dans chaque définition de concept, une étude des propriétés relatives aux structures représentées, tenant compte de leur variabilité, est d'abord effectuée, ensuite une formalisation adéquate, en logiques de description, est exprimée. Par ailleurs, les logiques de description ont été utiles pour définir les concepts d'une manière complète. Par exemple, elles ont servi pour exprimer le fait que le sillon `RightCentralSulcus` ne borde que les gyri `RightPreCentralGyrus` et `RightPostCentralGyrus`, et cela en utilisant le quantifieur universel ($\forall$) comme suit :

```

RightCentralSulcus ⊆ Sulcus ⊓
  (⊓ MAEBounds.RightPreCentralGyrus ⊓
   ⊓ MAEBounds.RightPostCentralGyrus) ⊓
  = 2 MAEBounds ⊓
  ∀ MAEBounds.(RightPreCentralGyrus ⊔ RightPostCentralGyrus) ⊓
  ...

```

3.4.4 Connaissances exprimées sous forme de règles

Les règles sont d'abord utilisées pour exprimer les dépendances entre les propriétés de l'ontologie. Nous donnons ci-dessous deux exemples d'utilisation de règles, qui expriment ce que les logiques de description ne peuvent pas exprimer :

✓ relations entre les propriétés de l'ontologie, afin par exemple d'exprimer que deux entités anatomiques sont connectées lorsqu'elles partagent une bordure commune. Cela peut être formalisé et représenté par la règle suivante : $isMAEBoundedBy(?x1, ?x3) \wedge isMAEBoundedBy(?x2, ?x3) \wedge MAE(?x1) \wedge MAE(?x2) \wedge GyriConnection(?x3) \rightarrow isMAEConnectedTo(?x1, ?x2)$.

✓ les relations "partie-tout" jouent un rôle central en anatomie. Plusieurs relations "partie-tout" sont définies dans l'ontologie, par exemple `hasAnatomicalPart`, `hasSegment`, et qui ont des sémantiques différentes. Les règles sont alors utilisées pour fournir une sémantique pour les différentes relations "partie-tout", ainsi que pour la propagation de certaines propriétés topologiques. La règle suivante illustre un cas de propagation : $separatesMAE(?y, ?x2, ?x3) \wedge hasSegment(?x1, ?y) \wedge Sulcus(?x1) \wedge MAE(?x2) \wedge MAE(?x3) \wedge SF(?y) \rightarrow separatesMAE(?x1, ?x2, ?x3)$. A noter que certaines propagations de propriétés peuvent être exprimées directement dans l'ontologie, par exemple en spécifiant que

$P \circ Q \subset P$, où P et Q sont des rôles. Cependant, ce type de propagation (composition de rôles) ne suffit pas pour exprimer toutes les dépendances requises entre les propriétés.

Une liste complète de règles, étendant notre ontologie sulco-gyrale, est disponible sur le lien suivant : <http://idm.univ-rennes1.fr/~obierlai/annexes.pdf>. Par ailleurs, d'autres règles moins génériques, c'est-à-dire spécifiques au raisonnement utilisé pour l'annotation, sont définies et seront abordées en détail dans le chapitre 5.

3.5 Représentation en OWL DL

Pour la représentation de notre ontologie sulco-gyrale et des règles qui lui sont associées, nous avons choisi des langages standards du Web, basés sur la logique du premier ordre, qui permettent le partage et qui gardent de bonnes propriétés de raisonnement, en particulier la décidabilité des algorithmes de raisonnement. Les langages en question sont, d'une part, OWL DL pour la représentation de l'ontologie, et de l'autre part SWRL pour la représentation des règles. Ces dernières consistent en des règles de *Horn* sans fonctions. Elles étendent l'ontologie et l'enrichissent en permettant de propager des relations et d'inférer de nouveaux faits à partir de ceux existants, tel que c'est expliqué dans la section 3.4.4. L'ensemble des connaissances, c'est-à-dire l'ontologie et les règles, ont été éditées, respectivement, avec le logiciel Protégé et le plugin SWRL. Ces derniers offrent des interfaces conviviales, permettant d'entrer facilement : les noms des concepts, les noms des relations, les domaines, les co-domaines et les caractéristiques des relations, les axiomes qui définissent les concepts ainsi que les règles. Ils permettent aussi de naviguer facilement dans l'ontologie et les règles, et facilitent leur compréhension. Enfin, le code OWL DL de l'ontologie et le code SWRL des règles sont automatiquement générés dans un seul fichier qui a l'extension *.OWL*.

3.5.1 Représentation de l'ontologie

Aussi bien l'ontologie applicative que l'ontologie partageable sont représentées en OWL DL. L'ontologie applicative importe l'ontologie partageable, afin de référencer ses concepts, grâce à la propriété `IMPORTS` offerte par OWL.

La figure 3.8 est une capture d'écran de l'ontologie partageable éditée sous Protégé. On remarque que les définitions des concepts comprennent de nombreux axiomes. Dans l'ontologie partageable toutes les informations concernant un concept et ses relations méro-topologiques avec ses voisins sont représentées. Les concepts sont classés selon la taxonomie définie précédemment. Une structure anatomique de l'hémisphère droit est définie différemment, dans l'ontologie, que la même structure de l'hémisphère gauche, afin de tenir compte des asymétries existantes entre les deux hémisphères. On remarque aussi qu'on peut exprimer le fait que des concepts sont disjoints. En effet, il est particulièrement intéressant

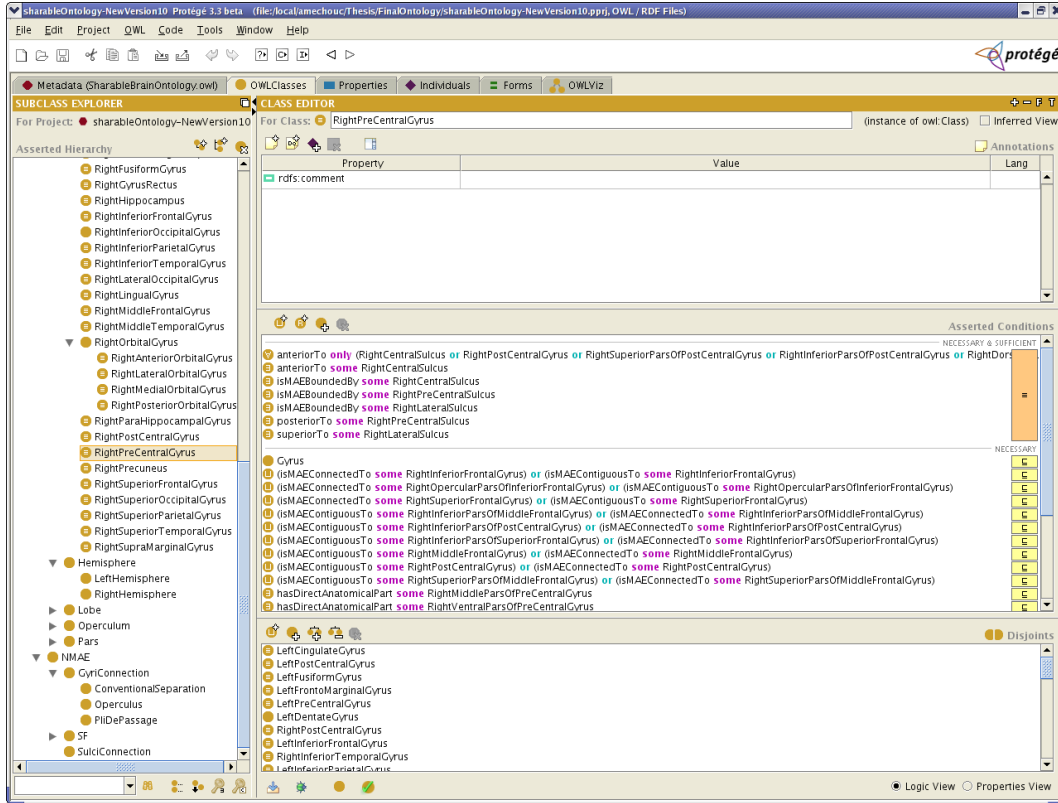


FIG. 3.8: L'ontologie partageable éditée sous Protégé.

d'exprimer la disjonction entre les classes d'entités, telles que les différents gyri de la classe **Gyrus**, car il n'est pas possible, par exemple, d'avoir une instance qui soit en même temps un gyrus précentral et un gyrus postcentral.

La figure 3.9 montre une représentation en OWL d'un fragment de l'ontologie applicative. Le code contenu dans le rectangle rouge indique que l'ontologie applicative va importer l'ontologie spécifiée dans `rdfs:resource`, c'est-à-dire l'ontologie dont l'espace de nom (namespace) est <http://www.owl-ontologies.com/anatomy.owl>, qui désigne dans notre cas l'ontologie partageable. Le code contenu dans le rectangle jaune correspond à la création, en OWL, de la classe dont l'identifiant est `LeftAnteriorSubCentralSulcusPart`. La création de classes en OWL est faite grâce au constructeur `owl:Class`. On observe aussi que la classe `LeftAnteriorSubCentralSulcusPart` est une sous classe de `SulcusPart`. Ceci est spécifié en OWL grâce au constructeur `rdfs:subClassOf`.

La figure 3.10 montre la définition du sillon `RightAscendingRamus`, correspondant à sa formalisation en logiques de description faite à la section 3.4.3. On peut observer les

```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF
  xmlns="http://www.owl-ontologies.com/Ontology1174981816.owl#"
  xmlns:j.0="http://www.w3.org/2003/11/swrl#"
  xmlns:protege="http://protege.stanford.edu/plugins/owl/protege#"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xmlns:brain="http://www.owl-ontologies.com/anatomy.owl#"
  xml:base="http://www.owl-ontologies.com/Ontology1174981816.owl">
  <owl:Ontology rdf:about="">
    <owl:imports rdf:resource="http://www.owl-ontologies.com/anatomy.owl"/>
  </owl:Ontology>
  <owl:Class rdf:ID="LeftAnteriorSubCentralSulcusPart">
    <rdfs:subClassOf>
      <owl:Class rdf:ID="SulcusPart"/>
    </rdfs:subClassOf>
  </owl:Class>

```

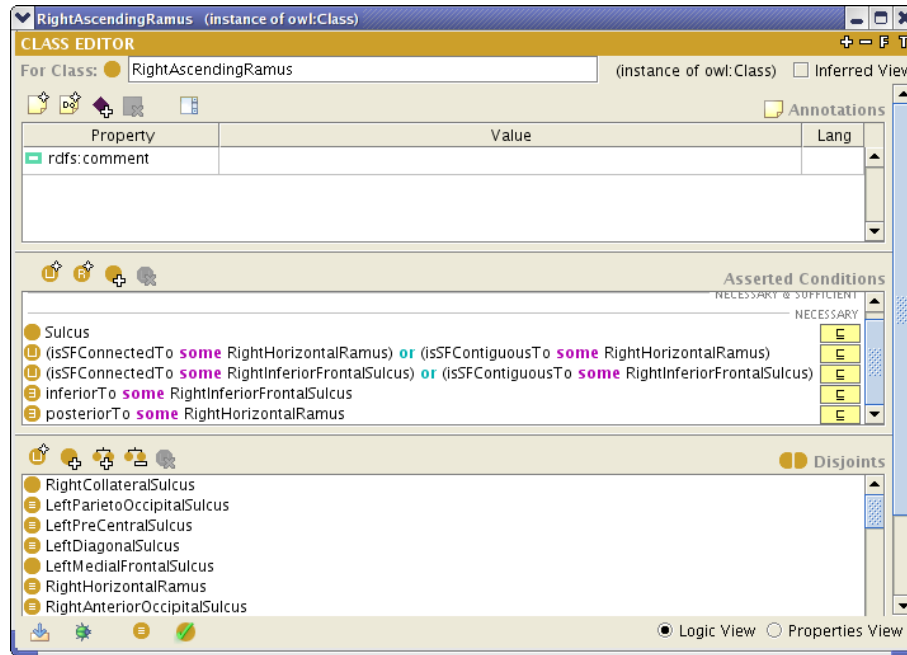
FIG. 3.9: Importation d'ontologies et création de classes en OWL.

conditions nécessaires qui définissent la classe décrivant ce sillon, les classes qui sont disjointes avec cette dernière, etc. La représentation en OWL correspondant à cette définition est rapportée sur la figure 3.11.

Dans la représentation en OWL de *RightAscendingRamus* (figure 3.11) on voit que la classe qui décrit ce sillon est d'abord référencée. Ceci correspond au code OWL suivant : `<owl:Class rdf:about=""#RightAscendingRamus">`. Ensuite on trouve la définition de la classe : la représentation de la disjonction avec les autres classes en utilisant le constructeur OWL `<owl:disjointWith>`, la représentation des différents axiomes en utilisant les différents constructeurs de OWL, tels que les restrictions `<owl:Restriction>` et l'union `owl:unionOf`, ainsi que les relations et les classes de l'ontologie. On remarque aussi que les relations sont créées en OWL en utilisant le constructeur `owl:ObjectProperty`. Les propriétés des relations sont également représentées, par exemple la symétrie est représentée en utilisant `owl:SymmetricProperty`. La fin de la définition de la classe est indiquée par `</owl:Class>`.

3.5.2 Limites de représentation de connaissances en OWL DL

La représentation des connaissances symboliques en OWL DL impose quelques contraintes et restrictions, inhérentes au formalisme des logiques de description. En effet, les relations doivent être binaires. Cependant, notre application d'annotation a besoin de relations ternaires telles que la relation de bordure qui relie trois entités : la première entité est bordée par la deuxième entité et la troisième exprime l'orientation avec laquelle la deuxième entité borde la première. En effet, cette relation d'orientation n'existe que si la bordure existe. Afin de transformer les relations ternaires en relations binaires, nous avons

FIG. 3.10: Edition sous Protégé de la définition du sillon `RightAscendingRamus`.

eu recours à la réification classique². Elle consiste en l'introduction d'un nouveau concept `AttributedEntity` ayant deux propriétés `has_entity` et `has_orientation` qui désignent respectivement le patch et l'orientation impliqués.

La figure 3.12 montre un exemple de réification transformant la relation `bounds` en une relation binaire ; son domaine est le concept `SulcusPart`, et son co-domaine est la classe attribuée `AttributedEntity` qui, elle, pointe les classes `Patch` et `Anterior`.

3.5.3 Cohérence de l'ontologie

En plus de s'être basée sur des sources de modélisation solides, notre ontologie a été développée en collaboration avec un expert neuroanatomiste. Cela suppose qu'elle ne représente pas d'incohérences relatives à la modélisation de l'anatomie. Par ailleurs, sa représentation en OWL DL a permis de vérifier sa cohérence formelle en utilisant un raisonneur en logiques de description. Nous avons donc utilisé le raisonneur KAON2 pour vérifier la cohérence de notre ontologie et nous assurer que toutes les relations sont correctement utilisées dans la description des concepts neuroanatomiques. En effet, KAON2 peut être lancé par la commande suivante : `java -cp kaon2.jar org.semanticweb.kaon2.server.ServerMain`

²<http://www.w3.org/TR/swbp-n-aryRelations/>

```

<owl:Class rdf:about="#RightAscendingRamus">
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#RightAngularSulcus"/>
  </owl:disjointWith>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#LeftSuperiorFrontalSulcus"/>
  </owl:disjointWith>
  ...
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty>
        <owl:ObjectProperty rdf:about="#inferiorTo"/>
      </owl:onProperty>
      <owl:someValuesFrom>
        <owl:Class rdf:about="#RightInferiorFrontalSulcus"/>
      </owl:someValuesFrom>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Class rdf:about="#Sulcus"/>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Restriction>
          <owl:someValuesFrom>
            <owl:Class rdf:about="#RightHorizontalRamus"/>
          </owl:someValuesFrom>
        </owl:Restriction>
        <owl:onProperty>
          <owl:SymmetricProperty rdf:about="#isSFConnectedTo"/>
        </owl:onProperty>
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty>
            <owl:SymmetricProperty rdf:about="#isSFContiguousTo"/>
          </owl:onProperty>
          <owl:someValuesFrom>
            <owl:Class rdf:about="#RightHorizontalRamus"/>
          </owl:someValuesFrom>
        </owl:Restriction>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

```

<owl:Class rdf:about="#RightHorizontalRamus"/>
  <owl:someValuesFrom>
    <owl:Restriction>
      <owl:unionOf>
        <owl:Class>
          <rdfs:subClassOf>
            <owl:Class>
              <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
                <owl:Restriction>
                  <owl:onProperty>
                    <owl:SymmetricProperty rdf:about="#isSFConnectedTo"/>
                  </owl:onProperty>
                  <owl:someValuesFrom>
                    <owl:Class rdf:about="#RightInferiorFrontalSulcus"/>
                  </owl:someValuesFrom>
                </owl:Restriction>
                <owl:Restriction>
                  <owl:someValuesFrom>
                    <owl:Class rdf:about="#RightInferiorFrontalSulcus"/>
                  </owl:someValuesFrom>
                </owl:Restriction>
                <owl:Class rdf:about="#RightHorizontalRamus"/>
              </owl:unionOf>
            </owl:Class>
          </owl:someValuesFrom>
        </owl:Restriction>
        <owl:SymmetricProperty rdf:about="#isSFContiguousTo"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:someValuesFrom>
        <owl:Class rdf:about="#RightHorizontalRamus"/>
      </owl:someValuesFrom>
    </owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:ObjectProperty rdf:about="#posteriorTo"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:Restriction>
      <owl:someValuesFrom>
        <owl:Class rdf:about="#RightHorizontalRamus"/>
      </owl:someValuesFrom>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

FIG. 3.11: Représentation en OWL de la définition du sillon `RightAscendingRamus`.

-registry -rmi -ontologies server_root -dig -digport 8088³, qui permet de lancer KAON2 sur le port 8088, et de spécifier ensuite ce dernier sous Protégé afin de vérifier la cohérence d'une ontologie représentée dans la logique de description $\mathcal{SHIQ}(\mathcal{D})$.

3.5.4 Représentation des règles

Les règles sont représentées en SWRL et éditées sous le plugin SWRL de Protégé. Par exemple la règle sur la figure 3.13 (à gauche) exprime que si un patch p est bordé par une entité attribuée ae , et que cette dernière a comme entité une partie de sillon sp , alors on infère que p est bordé également par sp . Des fragments du code SWRL correspondant à cette règle sont rapportés sur la figure 3.13 (à droite). On voit que la règle décrite est d'abord référencée par `<j.0 :Imp rdf :ID="Rule-9" >`. Ensuite le corps de la règle est décrit et représenté entre les balises `<j.0 :body>` et `</j.0 :body>` en utilisant les différentes variables et relations impliquées dans la règle. Enfin, la tête de la règle est représentée entre les balises `<j.0 :head>` et `</j.0 :head>`. La fin de la règle est représentée par `</j.0 :Imp>`.

³<http://semantic.nodix.net/2005/11/kaon2\discretionary{-}{-}{-}and\discretionary{-}{-}{-}protege.html>

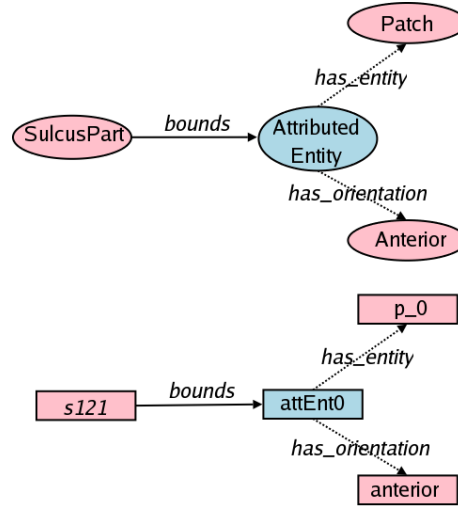


FIG. 3.12: Un exemple de réification de classes et d'instances, respectivement.

3.6 Approches similaires en neuroimagerie

Un travail remarquable est en cours de réalisation à l'université de Californie dans le cadre du projet *CCDB* (Cell Centered Database) ⁴, une ressource en ligne pour la diffusion de données provenant de l'imagerie microscopique. Ce travail concerne la conception d'une ontologie formelle pour la neuroanatomie cellulaire. L'ontologie consiste à modéliser les connaissances sur l'anatomie cellulaire du système nerveux en incluant les cellules nerveuses, leurs parties et les interactions entre ces parties. Cette ontologie est appelée *SAO* (Subcellular Anatomy Ontology) [117]. Elle a pour vocation d'offrir une connaissance nécessaire à l'intégration de données en neurosciences. Elle décrit les neurones, les cellules gliales, leurs parties, et comment ces parties, ensemble, caractérisent le système nerveux. *SAO* a été construite en respectant les principes ontologiques en vue d'être une ontologie de référence, et elle a été codée en OWL afin de faciliter son partage. Les principales classes de *SAO* sont les classes des *biological independent continuants* que sont *Cell*, *Cell Component*, *Extracellular Structure*, et *Molecule*. Chaque classe a un identifiant unique et une étiquette. Les propriétés de *SAO* sont divisées en trois groupes majeurs : la relation *part of*, les relations morphologiques et les relations spatiales, en respectant le modèle de l'ontologie *FMA* [174]. Enfin les auteurs donnent les principes de modélisation, d'un point de vue neuro-scientifique, qu'ils ont retenus, et décrivent des exemples concrets de raisonnement s'appuyant sur leur ontologie. Parmi les applications, où l'utilisation de cette ontologie est prévue, l'annotation d'images, la recherche d'images

⁴<http://ccdb.ucsd.edu/CCDBWebSite/index.html>

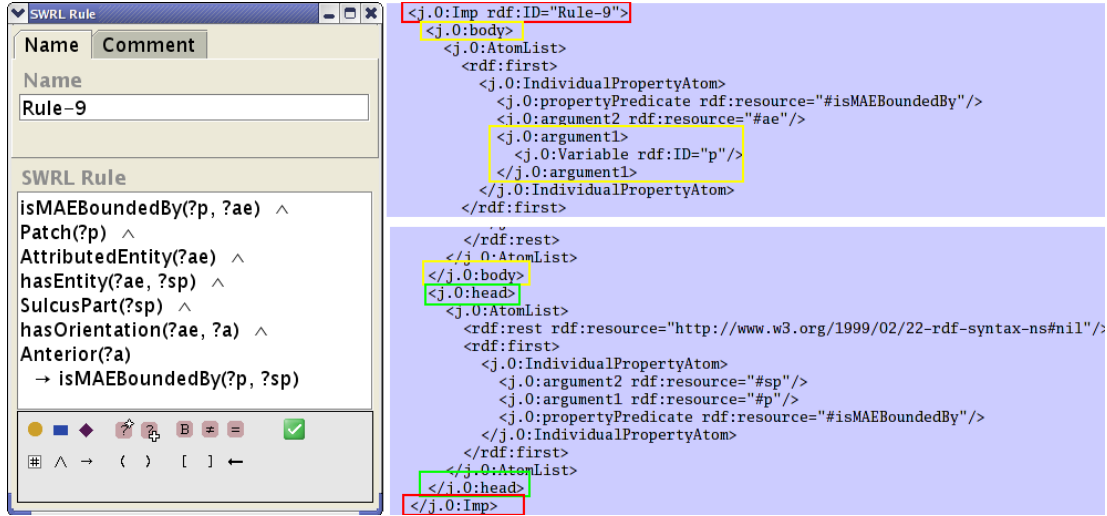


FIG. 3.13: Représentation en SWRL des règles.

par le contenu et surtout l'intégration de données partagées à différentes échelles.

Il y a beaucoup de similitudes entre l'ontologie *SAO* et notre ontologie. D'abord les deux ontologies s'intéressent à l'anatomie du cerveau, bien qu'à deux niveaux différents : *SAO* pour l'anatomie microscopique et la nôtre pour l'anatomie sulco-gyrale macroscopique. Les deux ontologies sont représentées en OWL pour faciliter leur partage. Dans les deux cas on se base sur l'ontologie de référence *FMA* pour la définition des relations entre concepts. Enfin, les deux ontologies sont développées pour les mêmes motivations, à savoir leur utilisation dans les applications d'annotation, de recherche d'images par le contenu et d'intégration de données biomédicales.

3.7 Discussion

Notre objectif était de faire une étude de l'existant sur la modélisation des connaissances neuroanatomiques, de proposer une ontologie pour les sillons et les gyri qui soit la plus proche possible de l'ontologie *FMA*, et la représenter sous une forme permettant à la fois son partage et son utilisation dans des processus de raisonnements automatiques. Nous avons donc repris la modélisation de Dameron et la partie "cerveau" de *FMA*, et nous avons combiné les deux afin d'obtenir une ontologie plus complète. Enfin, les sillons n'étant pas définis dans *FMA*, nous avons dû recourir à l'atlas de Ono pour les définir et les représenter dans notre ontologie.

L'un des éléments d'originalité de notre ontologie consistait à lui associer des règles [131]. La motivation tient à la nécessité de pouvoir raisonner sur des parties des entités anatomiques - parties des sillons et parties des gyri - pour pouvoir les attacher à des tout identifiables. En effet, il existe un large fossé entre les primitives qu'on peut extraire des images de façon automatique (par exemple les patches) et les structures anatomiques telles que les ont décrites les anatomistes, qui ont un caractère beaucoup plus macroscopique. C'est précisément le rôle de certaines règles que de modéliser les dépendances entre les relations partie-tout et les relations topologiques qui concernent les gyri et les sillons.

L'autre niveau d'originalité concerne le côté général et donc réutilisable de l'ontologie. Notre ontologie a pour ambition de représenter les connaissances anatomiques de façon non-spécifique du problème à résoudre. Ceci suppose bien entendu des compromis. Ceci est particulièrement flagrant dans la définition des conditions nécessaires et suffisantes de chaque classe d'entité. Il est clair que les définitions que nous avons retenues, même séparées dans deux ontologies différentes ; l'une partageable et l'autre applicative, sont principalement guidées par les besoins de l'application d'annotation, qui, en l'occurrence, met fortement l'accent sur les aspects topologiques. Ceci pose la question fondamentale de la faisabilité de telles ontologies à caractère universel et des traitements à leur appliquer pour en dériver des ontologies applicatives, adaptées aux besoins de telle ou telle application.

Enfin, notre souhait de proposer une ontologie réutilisable nous a conduits naturellement à choisir d'utiliser OWL tout en séparant les concepts génériques des concepts spécifiques à l'application. Le souhait de pouvoir bénéficier de bonnes propriétés au niveau calculatoire et utiliser les raisonneurs existants nous a conduits à choisir la variante OWL DL et, pour ce qui concerne les règles, à nous limiter à des règles de Horn sans fonction. Ces choix nous ont amenés à faire plusieurs compromis, et contourner plusieurs limites liés aux outils existants, par exemple :

- L'ontologie utilise des restrictions existentielles au lieu de restrictions de cardinalité quantifiées ;
- KAON2 ne supportant pas encore le type "nominal", nous avons défini des sous classes de *Orientation*, ex. ; *Posterior*, *Anterior* etc. et utilisé des restrictions existentielles ;
- Toutes les relations n-aires sont transformées en relations binaires, par exemple nous avons défini une classe artificielle "AttributedEntity" qui a deux champs : une structure anatomique, et une collection de trois orientations pour représenter des relations attribuées comme dans *FMA* ;
- Enfin, les règles que nous avons définies sont des règles SWRL que KAON2 transforme en interne en règles DL-safe [139]. Pour cette raison, certaines solutions peuvent être ignorées [79].

Nous envisageons d'améliorer l'ontologie prochainement sur plusieurs aspects. Nous envisageons par exemple d'étudier la variabilité des relations entre les structures anatomiques

à partir d'une grande base d'images du cerveau, et d'associer à chaque relation entre deux concepts anatomiques une valeur exprimant sa plausibilité au sein de la population étudiée. Nous envisageons aussi d'enrichir les définitions des concepts de notre ontologie par d'autres types de connaissances, telles que la taille des structures anatomiques. La représentation de notre ontologie en OWL 2 constitue aussi une autre perspective intéressante, du moment que OWL 2 offre de nouvelles fonctionnalités supportées par de nouveaux outils de raisonnement. En effet, l'annotation des images anatomiques du cerveau constitue⁵ un des cas d'utilisation (use cases) considérés par le W3C, afin que les besoins applicatifs soient pris en compte dans les évolutions du langage OWL. Enfin, nous envisageons d'associer à notre ontologie d'autres types de connaissances sur le cerveau, à savoir les connaissances sur les fonctions, sur les connexions des faisceaux de fibres, sur l'anatomie cellulaire, etc.

⁵http://www.w3.org/2007/OWL/wiki/New_Features_and_Rationale#ref-ontowithrules

Deuxième partie

Identification de structures anatomiques dans des images du cerveau

Chapitre 4

Etat de l'art sur l'interprétation et l'annotation sémantique des images du cerveau

L'interprétation d'images¹ consiste à construire du sens à partir des données provenant de la scène analysée, c'est-à-dire à structurer ces données, à reconnaître les différentes entités qui composent l'image, à comprendre leur organisation spatiale et à construire une description de la scène. L'interprétation d'images fait donc appel à un certain nombre de connaissances a priori :

- sur la scène et sur les objets qu'elle contient (modélisation des objets et de leurs relations),
- sur le domaine d'application (expertise),
- sur les conditions d'acquisition des images.

En outre, une application spécialisée vise à atteindre un but précis, qu'il faut savoir formuler. On cherchera alors à effectuer une interprétation partielle, suffisante pour résoudre le problème posé. On doit donc disposer :

- de modèles et de formalismes pour représenter ces connaissances,
- de modules d'apprentissage pour acquérir et structurer ces connaissances,
- d'opérateurs d'analyse d'image, paramétrables et adaptatifs,
- d'opérateurs de reconnaissance ou de mise en correspondance entre les informations a priori et les résultats de l'analyse.

Dans notre cas, les connaissances a priori mises en jeu sont les connaissances symboliques formalisées dans l'ontologie sulco-gyrale, et l'opérateur de mise en correspondance entre les informations a priori et les entités numériques extraites par des traitements numériques est un système de raisonnement à plusieurs composants. On parle d'annotations sémantiques pour désigner les étiquettes rajoutées à l'image et qui donnent aux différentes parties de cette dernière du sens ou de la sémantique. Ces étiquettes sont reliées à l'ontologie sulco-gyrale, où les entités auxquelles elles se réfèrent ont des définitions universelles et formelles très riches.

Il existe dans la littérature plusieurs articles traitant l'interprétation d'images. La plupart d'entr'eux s'appuient sur les caractéristiques numériques qu'on peut extraire des images (appelées caractéristiques de bas niveau ou *low level features* en anglais), c'est-à-dire des contours et des régions extraits directement des représentations numériques des objets, et qui ont peu ou pas de relation avec la perception humaine [40]. Cependant, la sémantique d'une image ne peut être appréhendée uniquement à partir des caractéristiques numériques obtenues par des traitements numériques tels que la segmentation. Il est nécessaire de compléter ces informations avec des méta-connaissances afin de mieux interpréter les objets segmentés. Il s'agit donc de connaissances riches, qui peuvent être ajoutées par un utilisateur humain, un système automatique, ou encore un système qui assiste un utilisateur humain. Cependant il y a un dilemme à résoudre concernant la qualité des annotations et le degré d'intervention de l'utilisateur dans le processus d'an-

¹http://www.irit.fr/ACTIVITES/EQ_TCI/EQUIPE/dalle/interpretation.html

notation. Les méthodes complètement automatiques ne donnent pas en général une bonne qualité d'annotation, c'est-à-dire des annotations qui désignent les bonnes entités décrites dans l'ontologie par exemple, mais, par contre, elles permettent d'annoter facilement et d'une manière complètement automatique de grandes masses d'images. Les méthodes semi-automatiques, quant à elles, produisent des annotations de qualité meilleure, mais elles sont lentes, ce qui ne facilite pas l'annotation de grandes bases d'images. Chaque type d'annotation dépend alors de son contexte d'utilisation, il y a des situations où l'utilisateur a besoin d'être assisté par un système, afin par exemple de lever les ambiguïtés dues à la divergence d'interprétation d'un scanner par plusieurs médecins. Dans d'autres situations par contre, l'utilisateur voudrait étudier plusieurs images avec un même système d'annotation et sans qu'il intervienne, comme c'est le cas lorsque l'on veut effectuer des études de groupes sur un grand nombre d'images, où l'intervention de l'utilisateur a un coût considérable en terme de temps.

La section 4.1 met l'accent sur l'importance des relations spatiales en interprétation d'images. Ensuite, la section 4.2 résume brièvement l'existant des méthodes numériques d'annotation d'images du cerveau. Enfin, un état de l'art des méthodes symboliques et mixtes sur l'interprétation et l'annotation d'images est donné dans la section 4.3.

4.1 Modélisation des relations méréologiques et spatiales

Le calcul et la représentation des relations spatiales, notamment des relations directionnelles, joue un rôle très important en interprétation d'image. Ces dernières représentent une connaissance non négligeable, particulièrement dans des domaines tels que la géographie et l'anatomie, où elles sont relativement stables. Les relations spatiales en général, et les orientations en particulier, sont un élément discriminant dans la reconnaissance des objets, la vision par ordinateur, l'interprétation de scènes, les applications géographiques, la navigation autonome d'agents autonomes, etc. De ce fait, aussi bien la représentation symbolique de ces relations que leur calcul par des programmes numériques sont importants, et, cependant, restent un défi pour les machines, alors qu'elles sont facilement appréhendables par l'être humain, malgré l'ambiguïté liée à leur définition.

Dans les ontologies biomédicales c'est l'aspect qualitatif, la sémantique de ces relations ainsi que leur représentation qui sont étudiés, comme par exemple la relation **part-whole** exprimant les parties d'un ensemble, qui, lui, peut être un organe ou une structure anatomique quelconque [183]. Une ontologie définit les relations pouvant exister entre les instances des concepts ainsi que leur propriétés. Smith et al. [189] ont fait une excellente analyse des relations dans les ontologies biomédicales et ont proposé un cadre formel pour définir des relations cohérentes et non ambiguës pour ces ontologies. L'ontologie des relations qu'ils ont proposée, baptisée l'ontologie des relations *OBO* (*OBO* Relation Ontology (RO)), résultait d'une collaboration avec des experts en ontologies formelles et

des biologistes dans les groupes de recherche *OBO*, *FMA* et *GALEN*. En effet, les relations dans les ontologies *OBO* étaient initialement utilisées de manière incohérente, et l'ontologie RO a donc été développée dans le but de fournir aux constructeurs d'ontologies les lignes directrices qui aident à une bonne formulation des relations. Ces lignes directrices se révèlent déjà utiles, par exemple, dans la représentation des changements anatomiques et l'établissement des liens entre diverses collections d'images et données phylogénétiques [192]. Dans le même ordre d'idées, une autre théorie formelle a été proposée par Donnelly [65] pour la représentation spatiale et le raisonnement dans les ontologies biomédicales. L'objectif des auteurs était de démontrer comment une théorie spatiale formelle peut être utilisée pour la désambiguation de l'information spatiale contenue dans les ontologies biomédicales, et par conséquent offrir de meilleures capacités de raisonnement sur ces ontologies. Ils ont ainsi présenté une théorie d'inclusion basique des relations de localisation (location) et des parties (parthood) entre les individus et entre les classes, qu'ils ont nommée *BIT* (Basic Inclusion Theory) et *BITCl* (Basic Inclusion Theory for classes) respectivement. Enfin, ils ont appliqué cette théorie formelle aux deux principales ontologies de l'anatomie humaine, *FMA* et *GALEN*, afin de montrer son utilité pour une meilleure précision des structures logiques de l'information spatiale. En effet, ils ont déduit qu'aussi bien dans *FMA* que dans *GALEN*, les relations spatiales au niveau des classes ne sont pas toujours explicitement distinguables. Par conséquent, l'information spatiale contenue dans ces deux ontologies biomédicales est souvent ambiguë, et les possibilités offertes pour l'interopérabilité et l'implémentation d'un raisonnement automatique cohérent sont limitées.

Concernant le cerveau, les relations spatiales jouent un rôle encore plus important. Elles constituent une information structurelle importante, et leur modélisation par des théories formelles est très utile dans divers raisonnements. Une très bonne synthèse et discussion a été faite par Dameron [53] sur les relations de spécialisation, de composition et d'agencement spatial, les théories sous-jacentes, et leur adaptation à l'anatomie du cerveau. On y trouve aussi la définition explicite des propriétés de chaque relation utilisée, dont on se sert pour la gestion de la cohérence sémantique de l'ontologie.

Les travaux précédents fournissent des fondements formels pour les différents types de relations dans les ontologies biomédicales. Cependant, de tels fondements restent insuffisants. Schulz et al. [184] soulignent que les relations des parties (**part-Of** et **has-Part**), entre les classes des ontologies biomédicales, sont complexes et vont au-delà de ce qui a été formalisé dans la méréologie standard. Ils argumentent cela par des exemples qui illustrent bien des cas où ce type de relations ne sont pas vérifiées chez certains individus, comme le fait de savoir si, chez un individu, des cheveux perdus ou un organe extrait par la chirurgie restent des parties de son corps. Un autre aspect important, qui n'est pas pris en compte dans la plupart des formalisations des relations spatiales, dans les ontologies biomédicales, est celui relatif à leur évolution dans le temps. C'est ce que Bittner et al. [20] ont essayé de traiter, en s'intéressant non seulement à l'aspect qualitatif des relations spatiales dans les ontologies anatomiques et biomédicales, mais aussi à leur caractère dépendant du temps,

ce qui est important, surtout lorsqu'on sait que les formes anatomiques, par exemple, évoluent au cours du temps, et par conséquent les relations aussi peuvent évoluer. Ils expliquent que la représentation formelle des aspects méréologiques de l'anatomie canonique (relations des parties) est relativement bien compris. Cependant, la représentation formelle des autres aspects de l'anatomie canonique, tels que la connectivité, les relations d'adjacence entre des entités anatomiques, leur forme, leur taille ainsi que la disposition spatiale des parties anatomiques dans des structures anatomiques plus grandes sont, cependant, beaucoup moins bien appréhendées et leur représentation dans les ontologies anatomiques et biomédicales existantes est insuffisante. Ils proposent alors une méthodologie permettant d'intégrer ce genre d'information dans des ontologies anatomiques et biomédicales, en appliquant des techniques de représentation de l'information spatiale développées en Intelligence Artificielle, telles que la classification des intervalles temporels proposée par Allen [5]. Ils se sont focalisés particulièrement sur la manière de tenir compte, explicitement, du caractère qualitatif et dépendant du temps de ces relations. La méthodologie présentée a été développée sous forme d'une ontologie formelle accessible sur le lien suivant : <http://www.ifomis.org/bfo/fol>. Cette ontologie peut très bien aider à améliorer la rigueur logique et ontologique des ontologies biomédicales, telles que RO.

Bien d'autres travaux se sont intéressés à la problématique des relations entre instances et classes dans les ontologies biomédicales [190, 182]. Leur grand nombre témoigne, d'une part, de l'importance qu'ont ces relations. Les diverses manières de les définir et de les représenter illustrent, d'autre part, leur complexité et l'ambiguïté qui les caractérisent. En effet, la même relation peut avoir des sémantiques différentes dans différentes ontologies. Il manque un consensus sur la définition du sens des relations. Ce dernier étant, le plus souvent, défini de façon ad-hoc pour mieux répondre aux attentes exprimées dans un domaine particulier, tel que l'anatomie. Concernant la formalisation des relations spatiales dans les ontologies biomédicales, la logique du premier ordre (First Order Logic), notamment les fragments de cette logique qui offrent des propriétés de raisonnement intéressantes, ont inspiré beaucoup de travaux. Bittner et al. [19], par exemple, ont étudié les propriétés logiques de trois types de relations capturant les aspects méréologiques importants des objets anatomiques dans les ontologies biomédicales, et ont démontré que la logique du premier ordre offre le niveau d'expressivité requis pour distinguer les propriétés importantes de ces relations. Cependant, et afin de permettre l'utilisation des ontologies dans des raisonnements, ils suggèrent que ces dernières soient composées de deux éléments complémentaires : 1) une ontologie basée sur les logiques de description ; 2) et une ontologie basée sur la logique du premier ordre qui sert de métadonnée et qui explicite les propriétés logiques des relations qui ne peuvent pas être exprimées en logiques de description. Un autre formalisme intéressant, le *RCC* (Region Connection Calculus) [159, 17, 123], basé sur la logique du premier ordre, a été proposé pour la représentation qualitative des relations spatiales. Les relations topologiques entre les objets y sont décrites à l'aide de huit prédicats élémentaires schématisés sur la figure 4.1 (égalité, disjonction, adjacence, recou-

vement strict, inclusion tangentielle, inclusion stricte et les relations inverses de ces deux dernières relations).

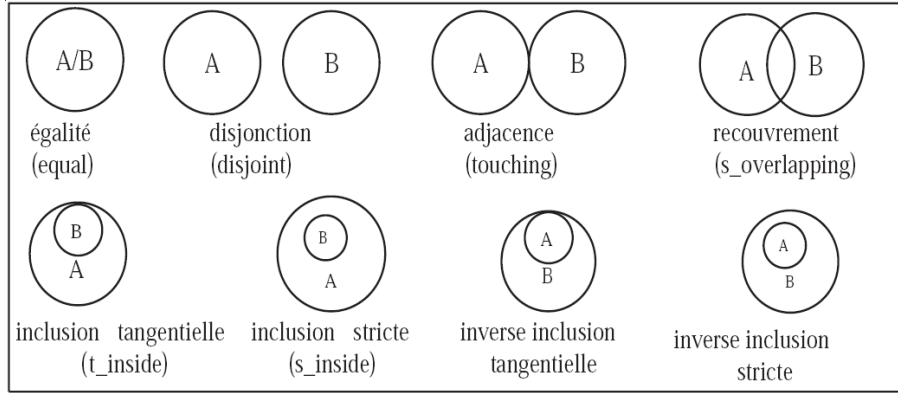


FIG. 4.1: Représentation des relations topologiques *RCC8* [51].

Ces relations sont particulièrement intéressantes pour la localisation des régions selon des relations topologiques ou par rapport à d'autres régions, afin, par exemple, de localiser dans le cerveau les zones fonctionnelles telles que les zones du langage par rapport à une tumeur ou à une structure anatomique quelconque. Afin de pouvoir raisonner sur les relations qualitatives entre les régions spatiales et sur les propriétés des données quantitatives, Haarslev et al. [92] ont proposé une extension de la logique de description $\mathcal{ALD}(\mathcal{D})$ appelée $\mathcal{ALDRP}(\mathcal{D})$. L'extension proposée gère les objets spatiaux et leurs relations à l'aide de prédicats. Récemment des travaux intéressants ont étudié la représentation de l'arbre *RCC* en OWL [87, 88], ce qui est évidemment important non seulement pour leur partage, mais également pour leur utilisation dans des processus de raisonnement spatio-temporels.

La question maintenant est de savoir si, en interprétation d'images, les modélisations qualitatives des relations spatiales facilitent la mise en correspondance des régions d'une image segmentée avec les descriptions sémantiques (concepts d'une ontologie par exemple). En d'autres termes, est ce que les représentations qualitatives des relations spatiales, décrites ci-dessus, peuvent aider à réduire le fossé sémantique, défini par Smeulders et al. [188] comme le manque de concordance entre les informations perceptuelles que l'on peut extraire des images et l'interprétation de ces données par un utilisateur dans une situation déterminée ? La réponse est sûrement oui, elles ont au moins le mérite de fournir une connaissance riche pour ces relations et qui peut être exploitée dans plusieurs contextes, mais cela est-il suffisant ? En dépit de leur cohérence, généricité, consensualité et expressivité, les connaissances exprimées dans les ontologies sur les relations spatiales sont-elles facilement utilisables par des outils de raisonnement puissants en interprétation d'images ? Tolèrent-elles l'imprécision relative à leur évaluation numérique ? Tiennent-elles compte des

déformations causées par d'éventuels processus pathologiques ? Là, la réponse est beaucoup moins affirmative. En effet, il est difficile d'utiliser ces connaissances directement dans des systèmes opérationnels d'interprétation d'images. Le raisonnement spatial, en image et en vision, n'a pas été aussi développé que dans les formalismes logiques, basés sur la logique du premier ordre. En interprétation d'images, par exemple, c'est la gestion de l'information incomplète et de l'imprécision caractérisant la représentation et la déduction des relations spatiales qui fait l'objet d'études diverses [21]. Au département TSI (Signal-Images) de l'ENST de Paris, les chercheurs travaillent beaucoup sur le raisonnement spatial sous l'incertitude, ils s'intéressent, entre autres, à la gestion de l'incertain et de l'imprécis, à la théorie des ensembles flous pour la représentation des connaissances spatiales (modélisation des relations spatiales), plus récemment aux ontologies anatomiques enrichies par des représentations floues des relations spatiales, et ils appliquent leurs théories à l'interprétation des images anatomiques du cerveau humain. En effet, comme on l'a déjà dit, le cerveau humain est fortement structuré, et les relations spatiales entre les structures anatomiques jouent un rôle important dans leur reconnaissance. Elles permettent de lever l'ambiguïté entre des objets d'apparences similaires [9], et surtout elles sont plus stables que les caractéristiques intrinsèques des structures anatomiques elles mêmes, comme leurs formes par exemple. En revanche, les relations spatiales entre les structures anatomiques dans le cerveau humain sont imprécises, variables et sujettes à des déformations qui peuvent être causées par des processus pathologiques, et qui peuvent emmener à des erreurs d'interprétation. Une prise en compte de ces différents facteurs dans la modélisation des relations spatiales, pourrait donc améliorer l'interprétation de ce type d'images.

La communauté de l'image et la vision par ordinateur s'intéresse donc à la modélisation des relations spatiales, mais, contrairement à la communauté des ontologies et de l'ingénierie des connaissances en général, qui utilise des modèles de représentation qualitatifs souvent liés à la logique formelle ou à la classification des intervalles temporels proposée par Allen [5], la communauté de l'image et de la vision utilise des modèles de représentation quantitatifs plutôt rattachés à la logique floue et aux probabilités. Le formalisme de la logique floue, élaboré par Lotfi Zadeh en 1965 [220], a en effet inspiré beaucoup de travaux dans le domaine de l'interprétation d'images, et particulièrement dans la modélisation des relations spatiales entre les régions composant une image. Cette logique, qui a connu un grand succès dans de nombreux domaines, s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous qui est l'extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise. C'est une théorie formelle et mathématique dans le sens où Zadeh², en partant du concept de fonction d'appartenance pour modéliser la définition d'un sous-ensemble d'un univers donné, a élaboré un modèle complet de propriétés et de définitions formelles. Il a aussi montré que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit effectivement à la théorie des sous-ensembles classiques dans

²http://fr.wikipedia.org/wiki/Logique_floue

le cas où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires ($\{0, 1\}$). Contrairement à la logique booléenne, la logique floue permet à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, exprimant des degrés dans la vérification d'une condition. La logique floue attribue des quantités nuancées contrairement à la logique binaire (qui n'utilise que le vrai et le faux).

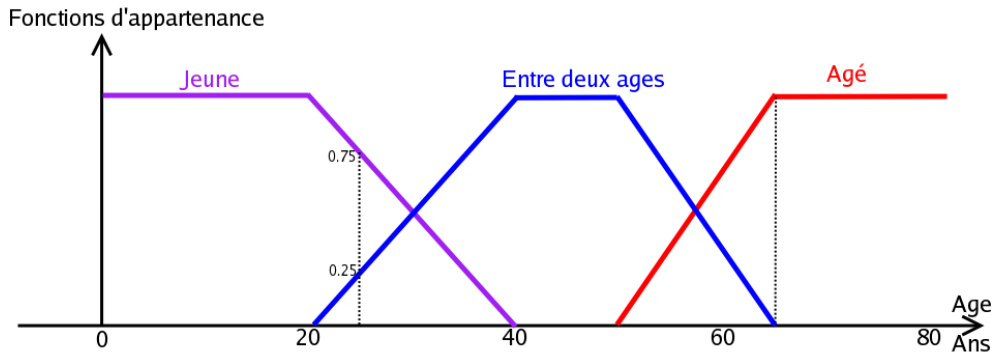


FIG. 4.2: Un exemple d'utilisation de la logique floue.

La figure 4.2 montre un exemple concret de représentation en logique floue, où, contrairement aux logiques booléennes, la fonction d'appartenance à une catégorie prédéfinie, selon l'âge de la personne, ne bascule pas de 0 à 1 ou inversement de manière brusque. Une personne de 25 ans appartient à l'ensemble "jeune" avec une valeur $\mu=0.75$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble "entre deux âges" avec $\mu=0.25$. Par contre une personne âgée de 65 ans appartient avec une valeur $\mu=1$ de la fonction d'appartenance, c'est à dire avec certitude, à l'ensemble "âgé".

La logique floue est d'une grande utilité dans le raisonnement spatial incertain [22]. Par exemple, pour les problématiques de reconnaissance d'objets numériques ou de segmentation d'images médicales, la modélisation des relations spatiales, notamment leur modélisation floue, s'avère un facteur d'amélioration des performances en matière de segmentation d'images [48]. Elle a également été appliquée pour la déduction des relations spatiales entre les structures anatomiques extraites des images IRM du cerveau [23]. Une très bonne synthèse des approches floues et leur rôle dans l'interprétation et le traitement d'images a été élaborée par Bloch [21], où l'on peut trouver à la fois les aspects théoriques de la logique floue et son utilisation pour résoudre une problématique réelle dans le domaine de l'imagerie du cerveau. Atif et al. [9] proposent d'apprendre la variabilité des relations spatiales, due à la présence de différents types de tumeurs dans le cerveau, sur une base de cas pathologiques. De nombreux autres travaux utilisent ce type d'approches pour représenter les relations spatiales, notamment en imagerie satellitaire [75]. Outre les représentations floues, les méthodes probabilistes représentent une autre alternative aux

logiques binaires. La logique probabiliste prend appui sur des formalisations de croyances incertaines à l'aide de mesures de probabilité sur des propositions décrites dans un langage donné. Le besoin d'utiliser des logiques probabilistes a été ressenti dans la communauté du Web Sémantique, et a donné naissance à des réflexions sur ce sujet. Par exemple PRONTO [113] (raisonneur OWL probabiliste) permet aux utilisateurs de compléter les ontologies OWL classiques par des déclarations probabilistes, il est conçu pour les modélisations ontologiques des domaines incertains du Web Sémantique. Cependant, la logique floue présente l'intérêt d'être plus facile à implémenter qu'une logique probabiliste.

Outre leur robustesse et leur prise en compte des imprécisions inhérentes à des applications très spécifiques, ces approches de modélisation mathématiques réduisent-elles le fossé sémantique dont on a parlé précédemment ? Sont-elles suffisamment génériques pour être réutilisées ? Sont-elles associées à une sémantique explicite claire et riche ? La réponse est non. Quelle est donc l'approche de modélisation des relations spatiales qui est susceptible de réduire ce fossé sémantique. La réponse peut se trouver dans la combinaison des deux approches précédentes. D'ailleurs, un travail particulièrement intéressant a été publié récemment par Hudelot et al. [107], où les auteurs décrivent une ontologie des relations spatiales (figure 4.3), enrichie par des représentations floues. L'ontologie qu'ils ont développée est générique, c'est-à-dire qu'elle est indépendante du domaine d'application, et modélise les relations spatiales topologiques, directionnelles et de distance. En revanche, le formalisme flou qui lui est associé est adaptable à chaque domaine d'application, dans leur cas le guidage du raisonnement spatial dans une image et la reconnaissance des structures qu'elle contient par des informations structurelles sur l'agencement spatial de ces structures. L'originalité de leur approche tient à l'intégration de l'ontologie des relations spatiales, formalisée en logiques de description et représentée en OWL, et leurs domaines concrets dans lesquels des représentations floues sont définies (figure 4.4), permettant ainsi de faire le lien entre les concepts, souvent exprimés sous forme linguistique, et les informations que l'on peut extraire des images.

L'ontologie des relations qu'ils ont proposée, dont une partie est rapportée sur la figure 4.3, modélise les principaux concepts (relations) mis en évidence dans la littérature pour leur importance en raisonnement spatial, à savoir : **Objet Spatial**, **Relation Spatiale**, **Relation Spatiale Avec** et **Objet en Relation Spatiale Avec**. L'intégration syntaxique du flou dans cette ontologie se fait à l'aide des domaines concrets, elle définit comment relier physiquement les concepts de l'ontologie à des représentations floues, décrites sous forme de types de données d'un schéma XML (figure 4.4) et apprises sur une grande base de structures anatomiques segmentées. Par exemple sur la figure 4.4, le concept **Right** a comme représentation floue dans le domaine concret un ensemble flou (Fuzzy Set), décrit en XML. La représentation des relations floues par des sous-ensembles flous dans l'image (domaine concret) permet de lier la sémantique d'une relation spatiale (par exemple "à droite de R") à sa représentation physique dans le domaine de l'image [107]. Ceci permet d'apporter une vraie solution au problème du fossé sémantique.

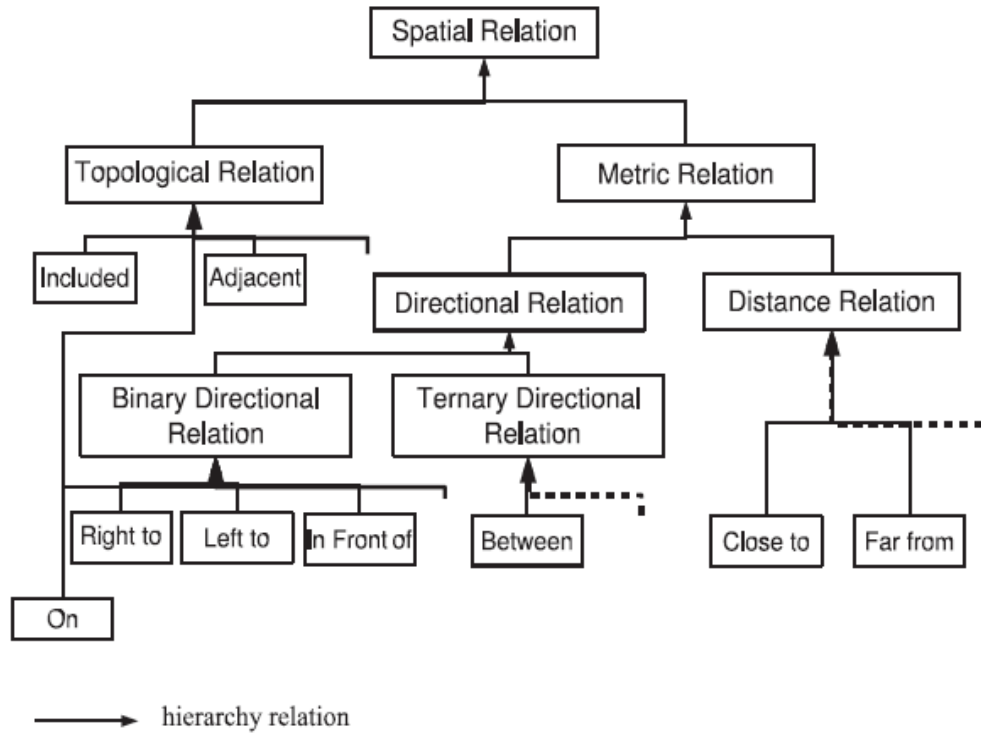


FIG. 4.3: Extrait de la hiérarchisation des relations spatiales dans l'ontologie des relations floues de [107].

Depuis quelques années en France, les communautés de l'analyse d'images et de la vision par ordinateur d'une part et de l'extraction et de la gestion de la connaissance d'autre part ont tenté de créer un rendez-vous francophone dans le cadre de la conférence EGC (Extraction et Gestion des Connaissances) entre ces deux disciplines lors d'ateliers intitulés ECOI pour Extraction de Connaissances et Images. Un des thèmes très fructueux a porté sur l'analyse des relations spatiales dans le cadre des sciences et des technologies de l'information. Cela a donné naissance à un numéro spécial de la revue RNTI s'intitulant "Les relations spatiales : de la modélisation à la mise en oeuvre"³ [125]. Ce rapprochement témoigne de la nécessité de rassembler toutes les compétences afin de mieux étudier les relations spatiales sur tous leurs aspects.

La section 4.2 présente les approches classiques (numériques) d'annotation d'image ainsi que leurs limites, et la section 4.3 présente les approches symboliques et mixtes d'interprétation des images du cerveau, où les relations spatiales entre les structures anatomiques

³http://www.cephadues.com/livre_details.asp?l=864

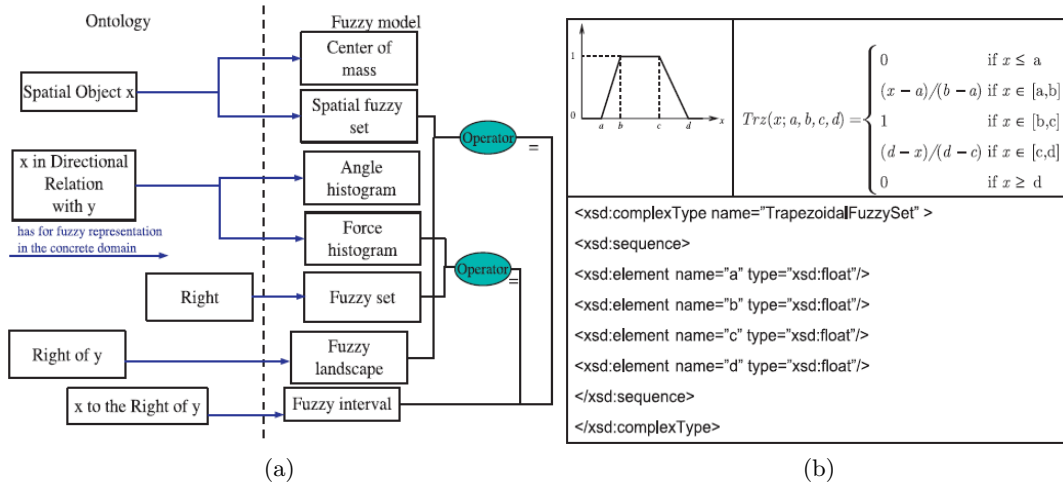


FIG. 4.4: (a) : Intégration syntaxique entre l'ontologie des relations spatiales et le modèle de représentation floue pour les relations directionnelles [107], (b) Un ensemble flou trapézoïdal, sa fonction d'appartenance et la description des types de données XML flous correspondants [107].

ont, justement, une grande importance.

4.2 Approches numériques d'annotation d'images du cerveau

Nous rappelons que l'un des problèmes majeurs de l'analyse des images médicales est de pouvoir assister un clinicien dans l'interprétation et l'exploitation des images, notamment lorsqu'il a besoin de confronter son interprétation avec des cas classiques ou des cas de référence. Une solution pertinente à ce problème est d'utiliser des atlas, qui représentent une information a priori adéquate. Dans ce contexte, les approches numériques en général, et les atlas probabilistes en particulier, sont fréquemment utilisés, notamment pour la labellisation des structures du cortex cérébral. Cela est dû en partie à leur appui sur des théories mathématiques, statistiques et probabilistes solides et abouties, mais aussi à la facilité d'implémentation de telles méthodes et de leur intégration dans des outils d'annotation d'images. Ces approches sont communément appelées approches morphométriques ou statistiques [208, 36, 73, 44, 206]. Elles sont généralement globales ; c'est à dire elles considèrent le cerveau dans sa globalité, et entièrement automatiques ; l'utilisateur n'intervient pas lors de la labellisation. Dans ces approches, la labellisation concerne un ou plusieurs types de structures anatomiques du cerveau, par exemple les gyri, les sillons, ou les deux. Dans [73] les auteurs proposent une technique automatique pour la labellisa-

tion des sillons et gyri corticaux. Cette technique est basée sur l'information probabiliste estimée à partir d'un ensemble d'apprentissage constitué de structures anatomiques labellisées manuellement par des anatomistes. Dans [36] on propose une approche automatique de parcellisation de la surface corticale en gyri labellisés, en essayant de reproduire le raisonnement et l'analyse que font les neuroanatomistes d'un point de vue structurel. Les gyri y sont définis à partir d'un ensemble de sillons sélectionnés par l'utilisateur, et projetés ensuite sur la surface corticale. La parcellisation en gyri est obtenue par deux diagrammes de *Voronoi* imbriqués et calculés géodésiquement à la surface corticale. Le premier détermine les zones d'influence des sillons sélectionnés, et le deuxième calcule la parcellisation en gyri. Contrairement aux deux premières approches, qui considèrent le cerveau dans sa globalité, Desikan et al. [62] proposent une méthode pour l'annotation des régions d'intérêt sur le cortex cérébral. La construction de leur atlas est faite sur une base de 40 images IRM après l'identification manuelle de 34 régions corticales dans les hémisphères gauche et droit de chaque individu. Ces différentes approches considèrent uniquement l'anatomie dans leurs découpages en régions du cortex cérébral. Cependant, Tzourio et al. [207] mettent en évidence que la neuroanatomie macroscopique ne devrait pas être considérée uniquement comme un système de repères mais aussi comme fondement de l'organisation fonctionnelle du cerveau. Clouchoux et al. [44] proposent alors une méthode de parcellisation de la surface corticale, avec l'objectif de décrire l'organisation de la surface corticale, aussi bien en terme anatomique que fonctionnel (figure 4.5). Leurs travaux s'inscrivent dans un cadre général qui est la construction d'un référentiel surfacique qui permette d'identifier n'importe quel point sur la surface par rapport à un certain nombre d'invariants anatomiques, ce référentiel devant être reproductible d'un sujet à l'autre. A partir d'un ensemble de structures invariantes sur la surface, détectées et identifiées automatiquement, les valeurs de paramètres sont propagées grâce à la résolution d'une équation aux dérivées partielles de type "équation de la chaleur" contrainte sur la surface corticale.

Tucholka et al. [206] utilisent, eux, un modèle probabiliste bayésien pour la parcellisation anatomo-fonctionnelle de la surface corticale. Avec cette approche, les auteurs ont trouvé qu'environ 250 patches du cortex peuvent être distingués sur chacun des deux hémisphères du cerveau. Enfin, Tzourio et al. [208] utilisent la parcellisation anatomique du cortex cérébral de [47] pour la labellisation anatomique des activations dans SPM (Statistical Parametric Mapping Package). Dans ce dernier travail, cependant, le schéma de labellisation proposé se base sur un seul cerveau, ce qui limite sa généralisation.

De la même manière que pour les gyri, de nombreux travaux ont porté sur l'étiquetage des sillons [118, 167, 66, 155, 127]. Par exemple dans [127] les auteurs, dans leurs travaux préliminaires, utilisent l'échelle multidimensionnelle MDS (Multi-Dimensional Scaling) pour classer 180 sillons, pré-segmentés, appartenant aux classes majeures des sillons du cortex cérébral (figure 4.6). Dans [167, 168] une méthode plus aboutie a été présentée pour la reconnaissance des sillons corticaux, basée sur l'utilisation des réseaux de neurones (figure

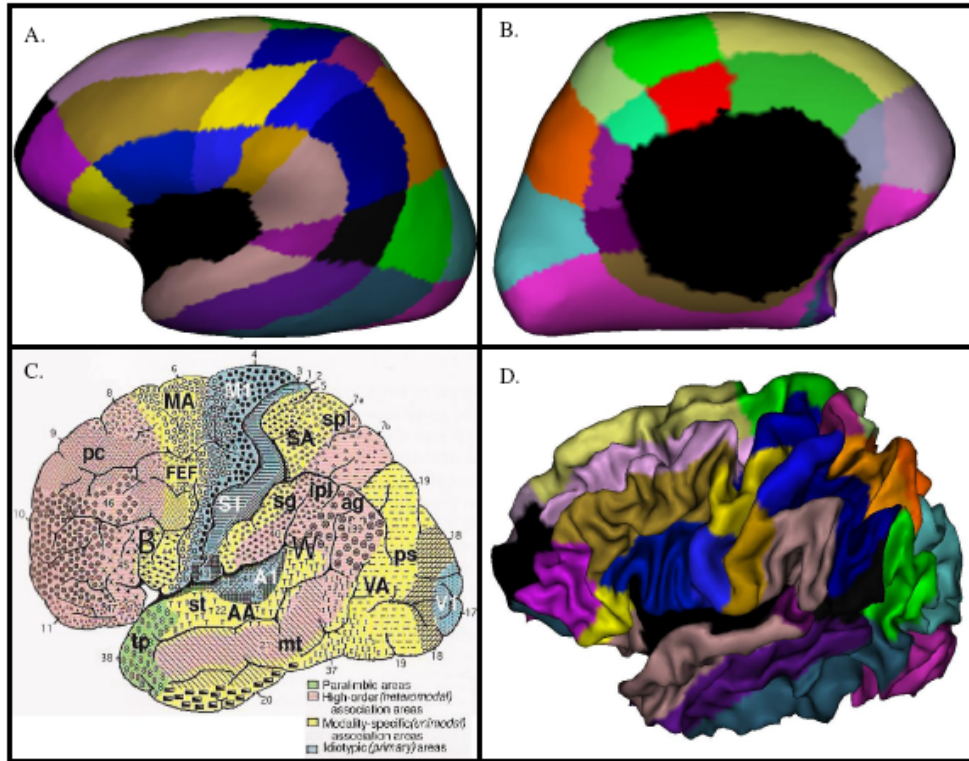


FIG. 4.5: (A et B) résultat de parcellisation sur une surface corticale gonflée [44]. (C) parcellisation cytoarchitectonique et fonctionnelle du cortex cérébral humain, comparée à (D) proposée par [44].

4.6⁴).

Cependant, et malgré les avantages que présentent ces approches numériques d'annotation, elles restent limitées sur plusieurs aspects :

- Bien que ces approches soient construites le plus souvent sur de grandes bases d'images, elles restent imprécises lors du traitement de nouveaux cas. Ceci est dû à la forte variabilité anatomique et fonctionnelle du cortex cérébral ;
- L'étiquetage, tel qu'effectué dans ces approches, consiste à référencer des listes de termes simples, sans leur associer de sémantique précise qui puisse être exploitée par des humains, et surtout par des machines ;
- Enfin, ces approches sont très sensibles aux déformations et décalages causés par des processus pathologiques, comme les tumeurs, parce qu'elles sont construites unique-

⁴<http://brainvisa.info/doc/brainvisa/en/processes/recognition.html>

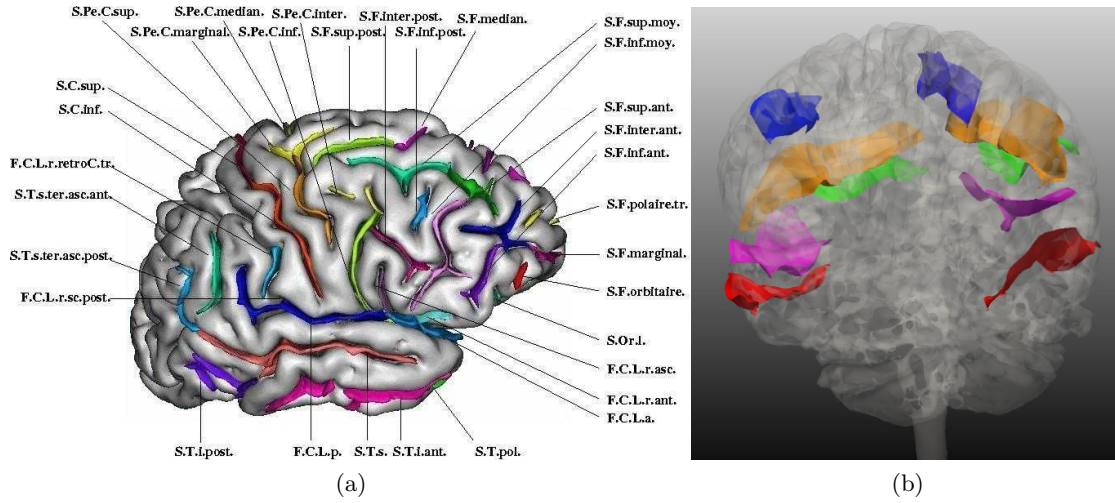


FIG. 4.6: (a) reconnaissance des sillons par la méthode de [167]. (b) Classification des sillons par la méthode de [127].

ment sur des cerveaux sains.

Pour toutes ces raisons, et bien d'autres, des approches d'annotation intégrant la connaissance symbolique sont développées par la communauté scientifique.

4.3 Approches symboliques et mixtes d'annotation d'images du cerveau

Contrairement aux approches numériques, qui utilisent des techniques statistiques, les approches symboliques, elles, exploitent les indices structurels sur les données et utilisent des classifieurs qui consistent souvent en un ensemble de règles s'appuyant sur des indices lexicaux, morphosyntaxiques, etc. On distingue deux grandes familles de l'approche symbolique : l'approche linguistique et l'approche par apprentissage. L'approche linguistique consiste en des définitions opérationnelles des éléments à acquérir, établies par expertise linguistique, et des indices structurels donnés a priori. En revanche l'approche par apprentissage se base sur l'analyse d'exemples (souvent en grand nombre), à partir desquels on extrait une connaissance. Les règles de production, par exemple, sont un moyen efficace de représentation des connaissances symboliques qui sont sous forme d'un grand nombre de faits discrets [96]. Les objets structurés (Structured objects en anglais) sont le plus souvent organisés sous la forme d'un graphe. Les réseaux sémantiques sont le premier système de ce type à être développé [158]. Dans le modèle du réseau sémantique, les objets,

les concepts et les actions sont représentées par des noeuds. Les relations entre ces noeuds sont représentées par des arcs étiquetés.

Les réseaux sémantiques ont été intégrés dans de nombreux travaux en interprétation d'images. Niemann et al. [146] décrivent un système de représentation de connaissances basé sur un modèle de réseau sémantique. Ils montrent comment les réseaux sémantiques peuvent être utilisés pour la compréhension des images. Carlsen et al. [38] ont proposé un système basé-connaissances pour l'interprétation des images IRM du crâne qui utilise un réseau sémantique. Le système proposé associe à la segmentation des images crâniennes faite par une classification floue, une interprétation guidée par un modèle symbolique. Plus précisément, les auteurs se servent de quatre sources de connaissances : anatomiques, d'imagerie IRM, cliniques et statistiques, afin de dériver un modèle sous forme d'un réseau sémantique qui correspond à chaque nouveau cas (nouvelle image). Ce modèle est supposé contenir une connaissance plus riche et plus pertinente pour le cas étudié. Ensuite, pour l'interprétation des objets résultant de la classification floue, un "matching" (une mise en correspondance) est effectué entre ce modèle et la description symbolique des objets segmentés. Ainsi, les valeurs floues issues de ce "matching" sont utilisées pour générer un vecteur indiquant, pour chaque objet segmenté dans l'image, la plausibilité de son appartenance à des structures anatomiques. Elles sont également utilisées pour afficher sur l'image les étiquettes les plus plausibles. Deux étapes majeures sont effectuées pour "matcher" le modèle individuel et la description de l'image : 1) un "matching" flou qui consiste en un graphe de compatibilité décrivant la similarité entre les objets du modèle individuel et les objets segmentés sur l'image, 2) une recherche du plus grand ensemble des "matchings", mutuellement compatibles. Cependant, les auteurs rapportent que les résultats qu'ils ont obtenus, bien que meilleurs que ceux obtenus avec d'autres systèmes utilisés en radiologie à l'époque, ne répondaient pas aux besoins cliniques formulés par les cliniciens. Ce travail met en évidence quelques avantages des approches symboliques : 1) possibilité de gestion de plusieurs sources d'information et leur intégration dans un processus de raisonnement pour effectuer une tâche particulière; 2) une meilleure prise en compte de l'information imprécise et incertaine provenant des images du cerveau, en utilisant le formalisme de la logique floue; 3) et une meilleure prise en compte des aspects relationnels entre les structures anatomiques. Zachmann [219] a, lui aussi, utilisé les réseaux sémantiques pour l'interprétation des images IRM du crâne, s'appuyant cette fois-ci sur un atlas numérique. L'approche proposée s'effectue en deux étapes : la première se base sur un réseau sémantique et consiste à partitionner l'image IRM en plusieurs régions. La deuxième étape, elle, utilise un atlas numérique pour identifier les sous structures du liquide céphalo-rachidien. Ceci est fait en utilisant les structures représentées dans l'atlas comme des modèles (templates), sur lesquels on recalc l'image IRM. Le degré de recouvrement entre les sous structures du liquide céphalo-rachidien dans l'atlas et les composants obtenus dans la première étape détermine la plausibilité, pour ces composants, de l'appartenance à ces sous structures. Cependant, ce "matching" naïf avec l'atlas n'est pas fiable. D'ailleurs lors des tests

effectués par les auteurs, dès que l'anatomie dans une image d'un patient varie légèrement par rapport à l'atlas, l'identification échoue.

Le problème majeur des réseaux sémantiques est l'absence d'une théorie formelle pour la définition de la sémantique. Il n'y a pas de distinction fondamentale entre les différents types de liens. Les "frames" [136] sont des approches de représentation d'objets structurés qui permettent un regroupement plus systématique de l'information. Elles sont destinées à stocker des représentations stéréotypées des différents objets et événements. Les "frames" individuelles correspondent aux noeuds dans un réseau sémantique, et les relations entre les frames correspondent aux arcs dans un réseau sémantique. Chaque "frame" contient des informations sur un objet particulier ou une catégorie d'objets. Les "frames" sont des structures de données complexes qui représentent des concepts. Elles ont un nom et une série d'attributs appelés des slots. Elles sont en effet très attrayantes en tant que méthode de représentation de modèles de haut niveau des structures anatomiques, pour une utilisation dans un système de vision. Elles permettent de représenter les caractéristiques anatomiques génériques et les relations entre ces caractéristiques. Elles permettent également à des instances spécifiques des concepts (détectées par exemple à partir des images en entrée) d'être stockées dans la même structure que le modèle. Enfin, l'utilisation des fonctions d'héritage offertes par les "frames" permet de guider l'interprétation en recherchant des arrangements spécifiques des entités anatomiques dans les images. Par exemple Robinson et al. [169] ont proposé une approche originale de reconnaissance d'objets anatomiques dans les images du cerveau, qui consiste à concevoir d'abord un modèle symbolique du cerveau humain sous forme de "frames" basées sur un réseau sémantique se composant de trois graphes : 1) un graphe d'adjacence spatiale concernant les structures anatomiques du cerveau ; 2) une hiérarchie des parties spécifiant pour chaque structure ses éventuelles parties ; 3) et un graphe d'héritage permettant à une "frame" d'hériter des valeurs pour les "slots" qui la caractérisent. Ensuite, ils ont proposé une méthode qui utilise ce modèle afin de guider la reconnaissance des objets dans les images anatomiques du cerveau. Cette méthode est similaire à un ATMS (Assumption-based Truth Maintenance System) [112], qui permet de raisonner simultanément sur un ensemble d'hypothèses éventuellement incompatibles. Chaque objet segmenté sur l'image est transformé en "frame" dans le modèle et les relations topologiques, directionnelles, de forme et de taille de chaque objet sont transformées en "slots" dans la "frame" correspondante. Ensuite un "matching" est effectué afin de déterminer pour chaque "frame" la structure, dans le modèle, dont les caractéristiques lui ressemblent le plus. Pour chaque "matching" une valeur de similarité comprise entre 0 et 1 est calculée, et seuls les "matchings" dont les valeurs de similarité sont supérieures à 0.85 sont retenus. Chaque "matching" retenu génère alors ce que les auteurs appellent "un point de vue". La fusion des différents points de vue se base sur la coïncidence des relations spatiales entre les objets avec celles entre les structures anatomiques dans le modèle. Cette approche a eu le mérite de développer un modèle symbolique du cerveau indépendamment de son utilisation dans le raisonnement, même si ce dernier n'est

pas construit d'une manière qui permet son partage. Le raisonnement utilisé, basé sur la gestion d'hypothèses, est original et adéquat pour pouvoir prendre en compte la variabilité anatomique. Cependant, le seuil de 0.85 utilisé pour la génération des points de vue n'est pas justifié, ce qui peut être un handicap. L'expérience a, en effet, montré que l'utilisation des seuils dans de telles applications n'est pas recommandée. Enfin, les tests effectués par les auteurs ne reflètent pas une vraie application, ils restent au niveau d'un cas d'utilisation. Sonka et al. [193] ont repris l'idée de la gestion d'hypothèses et ont proposé une méthode d'interprétation d'images IRM du cerveau qui utilise cette idée, mais d'une manière plus efficace (figure 4.7). En effet, le principe de leur méthode consiste à émettre des hypothèses, correspondant à des interprétations de l'image, et utiliser ensuite un algorithme génétique d'optimisation, itératif, afin de vérifier la validité de ces hypothèses et de converger vers la meilleure interprétation de l'image. La figure 4.7 détaille la stratégie générale utilisée pour la segmentation et la reconnaissance des structures neuroanatomiques. La première étape consiste à segmenter l'image IRM pour obtenir un grand nombre de régions segmentées. L'étape suivante consiste à construire un graphe d'adjacence des régions, qui décrit les propriétés de chaque région ainsi que ses relations avec ses voisins. Ensuite un algorithme génétique est utilisé pour générer une population d'hypothèses interprétant l'image, représentées comme des chaînes de caractères. A chaque région est associée une position dans la chaîne de caractères, ainsi qu'une étiquette (hypothèse) correspondant à la structure neuroanatomique à laquelle elle est supposée appartenir. Le degré de confiance associé à une hypothèse particulière est évalué par le moyen d'une fonction objectif qui compare l'information contenue dans l'image à la connaissance a priori sur les régions et les objets de l'image, leurs formes, leurs positions et leurs relations. L'algorithme génétique sert à conserver les bonnes hypothèses et éliminer les mauvaises, et au bout d'un certain nombre d'itérations il converge vers l'interprétation optimale de l'image. Un apprentissage préalable a été effectué sur 20 images IRM-T1 de cerveaux de sujets sains pour segmenter et étiqueter 17 structures neuroanatomiques. La validation a ensuite été faite sur 8 sujets sains. Les résultats obtenus et rapportés par les auteurs sont assez satisfaisants. Cependant aucun test n'a été effectué sur des données pathologiques, ce qui aurait été intéressant dans la mesure où l'une des étapes se base sur l'information a priori sur la forme des structures anatomiques, leurs positions et relations avec leur voisinage, ce qui peut laisser penser que cette méthode ne traite pas les cas pathologiques.

Outre la gestion d'hypothèses, qui est une belle idée théorique pour la gestion de la variabilité anatomique du cerveau, mais souvent difficile à réaliser en pratique, une autre manière de gérer cette variabilité est de l'intégrer dans le modèle qui la représente, en effectuant par exemple un apprentissage sur une grande base de sujets. En effet, l'apprentissage est utilisé avec succès dans la construction des atlas numériques, mais peut très bien être utilisé dans un module d'un système symbolique global d'interprétation d'images. C'est ce qu'ont fait Dellepiane et al. [60] en développant une excellente méthodologie qui consiste en un modèle de reconnaissance d'images IRM pathologiques du cerveau. La génération

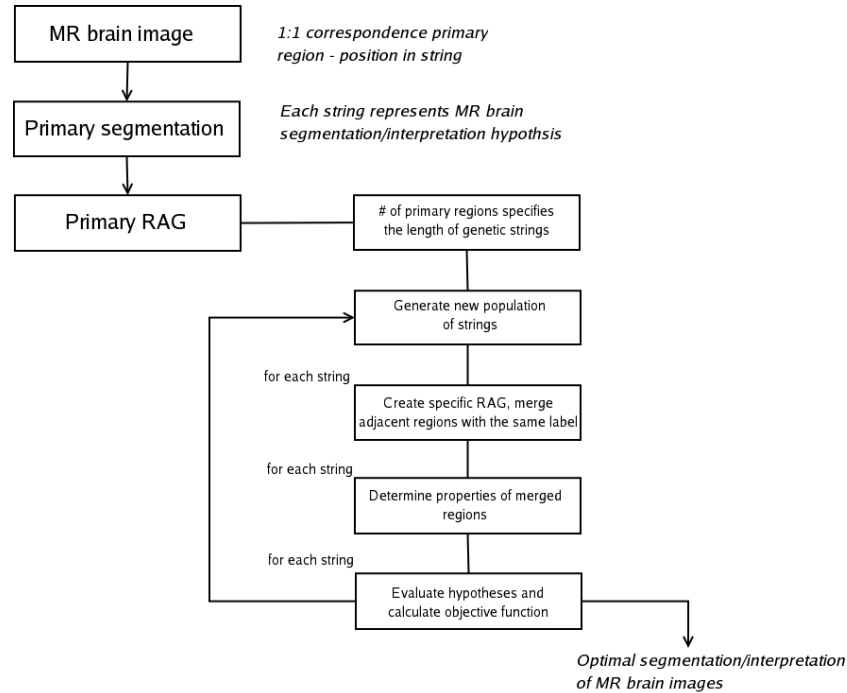


FIG. 4.7: Diagramme d'interprétation des images du cerveau, basé sur un algorithme génétique [193].

de leur modèle suit les quatre étapes suivantes :

- Choix d'un vocabulaire approprié pour décrire les classes de l'image. Pour cela, un ensemble d'attributs et de relations sont définis pour caractériser les organes et les tissus d'une image ;
- Formalisation mathématique du vocabulaire. Les auteurs ont adopté une approche floue qui tient compte des imprécisions ;
- Description des classes d'image, en sélectionnant un ensemble d'apprentissage d'images et en analysant leurs propriétés avec l'aide des experts ;
- Enfin le test du modèle sur un ensemble d'images.

La comparaison des objets émanant des images et le modèle conçu se fait ensuite grâce à un "matching" basé sur les règles de la logique floue. L'interprétation finale, qui a la valeur floue la plus élevée, consiste à regrouper les objets comme dans le modèle, cependant des interprétations alternatives, ayant des valeurs floues moins importantes, sont disponibles pour l'utilisateur. Les résultats obtenus par cette approche sur des données pathologiques du cerveau, étaient bons, selon les auteurs. Les inconvénients de l'approche sont d'une

part la définition non consensuelle du vocabulaire utilisé pour décrire les relations dans le modèle, ce qui n'était pas un enjeu à l'époque, et d'autre part la restriction à l'identification d'un petit nombre de structures anatomiques dont la forme est peu variable, telles que les ventricules.

De nombreux autres travaux se sont intéressés à l'utilisation des modèles symboliques de haut niveau pour l'aide à l'analyse des images médicales en général, et du cerveau en particulier [135, 59, 186, 160]. Cependant, les approches symboliques ont été délaissées pendant plusieurs années au profit des approches numériques, avant de re-gagner à nouveau l'intérêt de la communauté scientifique, et ce grâce à l'avènement du Web Sémantique et l'apparition de nouveaux défis dans la recherche. En effet, d'une part les enjeux ont évolué depuis la création du Web Sémantique et avec l'apparition de nouveaux besoins en terme de partage de connaissances et de données expérimentales, et d'autre part les avancées obtenues en Intelligence Artificielle en terme de raisonnement et de représentation de connaissances, ont ouvert de nouvelles opportunités pour leur utilisation dans le domaine de l'interprétation d'images. Par ailleurs, ces dernières années on a assisté à une augmentation phénoménale des capacités de stockage et d'interconnexion des réseaux, ce qui a conduit à un volume considérable de données numériques, notamment d'images, disponibles sur le Web, et dont l'exploitation efficace nécessite de disposer de systèmes d'indexation, permettant aux utilisateurs de rechercher des images selon ce qu'elles représentent (selon leur sémantique).

Dans la section 4.1 on avait parlé de l'importance des relations spatiales en interprétation des images anatomiques. Atif et al. [9] proposent, justement, une représentation sous forme de graphe et de modèles flous pour les relations spatiales. Ces représentations sont ensuite utilisées dans un processus de raisonnement pour guider la reconnaissance des structures cérébrales dans des images. L'originalité de leur approche, rappelons-le, réside dans la modélisation des différents types de tumeurs du cerveau dans une ontologie, appelée ontologie des tumeurs, et la possibilité d'interpréter aussi bien des cas normaux que pathologiques. Ceci est fait en adaptant les connaissances génériques (représentées sous forme de graphe) et le raisonnement pour prendre en compte l'influence des pathologies sur les relations spatiales. La méthode d'adaptation utilise l'ontologie des tumeurs et la connaissance sur la variabilité des relations spatiales, causées par des processus pathologiques, apprise sur une base de cas pathologiques. L'utilisation des graphes est pertinente dans leur approche et constitue un autre élément d'originalité. En effet, les graphes spatiaux, c'est-à-dire dont les noeuds représentent des régions de l'image et les arcs représentent des relations spatiales entre ces régions, sont des structures plus adéquates pour être utilisées de manière opérationnelle afin de guider la segmentation et l'interprétation d'images [48]. L'ontologie des relations floues [107], présentée dans la section 4.1, contribue également à une meilleure interprétation des images du cerveau. Les auteurs ont représenté leur ontologie en OWL DL, ce qui leur a permis d'utiliser les domaines concrets flous pour ancrer les concepts de leur ontologie dans le domaine de l'image. L'idée de l'utilisation des domaines

concrets a déjà été abordée par Aufaure et al. [11] dans leur travaux sur l'annotation sémantique des images. Hudelot et al. ont eu le mérite de l'étendre aux domaines concrets flous.

Au centre⁵ de recherche en informatique biomédicale de l'Université de Stanford⁶, beaucoup d'efforts ont été consentis pour l'utilisation des ontologies dans l'annotation sémantique des images médicales. Rubin et al. [175] ont développé un modèle d'annotation d'images médicales qu'ils ont appelé *AIM* (Annotation and Image Markup). Afin de promouvoir ce modèle, un outil a été développé dans le cadre de l'initiative CaBIG⁷ de l'Institut National américain du Cancer. Le but des auteurs n'était pas de développer un système d'interprétation d'image complètement automatique, mais plutôt un outil d'aide à la production d'annotations qui faciliteraient l'intégration sémantique et la compréhension du contenu des images médicales, ainsi que toutes les données qui leur sont inhérentes. Ils proposent de créer une ontologie qui spécifie les entités et les relations nécessaires à la représentation de la sémantique du contenu des images médicales. Enfin, les annotations créées sont stockées en XML, avec la possibilité de les transformer dans d'autres formats tels que DICOM-SR⁸, HL7⁹, ou OWL, plus appropriés à l'environnement où les images sont stockées. Toujours dans la continuité de ce travail, Rubin et al. [176] ont développé un outil qui s'appelle *iPad*, permettant aux chercheurs et aux cliniciens de créer des annotations sémantiques sur des images radiologiques, en utilisant une interface graphique qui mappe, semi-automatiquement, leurs descriptions à une ontologie d'annotation pré-définie.

Même si les nouvelles approches qui utilisent les ontologies répondent en partie aux nouveaux besoins de la recherche translationnelle dans le cadre du Web Sémantique, elles restent très spécifiques aux modalités des images considérées et du contexte d'utilisation. Möller et al. [137, 138] soulignent que même dans un domaine restreint tel que la médecine, il n'y a pas encore de méthode générique, proprement dite, pour l'annotation automatique des images, et que les méthodes existantes sont dépendantes du type et de la modalité des images annotées. Ils proposent alors une architecture d'un système générique, qui combine l'information provenant des images médicales avec la connaissance a priori formalisée dans une ontologie, fournissant ainsi un cadre pour la construction de connaissances universelles, et permettant aux cliniciens un accès multilingue et multimodal aux différents types d'images.

Dans un cadre plus général de l'imagerie médicale, non spécifique au cerveau, d'autres travaux sur l'annotation sémantique d'images utilisant les technologies du Web Sémantique

⁵<http://bmir.stanford.edu/>

⁶<http://www.stanford.edu/>

⁷(cancer Biomedical Informatics Grid, une initiative dont l'objectif est de créer un réseau d'information permettant à toute la communauté dans le domaine du cancer de partager les données et les connaissances)
- <https://cabig.nci.nih.gov/>

⁸<http://www.pixelmed.com/srbook.html>

⁹http://fr.wikipedia.org/wiki/Health_Level_7

existent. Par exemple dans [58] les auteurs proposent un système utilisant les technologies du Web Sémantique, dont l'objectif est d'augmenter la précision du dépistage du cancer du sein, qui intègre des outils d'annotation et d'analyse d'images, et d'extraction de caractéristiques symboliques à partir des images avec des ontologies en OWL, en reliant les images à des instances de classes de ces ontologies. Toujours en relation avec le cancer du sein, Hu et al. [106] ont mis au point une ontologie de l'imagerie de cancer du sein, basée sur les logiques de description, afin d'annoter plus précisément l'anomalie présente dans les images mammographiques. Ces travaux soulignent l'importance d'une démarche collaborative multi-disciplinaire dans le processus d'établissement d'un diagnostic. Lajmi et al. [116] proposent justement un système de gestion collaborative d'images médicales, baptisé SyLGeCom. L'objectif des auteurs est de concevoir une chaîne cohérente d'interprétation des images médicales pour aider un médecin à les annoter.

Dans un cadre encore plus général, non spécifique à l'imagerie médicale, de nombreux travaux sont réalisés sur l'annotation sémantique et l'interprétation des images naturelles et des documents textuels. Dans [145] les auteurs décrivent un système d'interprétation d'images naturelles basé sur les logiques de description. Les contraintes spatiales et temporelles dans leur système sont exprimées en logiques de description, et les interprétations d'images sont représentées comme des agrégats formant des hypothèses susceptibles d'être des interprétations pour l'image. Certaines interprétations sont éliminées grâce aux restrictions imposées par les axiomes de la TBox, ensuite une approche probabiliste, de type réseau bayésien, est appliquée pour le choix de l'interprétation la plus probable. Saathoff et al. [178] proposent, eux, une approche d'interprétation d'images naturelles, basée sur la gestion d'hypothèses. En effet, dans cette approche, se déroulant en deux phases, on exploite les connaissances spatiales pour la labellisation des régions définies sur des images : la première étape consiste à émettre des hypothèses pour les différentes parties de l'image, et la deuxième raffine les étiquettes de la première labellisation en utilisant un raisonnement par contraintes qui exploite les connaissances a priori sur les relations spatiales entre les différents objets de la scène. Nauer et Napoli [143] présentent une approche pour la classification des documents basée sur la notion de similarité et une représentation effective du contenu de ces documents. En effet, ce contenu est annoté et le résultat de l'annotation est représenté par un arbre étiqueté dont les noeuds et les arêtes sont représentés par des concepts définis dans une ontologie de domaine.

Enfin, et outre l'interprétation, la recherche d'information sur des bases d'images est un autre enjeu important. En effet, les ontologies développées dans le domaine biomédical peuvent servir aussi pour une recherche sémantique d'images. Dans [221], par exemple, les auteurs ont abordé la question de comment améliorer la recherche sémantique de l'ensemble des systèmes de recherche d'images par leur contenu dans le domaine médical. Wei et al. [214] ont élaboré plusieurs travaux dans le cadre d'un système de recherche d'image médicales. Ils exploitent pour cela des techniques proposées dans le cadre du Web Sémantique pour spécifier une conceptualisation des ressources nécessaires.

4.4 Discussion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes approches d'annotation et d'interprétation des images anatomiques du cerveau. Nous avons vu également l'importance des relations spatiales entre les structures anatomiques du cerveau dans le processus d'interprétation. Les approches numériques sont beaucoup plus utilisées au sein de la communauté de la neuroimagerie que les approches symboliques. La facilité de leur intégration dans les outils d'annotation et leur caractère automatique sont les facteurs majeurs de leur succès au sein de cette communauté. Cependant, les approches numériques s'avèrent insuffisantes, parce que, d'une part, elles manquent de précision, elles n'associent pas de sémantique riche aux structures segmentées, elles sont sensibles aux déformations causées par des processus pathologiques, elles ne représentent pas explicitement les relations entre les structures anatomiques, etc. D'autre part, l'Internet a fait émerger de nouveaux besoins, concernant notamment le partage de connaissances et de données (particulièrement d'images). De plus, les capacités de stockage ont considérablement augmenté, et le volume d'images disponibles sur Internet est de plus en plus croissant, nécessitant de nouvelles techniques pour leur gestion. Les approches symboliques, elles, permettent une annotation plus précise des images anatomiques et une meilleure gestion des cas pathologiques, ceci grâce à l'utilisation de connaissances a priori riches et d'une manière dynamique, c'est-à-dire lors du traitement d'un nouveau cas, pendant le processus d'annotation. De plus, elles associent une sémantique explicite et riche aux structures segmentées et aux relations entre elles. Par ailleurs, les nouvelles technologies du Web Sémantique, notamment les ontologies, constituent une solution pertinente pour faire face aux nouveaux besoins liés au partage d'images à grande échelle sur Internet. En effet, les ontologies permettent d'associer aux structures anatomiques des définitions explicites, consensuelles, formelles et riches en sémantique. L'utilisation des ontologies pour la description du contenu sémantique des images facilite leur intégration et leur gestion efficace sur le Web. Cependant, l'utilisation des ontologies dans les outils d'annotation est souvent une tâche difficile, qui demande une intervention, parfois excessive, de la part de l'utilisateur dans le processus d'annotation. Une solution intermédiaire serait alors de combiner les atlas avec les systèmes d'interprétation d'images s'appuyant sur une connaissance exprimée dans une ontologie générique et formelle pour, d'une part, apporter des solutions aux insuffisances des approches numériques, et d'autre part rendre les approches symboliques plus automatiques et plus à même de répondre aux nouveaux défis de la recherche, en utilisant les technologies du Web Sémantique. C'est ce que nous montrons dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Contribution : Un nouveau système hybride pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau

Notre contribution consiste en un système hybride combinant des connaissances numériques et symboliques pour l'annotation sémantique des structures anatomiques tridimensionnelles, extraites automatiquement des images de résonance magnétique du cerveau. Dans ce cas, les connaissances numériques consistent en un atlas des gyri du cerveau, et les connaissances symboliques consistent en l'ontologie formelle de l'anatomie sulco-gyrale du cortex cérébral décrite dans le chapitre 3.

La qualité des annotations produites par notre système est importante, étant donné qu'elles sont sensées servir, entre autres, comme des repères pour le neurochirurgien lors d'une intervention chirurgicale, afin de préserver les zones fonctionnelles entourant une lésion. Ces repères sont essentiellement les sillons et les gyri, faciliter leur identification est donc précieux pour le neurochirurgien [109]. Du fait de l'importance de ces repères, l'utilisateur doit pouvoir intervenir dans le processus d'annotation. Notre approche est une approche de type ROI (Region Of Interest), c'est-à-dire qu'elle consiste à annoter des régions que l'utilisateur sélectionne sur l'image. Notre motivation pour cela était le fait qu'un neurochirurgien ne s'intéresse pas à la totalité du cerveau, mais souvent à une région particulière, où, par exemple, est localisée une tumeur.

Le système que nous avons conçu devait être facilement utilisable, notamment par des médecins. Pour cela, nous avons opté pour une architecture de type client/serveur permettant à tout client de faire appel aux différents modules de raisonnement (localisés dans le serveur) offerts par notre système pour l'annotation des images IRM du cerveau. Dans notre cas, le client peut être n'importe quel utilisateur disposant du logiciel de visualisation d'images développé au sein de l'équipe, le **GisViewer** en l'occurrence. Il suffit pour l'utilisateur de charger son image, sélectionner la région sur cerveau qu'il souhaite annoter et se connecter au système pour produire les annotations.

Enfin, dans le but d'avoir des annotations partageables dans le cadre du Web Sémantique, nous avons réutilisé une ontologie de haut niveau existante concernant l'annotation des régions d'intérêt en neuroimagerie élaborée par Temal et al. [203], et nous avons choisi une représentation dans les langages standards du Web.

5.1 Introduction

Le système que nous avons développé vise d'une part à améliorer les méthodes classiques [207, 36, 73, 44] de découpage du cerveau en régions, et d'autre part il répond aux nouveaux besoins de la recherche en termes de partage des données expérimentales. Dans ce qui suit nous décrivons un système hybride pour l'annotation sémantique des images anatomiques 3D de résonance magnétique (IRM), dont les objectifs initiaux étaient l'identification des parties de gyri et de sillons entourant une lésion, qui servent de repères pour le neurochirurgien, et l'utilisation de ces métadonnées pour la recherche de cas similaires dans une base d'images. Le système est dit hybride parce qu'il est basé sur une combinai-

son de connaissances numériques et symboliques, utilisées de manière complémentaire. Les connaissances numériques utilisées sont un atlas des gyri, et les connaissances symboliques consistent en une ontologie richement axiomatisée de l'anatomie sulco-gyrale, décrivant les relations méreo-topologiques entre les structures anatomiques du cortex cérébral décrite dans le chapitre 3. Nous mettons justement l'accent sur cette combinaison, et les bénéfices qu'on peut en tirer dans une application telle que l'annotation sémantique d'images. Le processus d'annotation consiste à produire des instances de l'ontologie concernant les parties de gyri et de sillons impliquées dans un ensemble de primitives graphiques extraites d'une région d'intérêt (ROI) sélectionnée par l'utilisateur sur une image, qui satisfont les axiomes et les contraintes définis dans l'ontologie. Cependant, le grand nombre de combinaisons possibles nous a amenés à adopter une approche hybride, qui consiste à sélectionner un nombre raisonnable d'hypothèses pour la labellisation des parties de gyri, en se basant sur l'atlas, et à déterminer ensuite les combinaisons valides de ces hypothèses, en utilisant la connaissance a priori sur l'arrangement spatial des gyri dans le cerveau [132, 133].

Pour que les annotations produites par le système deviennent partageables, il faut qu'elles soient consensuelles et représentées dans un langage qui permet leur partage. Pour ce faire, nous sommes partis d'une ontologie existante de partage d'annotations sur des régions d'intérêt en neuroimagerie et nous avons représenté ces dernières en RDF(S) pour faciliter leur partage dans le cadre du Web Sémantique, ainsi que leur interrogation par des requêtes SPARQL.

5.2 Combiner le numérique et le symbolique en neuroimagerie

Les approches classiques de découpage en régions du cortex cérébral dans les images IRM sont généralement numériques [207, 36, 73, 44]. Il s'agit le plus souvent d'approches morphométriques ou statistiques, basées sur des modèles mathématiques et des analyses statistiques très élaborés. Ces approches ont connu un grand succès dans la communauté de la neuroimagerie. Ce succès est dû, entre autres, au caractère automatique de ces approches et leur intégration dans les outils de visualisation d'images, ce qui n'est pas négligeable pour cette communauté. Cependant, ces approches commencent à atteindre leurs limites, malgré la sophistication des modèles qu'elles utilisent. Elles sont limitées en précision ; elles traitent uniquement les grandes structures anatomiques sans aller dans le détail de chacune d'entr'elles, elles ne sont pas robustes vis-à-vis des déformations et des décalages causés par les processus pathologiques tels que les tumeurs dans le cerveau, elles ne définissent pas explicitement les relations entre les structures anatomiques, et surtout, elles n'associent pas de sémantique explicite aux structures identifiées.

Les approches symboliques quant à elles, notamment les ontologies, permettent en

théorie de remédier aux limites des approches numériques. Elles décrivent les concepts anatomiques de manière précise et détaillée, elles leur associent une sémantique riche et elles sont représentées indépendamment des applications et des systèmes de coordonnées, ce qui leur permet d'être robustes vis-à-vis des déformations et les décalages causés par les processus pathologiques (tumeurs). Cependant, les ontologies ne peuvent constituer, à elles seules, une alternative aux approches numériques. Elles ont au moins deux inconvénients qui limitent leur utilisation dans des domaines tels que la neuroimagerie. D'abord les outils de raisonnement qui exploitent les connaissances exprimées dans les ontologies ne permettent pas encore des inférences fructueuses de manière totalement automatique, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas encore capables d'exploiter toutes les contraintes (sur les instances) exprimées dans l'ontologie pour réduire l'espace de recherche de solution, sans qu'ils deviennent indécidables ou exécutables dans des temps non raisonnables, incompatibles avec des applications interactives. Aussi, il est difficile d'intégrer les ontologies dans les outils d'annotation et de visualisation d'images, parce qu'elles décrivent un domaine particulier, tel que l'anatomie, d'une manière abstraite, sans être reliées à un repère quelconque dans l'espace.

On voit bien que ces deux approches peuvent être complémentaires au lieu d'être alternatives l'une de l'autre. Dans la section suivante, nous décrivons justement un système hybride d'annotation d'images IRM du cerveau, qui utilise de manière complémentaire un atlas des gyri et l'ontologie sulco-gyrale.

5.3 Un système hybride d'annotation des structures anatomiques extraites des images IRM du cerveau

Le système décrit ici vise à produire des annotations sémantiques associées aux parties de gyri et de sillons, appelées patches et segments respectivement (figure 5.1).

Le système est conçu selon une approche sémantique plutôt qu'une approche statistique ou morphométrique. Un atlas des gyri est utilisé pour initialiser le processus d'annotation, qui, lui, est basé sur l'ontologie sulco-gyrale. Cette initialisation consiste à sélectionner, à partir de l'atlas, un ensemble réduit d'hypothèses pour chaque patch extrait de l'image. Cette initialisation permet au système d'être plus automatique et de converger rapidement, c'est-à-dire avec un minimum d'interventions de la part de l'utilisateur, vers la bonne interprétation des patches, en s'appuyant sur les axiomes et les contraintes définis dans l'ontologie.

5.3.1 Fonctionnement global du système d'annotation

Le processus d'annotation se déroule en quatre étapes principales (figure 5.2) :

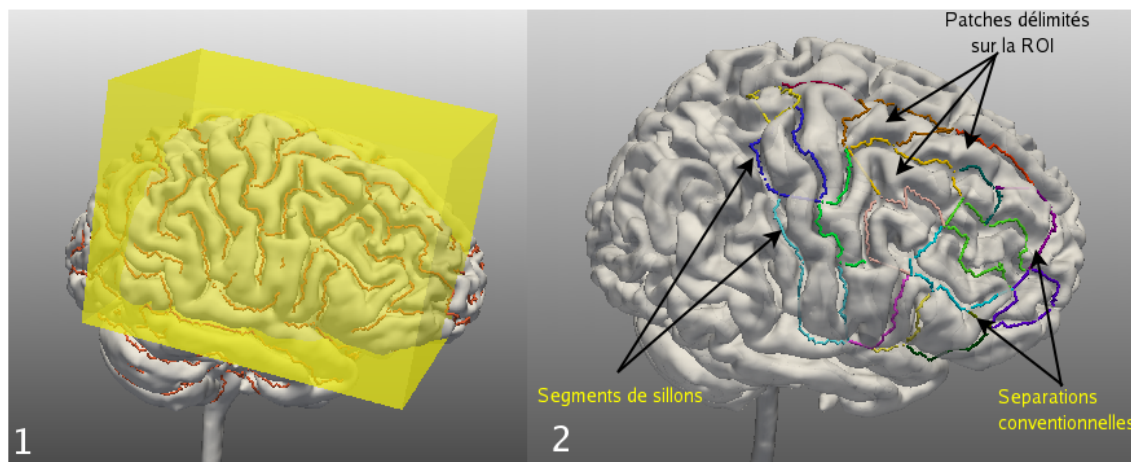


FIG. 5.1: Un exemple de région d'intérêt, sélectionnée par l'utilisateur pour l'annotation. (1) Une boîte englobante est ajustée sur la région à annoter, et l'ensemble des traces externes des sillons (segments) incluses dans cette boîte est automatiquement extrait. (2) L'utilisateur forme de petites surfaces appelées patches, en prolongeant les segments de sillons par des séparations conventionnelles.

1. Pré-traitements et délimitation des patches : cette étape consiste à segmenter le cerveau à partir d'une image IRM-T1, à extraire les traces externes des sillons [118], à sélectionner la région d'intérêt à annoter et à délimiter les patches, et enfin à décrire en OWL les relations topologiques et d'orientations associant les patches et les segments de sillons ;
2. Labellisation des patches : cette étape est traitée avec une approche de type CSP (Constraint Satisfaction Problem) [115], permettant de calculer toutes les interprétations, pour les patches, qui sont compatibles avec la connaissance a priori sur l'arrangement spatial des gyri dans le cerveau. Pour cela, le système utilise un ensemble d'hypothèses déduites du "matching" de la description des patches, faite à l'étape 1, avec l'atlas (les SPAMs de [46]). La meilleure interprétation pour les patches est ensuite déduite interactivement avec l'utilisateur, en éliminant les interprétations dans lesquelles une étiquette de patch est en contradiction avec l'information entrée par l'utilisateur ;
3. Labellisation des sillons : celle-ci s'appuie sur la description des patches faite à l'étape 1, sur la meilleure interprétation calculée à l'étape 3 et utilise les définitions logiques des sillons dans l'ontologie ;
4. Génération des annotations finales : dans cette dernière étape les annotations inférées

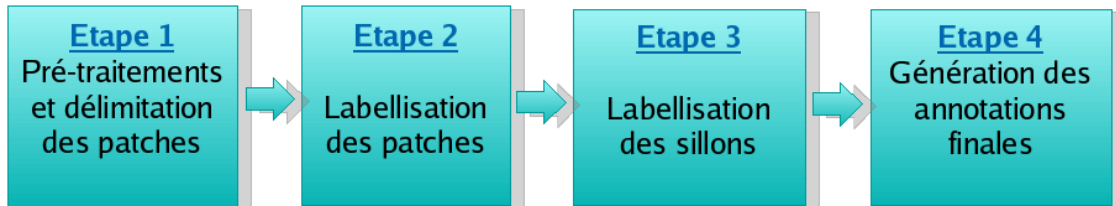


FIG. 5.2: Les principales étapes de l'annotation.

pour les patches et les segments de sillons sont décrites dans un fichier d'annotations en RDF, qui contient des métadonnées supplémentaires sur le contexte d'acquisition de l'image, l'atlas et la version de l'ontologie utilisés, l'identifiant de l'utilisateur, etc.

Un diagramme de séquence illustrant l'enchaînement des différentes tâches et les interactions entre les différents modules du système d'annotation est donné en annexe (chapitre 6).

5.3.2 Les connaissances impliquées dans le raisonnement

Les connaissances numériques

Comme on l'a dit précédemment, le système utilise un atlas pour l'initialisation du raisonnement par un ensemble d'hypothèses pour les patches. L'atlas utilisé est celui des SPAMs (Statistical Probability Anatomy Maps) [46]. Une SPAM est une carte probabiliste 3D associée à une structure anatomique particulière dans le cerveau. La valeur de voxel en chaque point représente la probabilité d'appartenance à une structure anatomique à cet endroit. Les SPAMs sont calculées sur une base d'images de 305 sujets sains, après le recalage des données IRM dans un référentiel commun, appelé l'espace stéréotaxique.

La figure 5.3 montre les différentes SPAMs correspondant aux différentes structures anatomiques 3D du cerveau. La nature statistique des SPAMs peut être appréciée au travers des intersections aux frontières des SPAMs voisines. Ces intersections correspondent aux valeurs de probabilités les plus faibles des SPAMs. Elles reflètent le degré de variabilité anatomique inter-individuelle en chaque point du cerveau chez la population étudiée. Par ailleurs, chaque SPAM est associée à une structure anatomique définie dans l'ontologie.

Les connaissances symboliques

Elles sont fournies par l'ontologie sulco-gyrale définie dans le chapitre 3. Celle-ci modélise les caractéristiques méréo-topologiques des sillons et des gyri. L'ontologie est étendue

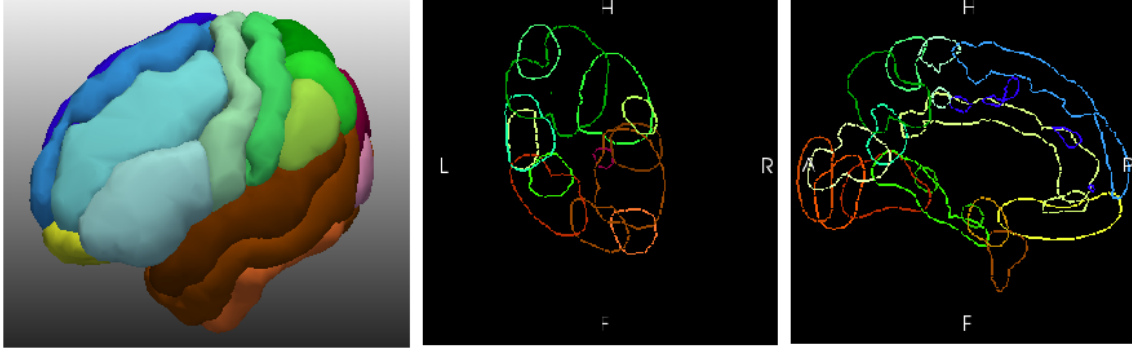


FIG. 5.3: Différentes vues sur les SPAMs.

par un ensemble de règles, afin d'augmenter son expressivité¹. Les définitions logiques des sillons dans l'ontologie servent à l'identification des segments de sillons par un classifieur DL. L'ontologie a également servi à spécifier, manuellement, les contraintes spatiales entre les gyri, pour qu'elles soient utilisées par le raisonneur CSP lors de la labellisation des patches. Ces contraintes tiennent compte aussi bien des relations d'orientation que d'adjacence entre les gyri et les parties de gyri. Ainsi, nous avons défini six contraintes spatiales correspondant aux six orientations, chacune représentée par un ensemble de tuples, tels que (*RightPreCentralGyrus*, *RightPostCentralGyrus*), un des tuples définissant la contrainte *anteriorTo*, qui exprime qu'une partie du gyrus précentral de l'hémisphère droit, peut être antérieure à une partie du gyrus postcentral du même hémisphère. Quelques tuples peuvent être de la forme (*RightSuperiorFrontalGyrus*, *RightSuperiorFrontalGyrus*) exprimant que certaines parties du gyrus frontal supérieur de l'hémisphère droit peuvent être antérieures à certaines autres parties du même gyrus. Les contraintes d'adjacence entre les gyri et parties de gyri sont plus importantes et plus privilégiées dans le système, parce qu'elles sont plus fiables, étant donné que leur calcul est indépendant du système de coordonnées, contrairement au calcul des orientations.

5.3.3 Processus de labellisation

Pré-traitements

La labellisation concerne les structures corticales du cerveau que sont les patches et les segments de sillons, ce qui nécessite un certain nombre de traitements préalables afin de matérialiser et de décrire ces structures. Ces traitements sont les suivants :

¹<http://idm.univ-rennes1.fr/~obierlai/>

1. D'abord le cerveau est segmenté et les traces externes des sillons sont extraites [118]² ;
2. Ensuite une ROI est sélectionnée et le sous graphe des traces externes des sillons correspondant à cette ROI est extrait. La sélection d'une ROI se fait en ajustant un parallélépipède sur la région qu'on souhaite annoter, comme montré sur la figure 5.1 ;
3. L'étape suivante consiste à définir de petites surfaces (les patches). Ces patches sont obtenus en désignant interactivement des points de fermeture, créant ainsi des lignes (appelées séparations conventionnelles) qui correspondent aux emplacements des plis de passage ;
4. Enfin, une fois les patches détectés, un fichier OWL décrivant les relations topologiques entre eux est généré (on appelle ce fichier *fichier#1*). Ce fichier décrit, pour chaque patch, les segments de sillons qui le bordent, les patches voisins, ainsi que sa position (ou son orientation) par rapport à chacun de ces derniers, c'est-à-dire par rapport aux segments qui le bordent et les patches voisins. La figure 5.4-a montre un extrait de ce fichier. On peut y lire par exemple que le patch **Patch2** est bordé postérieurement par une partie de sillon ayant l'identifiant 89.

✓ L'étape de détection des patches consiste à déterminer automatiquement les ensembles de segments et de séparations conventionnelles, où chaque ensemble forme un cycle qui correspond à un patch qu'on peut distinguer visuellement sur l'image. Pour ce faire, nous avons retenu une solution qui s'appuie sur les informations topologiques de la zone du cortex dont nous disposons, notamment les segments et les séparations conventionnelles, et qui consiste à chercher celles qui forment des cycles correspondant aux patches visibles sur la scène. Il existe certes une multitude d'algorithmes de graphes existants mais, à notre connaissance, aucune méthode existante ne correspond à notre problème. Ainsi, la solution retenue est de choisir, lors de la recherche d'un cycle, le segment voisin (ou la séparation conventionnelle voisine) la "plus à droite" du segment courant, à chaque fois qu'un choix est nécessaire. De cette façon, il est possible de faire converger notre algorithme de détection de patches. Une description détaillée de cette étape est donnée en annexe (chapitre 6).

✓ Nous étions également confrontés au problème du calcul des orientations entre les patches et les segments qui les forment (ou qui les bordent). En effet, une méthode classique utilisée pour calculer une orientation d'un objet par rapport à un autre objet consiste à comparer les coordonnées des centres de gravité de leurs boîtes englobantes minimales. Dans notre cas, cette méthode a donné de bons résultats lors du calcul des orientations entre des patches voisins, étant donné que leurs formes et leurs tailles sont en général homogènes. En revanche, le calcul d'orientation entre un patch et les segments de sillons qui le bordent n'est pas toujours fiable : la figure 5.6 montre un exemple illustratif dans lequel la méthode des boîtes englobantes est en échec. Pour remédier à l'insuffisance de

²Les logiciels Brainvisa (http://brainvisa.info/index_f.html) ont été utilisés dans cette étape.

b : fichier#2

la méthode des boîtes englobantes minimales nous avons utilisé un calcul d'orientation, entre les patches et les segments de sillons qui les bordent, se basant sur la méthode des boîtes minimales englobantes des frontières interfaces défini dans [99, 61]. Dans cette

méthode, on désigne par le terme “frontière interface” la frontière qui se trouve en face d’une autre région étant donnée une direction cardinale. La figure 5.5 montre les frontières interfaces, formalisées par les auteurs, pour les différentes directions cardinales. La boîte minimale englobante de la frontière interface dans une direction d ($bme fi_d$) est définie par $(inf x(Cd(a, b)), inf y(Cd(a, b))), (sup x(Cd(a, b)), sup y(Cd(a, b)))$ [99, 61], où $Cd(a, b)$ représente la frontière interface dans la direction d (figure 5.5-droite).

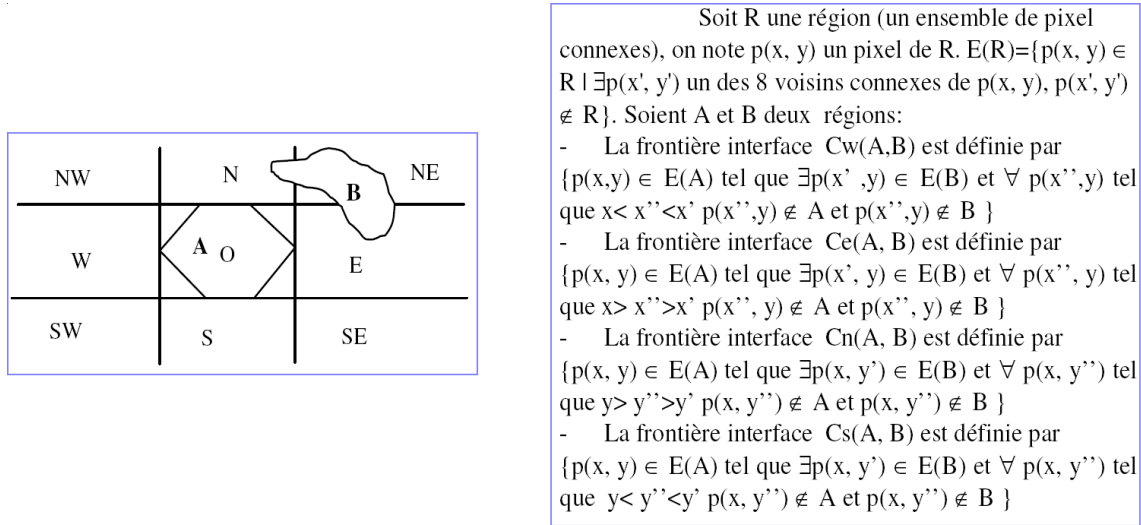


FIG. 5.5: (A gauche) les différentes directions cardinales entre deux régions A et B sur un plan, (à droite) définitions formelles des frontières interfaces correspondant aux différentes directions cardinales sur un plan [99].

L'exemple sur la figure 5.6 illustre un cas où la méthode des boîtes minimales englobantes des frontières interfaces est plus efficace que la technique des boîtes englobantes minimales.

Pré-labellisation des patches

Les segments du sous graphe des traces externes des sillons, inclus dans la région d'intérêt sélectionnée par l'utilisateur, sont recalés dans l'espace des SPAMs (l'espace stéréotaxique) grâce à la matrice de recalage obtenue lors du recalage préalable des données IRM avec l'espace stéréotaxique de référence (figure 5.8). Un programme analyse la position de chaque segment par rapport à chaque SPAM, et détermine s'il la borde ou pas, et avec quelle orientation. En effet, pour chaque SPAM un algorithme détermine pour chaque point de chaque segment s'il appartient ou non à cette SPAM. Ce test consiste

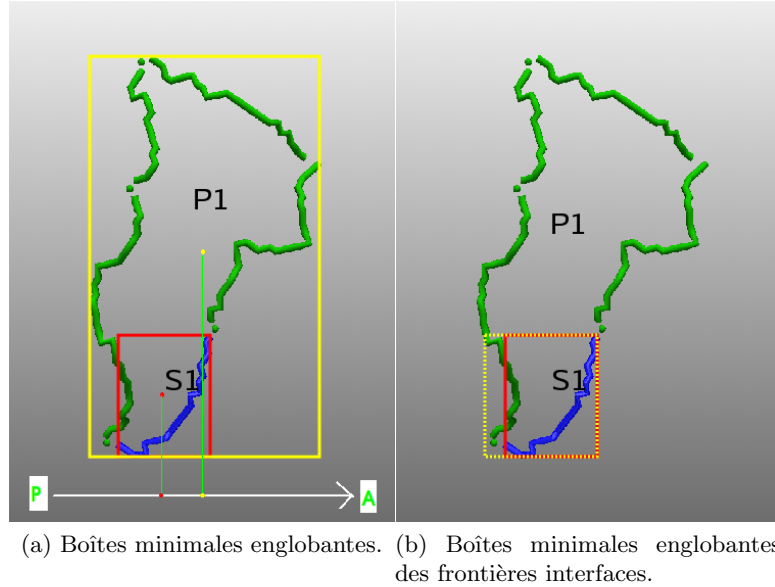


FIG. 5.6: Calcul de l'orientation antéro-postérieure (droite-gauche) entre un patch et un segment de sillon : (a) si on compare les coordonnées du barycentre de la boîte minimale englobante du patch $P1$ et les coordonnées du barycentre de la boîte minimale englobante du segment $S1$, alors l'orientation trouvée sera erronée dans ce cas ; cependant, si on compare les coordonnées des barycentres de leurs boîtes minimales englobantes des frontières interfaces (b), alors l'orientation trouvée sera correcte.

à vérifier, pour chaque SPAM, si la valeur de voxel en chaque point de chaque segment (représentant la probabilité d'appartenance du point à la SPAM à l'endroit considéré) est strictement supérieure à zéro ou bien elle est nulle. Nous avons considéré qu'il suffit pour un segment donné, d'avoir un seul point dont la valeur d'appartenance à une SPAM est strictement supérieure à zéro, pour déduire qu'il borde cette SPAM. Concernant le calcul de son orientation par rapport à cette SPAM, nous avons là aussi utilisé la méthode des boîtes minimales englobantes des frontières interfaces, étant donné que les SPAMs représentent de grandes structures anatomiques et que leurs formes géométriques peuvent être convexes, alors que les segments sont de petites tailles, ce qui réduit l'efficacité des boîtes englobantes minimales. La figure 5.7 montre trois segments ($S1$, $S2$ et $S3$) et deux SPAMs ($SPAM1$ et $SPAM2$), avec les boîtes minimales englobantes des frontières interfaces qui permettent de calculer les orientations des segments par rapport aux SPAMs selon la direction cardinale antéro-postérieure. Enfin, cette information (topologie et orientations) est représentée dans un fichier OWL (on l'appelle *fichier#2*). La figure 5.4-(b) montre un extrait de ce fichier. On peut y lire par exemple que la SPAM représentant le

gyrus précentral droit est bordée postérieurement par la partie de sillon ayant l'identifiant 89.

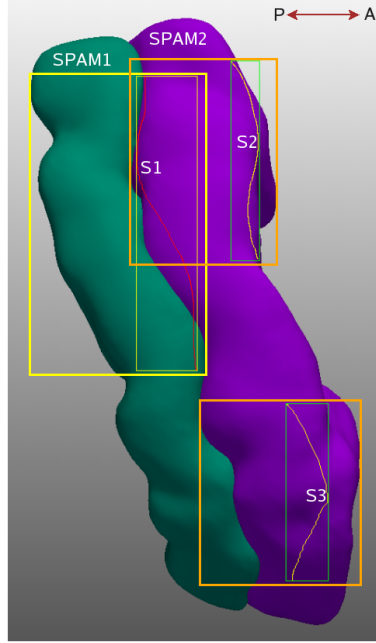


FIG. 5.7: Calcul des orientations entre les SPAMs et les segments de sillons qui les bordent.

Le “matching” du contenu des deux fichiers, à savoir *fichier#1*, qui décrit les relations topologiques et d’orientations entre les patches et les segments extraits de l’image, et *fichier#2* est réalisé, dans le cas des sujets sains, par des règles de “matching” de la forme suivante : $Bounds(x, y) \wedge SulcusPart(x) \wedge Patch(y) \wedge anteriorTo(x, y) \wedge Bounds(x, z) \wedge Gyrus(z) \wedge anteriorTo(x, z) \rightarrow partOf(y, z)$. Cette règle infère qu’un patch y est une partie d’un gyrus particulier z de l’ontologie, si y et la SPAM correspondant à z sont simultanément bordés par un segment x avec la même orientation *anteriorTo*. Six règles similaires sont définies dans notre système pour les sujets normaux, correspondant aux six orientations spatiales possibles (*anteriorTo*, *posteriorTo*, *inferiorTo*, *superiorTo*, *leftTo* et *rightTo*). Des règles de “matching” légèrement différentes sont définies pour les cas pathologiques. Elles ne prennent pas en considération les orientations entre les segments de sillons et les SPAMs. En effet, celles-ci peuvent conduire à des décisions inappropriées dues à d’éventuels déplacements de l’anatomie, causés par la pathologie. Ces règles permettent d’affecter, pour chaque patch, un ensemble d’étiquettes considérées dans la suite du raisonnement comme des hypothèses (figure 5.8). Par exemple on observe sur la figure 5.4 que le patch *Patch2* et l’instance du gyrus précentral droit *instanceOfRightPreCentralGyrus0* sont bordés postérieurement par la même partie de sillon, ayant l’identifiant 89. La règle

de matching correspondant à l'orientation *posteriorTo* va alors inférer que *Patch2* est une partie de *instanceOfRightPreCentralGyrus0*. La requête SPARQL qui a permis d'exécuter les règles de "matching" sur les fichiers *fichier#1* et *fichier#2* est la suivante :

SELECT ?x ?y WHERE {?x rdf:type a: Patch; a: partOf ?y}

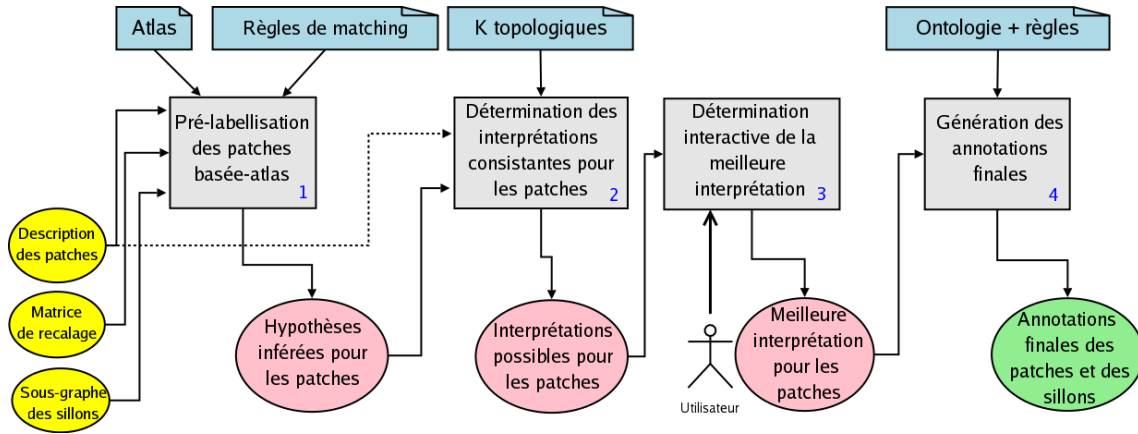


FIG. 5.8: Processus complet de l'annotation : les traitements 1, 2 et 3 contribuent à la labellisation des patches, et le traitement 4 à la labellisation des segments de sillons.

Un raisonnement par contraintes pour la détermination des interprétations cohérentes pour les patches

Pour l'étiquetage des patches nous nous sommes inspirés de deux problèmes classiques en raisonnement par contraintes : le premier problème est celui des reines posé par Frank Nauck en 1950, qui consiste à répondre à la question de savoir si, sur un échiquier de n cases sur n , on peut placer n reines de façon à ce qu'aucun couple de reines ne soit sur une même ligne horizontale, verticale ou diagonale. Le deuxième problème est relatif au coloriage d'une carte géographique, il s'agit de colorier toutes les régions d'une carte, de telle sorte que deux régions ayant une frontière en commun soient coloriées avec deux couleurs différentes. Ces deux problèmes ressemblent à notre problème d'étiquetage des patches, étant donné qu'il s'agit d'affecter des étiquettes aux patches (qui sont des parties de gyri) tout en respectant les connaissances a priori sur l'arrangement spatial des gyri dans le cerveau. Les deux problèmes précédents sont modélisés dans la littérature par un Problème de Satisfaction de Contraintes (CSP : Constraint Satisfaction Problem en anglais). Un CSP consiste à définir un certain nombre de variables et un certain nombre de contraintes. Une variable est définie par son domaine, c'est-à-dire un ensemble de valeurs qui

peuvent être affectées à cette variable. Une contrainte relie deux ou plusieurs variables, et restreint leurs domaines aux valeurs permises. Le raisonnement par contraintes est le processus de calcul de solutions pour un CSP donné, c'est-à-dire l'affectation de valeurs aux variables qui satisfont toutes les contraintes sur les variables [115]. Si une seule variable n'a pas de valeur permise, alors il n'y a pas de solution pour le CSP considéré, sous les contraintes posées. La modélisation de notre problème par un CSP est faite comme suit : les patches sont transformés en variables CSP, les hypothèses inférées pour les patches représentent les domaines de ces variables, enfin les relations spatiales entre les patches représentent les contraintes sur les variables. Le solveur CSP fournit alors toutes les interprétations possibles pour les patches, qui sont compatibles avec les connaissances a priori sur l'arrangement spatial des gyri et des parties de gyri dans le cerveau (figure 5.8). Ces connaissances a priori sont formalisées sous forme d'ensembles de tuples constituant les six contraintes spatiales, comme expliqué dans le paragraphe 5.3.2.

Soit $T(P, SR)$ la description des patches, où P est l'ensemble des patches extraits et SR les contraintes spatiales définies sur les éléments de P . On a pour chaque patch $p \in P$ un ensemble d'étiquettes possibles (hypothèses) notées $lp(p)$. Chaque relation spatiale $r \in SR$ est un tuple $\langle type, (p_1, p_2) \rangle$ où $type$ référence un type représenté par la relation spatiale et (p_1, p_2) sont les patches sur lesquels la relation spatiale est définie. La transformation de T en CSP est définie par l'algorithme suivant :

1. pour chaque $p \in P$ créer une variable v^p ;
2. si l'utilisateur valide une étiquette particulière l_i pour un patch donné p_i alors $D(v^p) = l_i$; sinon $D(v^p) = lp(p)$; ($D(v^p)$ est le domaine de la variable v^p) ;
3. pour chaque relation spatiale $r \in SR$ entre deux patches $p_1, p_2 \in P$ rajouter une contrainte spatiale binaire entre les variables v^{p_1} et v^{p_2} du type correspondant.

Le résultat de cette étape est un ensemble d'interprétations possibles pour les patches. Chaque interprétation consiste en n étiquettes pour les n patches de la ROI, qui correspondent à un arrangement spatial des patches conforme aux connaissances a priori sur l'arrangement spatial des gyri et des parties de gyri dans le cerveau.

Détermination interactive de la meilleure interprétation pour les patches

L'objectif est de déterminer, à partir des interventions de l'utilisateur, quelle est la meilleure interprétation, parmi celles retournées par le raisonneur CSP. Pour ce faire, l'utilisateur est invité à fixer une étiquette pour un patch ayant des étiquettes différentes dans les différentes interprétations. Le système élimine alors les interprétations qui ne sont pas compatibles avec les choix de l'utilisateur. Les interactions sont répétées jusqu'à l'obtention de la meilleure interprétation pour les patches (figure 5.8).

Labellisation des segments de sillons

La labellisation des segments de sillons repose sur un raisonnement en logiques de description. Le système utilise la meilleure interprétation calculée pour les patches, les relations topologiques et les orientations calculées entre les patches et les segments de sillons, ainsi que les définitions logiques des sillons dans l'ontologie. Toutes ces informations sont traitées par un raisonneur DL, et les segments qui satisfont la définition logique d'un concept particulier sont identifiés comme des instances de ce dernier (figure 5.8). Ce traitement est effectué en deux étapes, qui sont les suivantes :

1. Récupération, à partir de l'ontologie, de la liste de toutes les parties de sillons qui y sont définis. Ceci peut être fait, si on utilise le raisonneur DL KAON2, par les lignes de code Java sur la figure 5.9.

```
Request<SubClassOf> subClassOfRequest=ontology.createAxiomRequest(SubClassOf.class);
OWLClass document=KAON2Manager.factory().owlClass("http://www.owl-ontologies.com/BrainOntology.owl#SulcusPart");
subClassOfRequest.setCondition("superDescription",document);
Set<SubClassOf> subClassOfAxioms=subClassOfRequest.get();
```

FIG. 5.9: Code java utilisé pour récupérer la liste des parties de sillons définis dans notre ontologie.

2. Recherche des instances possibles de chaque nom de concept de la liste récupérée en 1. Ceci peut être fait par la requête SPARQL suivante : `SELECT ?x WHERE { ?x rdf:type <"+axiom.getSubDescription().toString()+"> }`

Enfin, les annotations inférées pour les patches et les segments de sillons sont représentées en RDF, afin de faciliter leur partage et leur interrogation par des requêtes SPARQL. D'autres métadonnées sont rajoutées aux annotations, telles que l'identifiant de l'utilisateur, la version de l'ontologie utilisée, l'atlas utilisé, les paramètres d'acquisition de l'image, etc. Un extrait d'un fichier **RDF** est montré sur la figure 5.11, où on peut voir les étiquettes inférées par le système pour les patches et certains segments de sillons qui les bordent et qui ont pu être identifiés par le système.

Exemple illustratif

Considérons la région d'intérêt sélectionnée dans la figure 5.1. L'utilisateur peut agir directement sur l'image, parcourir les hypothèses inférées par le système pour les patches, via des menus interactifs qui s'affichent au moment où l'utilisateur sélectionne un patch. Pour ce faire, les surfaces des patches ont été matérialisées par des objets VTK³, avec lesquels l'utilisateur peut interagir avec la souris (figure 5.10).

³<http://www.vtk.org/>

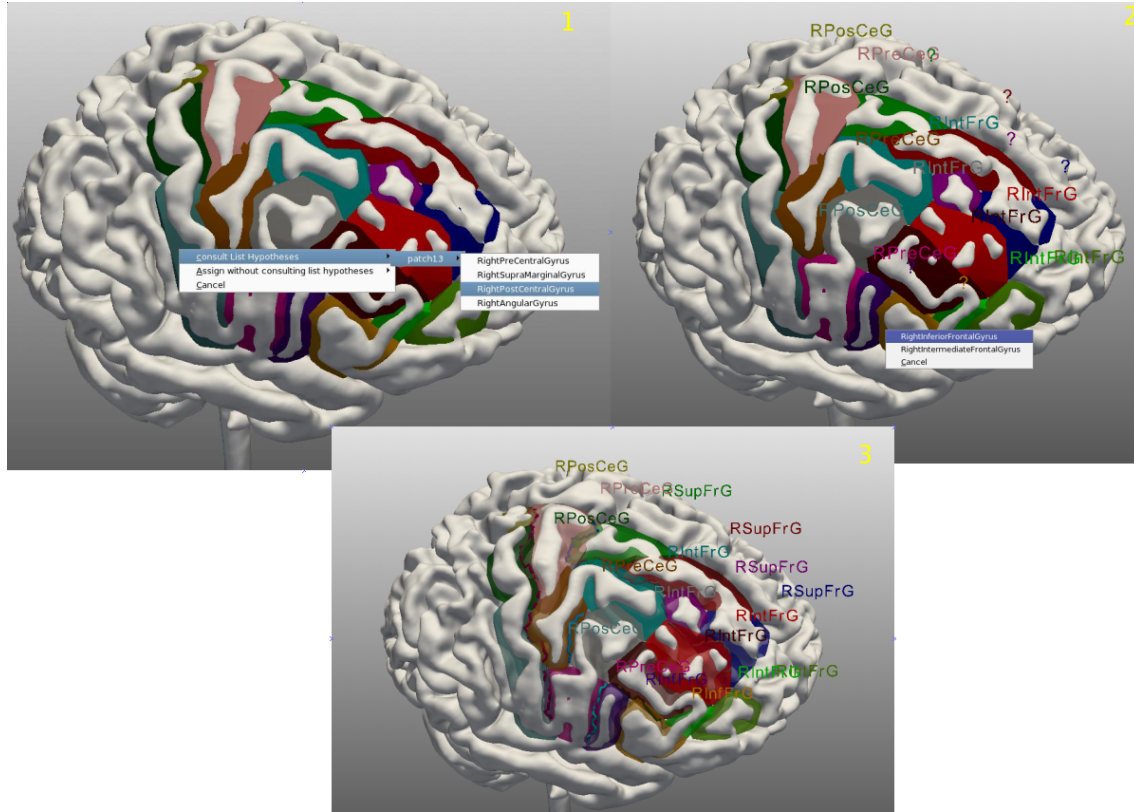


FIG. 5.10: L'image 1 montre les hypothèses inférées pour un patch sélectionné par l'utilisateur. L'image 2 montre comment l'utilisateur interagit avec le système pour la détermination de la meilleure interprétation pour les patches. Enfin, l'image 3 montre les étiquettes des patches affichées en regard de ces derniers et avec la même couleur. Elle montre aussi les segments de sillons qui ont été identifiés. Ceux qui appartiennent à la même classe sont affichés avec la même couleur.

5.3.4 Implémentation et évaluation du système

Implémentation sous forme de services Web

Le système a été implémenté en utilisant les technologies des services Web (figure 5.12). Les différents services sont rassemblés au sein d'un serveur **Axis**, et sont activés par des clients **gsoap** associés à un outil de visualisation appelé le **GisViewer**, développé au sein

```

<FinalAnnotation>
  <LabelsOfPatchesAndSulci>
    <Patch rdf:ID = "Patch0">
      <partOf>
        <brain:RightSuperiorFrontalGyrus rdf:ID = "instanceOfRightSuperiorFrontalGyrus0"/>
      </partOf>
      <isMAEBoundedBy>
        <RightSuperiorFrontalSulcusPart rdf:ID="283"/>
      </isMAEBoundedBy>
      <isMAEBoundedBy>
        <RightSuperiorPreCentralSulcusPart rdf:ID="267"/>
      </isMAEBoundedBy>
    </Patch>
    <Patch rdf:ID = "Patch1">
      <partOf>
        <brain:RightSuperiorFrontalGyrus rdf:about = "#instanceOfRightSuperiorFrontalGyrus0"/>
      </partOf>
    </Patch>
    <Patch rdf:ID = "Patch2">
      <partOf>
        <brain:RightPreCentralGyrus rdf:ID = "instanceOfRightPreCentralGyrus0"/>
      </partOf>
      <isMAEBoundedBy>
        <RightCentralSulcusPart rdf:ID="89"/>
      </isMAEBoundedBy>
    </Patch>
    <Patch rdf:ID = "Patch3">
      <partOf>
        <brain:RightSuperiorFrontalGyrus rdf:ID = "RightSuperiorFrontalGyrus"/>

```

FIG. 5.11: Etiquettes des patches et des segments de sillons inférées par le système et représentées en RDF.

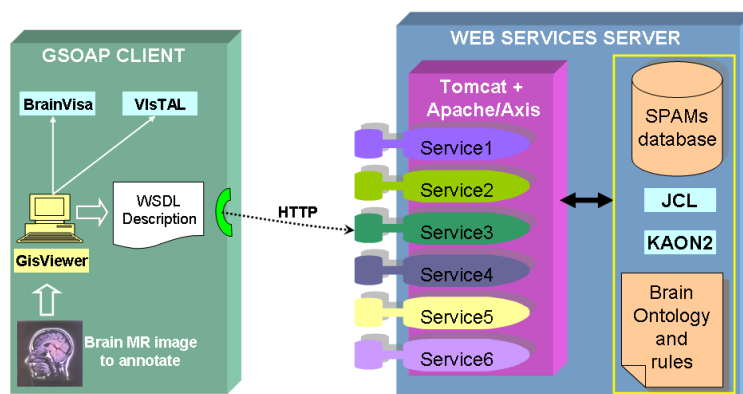


FIG. 5.12: Implémentation du système d'annotation sous forme de services Web.

de l'équipe *VisAGeS*⁴. Six services Web ont été implémentés, comme montré sur la figure 5.12 :

- Service 1 : une simple authentification de l'utilisateur, un nom d'utilisateur et un

⁴<http://www.irisa.fr/visages/>

- mot de passe sont requis ;
- Service 2 : consiste en une requête SPARQL, afin d'obtenir de l'ontologie la liste complète des noms de gyri, pour que l'utilisateur puisse le cas échéant affecter à un patch une étiquette ne figurant pas parmi les hypothèses inférées ;
 - Service 3 : “matching” avec l'atlas ;
 - Service 4 : génération des hypothèses pour les patches ;
 - Service 5 : détermination des interprétations cohérentes pour les patches. L'utilisateur peut parcourir les différentes interprétations via les boutons **suivant** et **précédent**, et il peut interagir avec le système pour déterminer la meilleure interprétation pour les patches ;
 - Service 6 : labellisation des segments de sillons.

Avantages de l'implémentation du système d'annotation sous forme de services Web

- L'architecture en services Web a, entre autres, les avantages suivants :
- Facilité d'utilisation du système : en effet, les utilisateurs n'ont pas besoin d'installer le système d'annotation sur leur machines, ils ont juste besoin d'installer le visualisateur **GisViewer** pour pouvoir annoter leurs images ;
 - Une seule installation des outils de raisonnement impliqués dans le système, tels que le moteur de recherche sémantique et le résolveur CSP, est nécessaire ;
 - Les utilisateurs peuvent accéder à la même version de l'ontologie, qui peut être mise à jour et améliorée uniquement sur le serveur, et tous les utilisateurs pourront bénéficier de ces mises à jour ;
 - l'atlas est copié une seule fois sur le serveur, de manière transparente aux utilisateurs, ces derniers n'ont pas besoin de le copier sur leurs machines, d'autant plus que les atlas en général ne sont pas facilement accessibles et ne sont pas facilement utilisables.

Expérimentations

Matériel Les expérimentations ont été menées en utilisant des images IRM-T1 obtenues avec un scanner 3T (Philips Achieva) concernant dix sujets sains et cinq sujets pathologiques. Dans les cas pathologiques la lésion était localisée dans la région frontale. La segmentation du cerveau et l'extraction des traces externes des sillons ont été faites par les outils de Brainvisa⁵ et Vistal⁶ respectivement. 44 SPAMs correspondant aux gyri ont été utilisées. L'ontologie sulco-gyrale a été éditée avec Protégé⁷. Les règles ont été éditées avec le plugin

⁵http://www.brainvisa.info/index_f.html

⁶<http://www.irisa.fr/visages/software/VIsTAL/VIsTAL.html>

⁷<http://protege.stanford.edu/>

SWRL⁸. Les résultats pour les patches ont été obtenus avec le solveur CSP JCL⁹, et les segments de sillons ont été identifiés par des requêtes SPARQL qu'on soumet au raisonneur KAON2¹⁰ (un moteur d'inférence pour les ontologies étendues avec des règles).

Evaluation L'évaluation a été faite sur des ROIs définies par un neuroanatomiste ; elles incluent le gyrus frontal supérieur, le gyrus frontal moyen, le gyrus frontal inférieur, le gyrus précentral, le gyrus postcentral, le sillon central, le sillon précentral supérieur, le sillon précentral intermédiaire, le sillon précentral inférieur, le sillon frontal supérieur et le sillon frontal inférieur. Les résultats obtenus par le système sont comparés aux étiquettes données par l'expert (considérées comme "gold-standard"). La même procédure a été appliquée pour les cinq jeux de données IRM, sauf pour les règles de "matching", où les orientations n'ont pas été considérées dans les cas pathologiques. Pour chaque cas, on rapporte le type de l'IRM (normale versus pathologique), le nombre de patches extraits de la ROI, le nombre d'interprétations cohérentes inférées pour les patches, le nombre d'interactions utilisateur requises pour déterminer la meilleure interprétation des patches, la précision pour la détection des patches (définie comme le rapport entre le nombre de patches correctement labellisés sur le nombre total de patches dans la ROI), et enfin la précision pour la détection des segments de sillons (définie comme le rapport entre le nombre de segments correctement labellisés sur le nombre total de segments dans la ROI).

Résultats

⁸<http://protege.cim3.net/cgi-bin/wiki.pl?SWRLTab>

⁹<http://liawww.epfl.ch/JCL/>

¹⁰<http://kaon2.semanticweb.org/>

Données IRM du cerveau	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de patches dans la ROI	19	18	19	20	18	15	19	20	19	22
Nombre moyen d'hypothèses pour chaque patch	2.78	2.72	2.63	2.75	2.77	2.80	2.63	2.45	2.73	2.86
Nb. patches ayant la bonne étiquette dans les hypothèses	19	18	19	20	18	15	19	19	19	22
Nb. interprétations possibles inférées pour les patches	6	4	15	16	12	12	26	12	3	60
I 1	1.11	1	1.11	1.1	1.11	1.13	1.26	1.15	1.05	1.27
I 2	1	-	1.05	1	1.05	1.06	1.1	1.1	1	1.18
I 3	-	-	1	-	1	1	1.05	1.05	-	1.09
I 4	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1.04
I 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Nombre moyen d'hypothèses restantes pour les patches	100	94	100	100	100	93	95	100	95	100
Précision (patches)(%)	100	80	100	100	100	90	92	100	83	100
Précision (segments de sillons)(%)	100	80	100	100	100	90	92	100	83	100

TAB. 5.1: Résultats expérimentaux : cas normaux

Données IRM du cerveau	1	2	3	4	5
Nombre de patches dans la ROI	25	20	17	17	19
Nombre moyen d'hypothèses pour chaque patch	2.68	2.70	2.17	2.05	2.36
Nombre de patches ayant la bonne étiquette dans leur hypothèses	25	20	17	17	19
Nombre d'interprétations possibles inférées pour les patches	40	18	2	4	18
Interaction 1	1.16	1.2	1	1	1.21
Interaction 2	1.12	1.1	-	-	1.15
Interaction 3	1.04	1.05	-	-	1.05
Interaction 4	-	1	-	-	1
Interaction 5	-	-	-	-	-
Nombre moyen d'hypothèses restantes pour les patches	100	100	94	93	95
Précision (patches)(%)	100	100	80	90	88
Précision (segments de sillons)(%)	100	100	80	90	88

TAB. 5.2: Résultats expérimentaux : cas pathologiques

Les tables 5.1 et 5.2 montrent les résultats obtenus. On observe que :

- Le nombre de patches est d'environ 19 (moy : 18.9, éca. type : 1.79) dans les cas normaux et 19 (moy : 19.6, éca. type : 3.29) dans les cas pathologiques ;
- Le nombre d'hypothèses inférées pour chaque patch, grâce aux règles de “matching”, est inférieur à 3 : (moy : 2.71, éca. type : 0.12) pour les cas normaux et (moy : 2.39, éca. type : 0.29) pour les cas pathologiques. Ces hypothèses sont utiles pour l'utilisateur quand il explore une ROI sur le cerveau, car elles réduisent le nombre d'étiquettes possibles, pour chaque patch, de 44 (nombre de SPAMs) à moins de 3 ;
- Dans toutes les ROIs traitées, la bonne étiquette était toujours incluse dans l'ensemble des hypothèses inférées par le système. Ce qui prouve que les règles de “matching” sont efficaces ;
- Le nombre d'interprétations consistantes est d'environ 16 (moy : 16.6, éca. type : 16.65) pour les cas normaux et de même pour les cas pathologiques (moy : 16.4, éca. type : 15.19). Cela met en évidence que les contraintes spatiales, supportant la résolution CSP, réduisent significativement le nombre de solutions possibles. En effet, sans les contraintes spatiales, pour une région de 19 patches et avec 3 hypothèses pour chacun, le nombre d'interprétations possibles serait $3^{19} = 1162261464$;
- Dans la plupart des cas (aussi bien normaux que pathologiques) le nombre d'hypothèses restantes pour chaque patch suite à la première interaction avec l'utilisateur est très proche de 1 ;
- La précision du système est bonne aussi bien pour les patches que pour les segments de sillons. En effet, la précision lors de l'identification des patches était d'environ 97% (moy : 97.7%, éca. type : 3.02) dans les cas normaux et d'environ 96% (moy : 96.4, éca. type : 3.36) dans les cas pathologiques. Pour l'identification des sillons, la précision était d'environ 94% (moy : 94.5, éca. type : 7.82) pour les cas normaux et d'environ 91% (moy : 91.6, éca. type : 8.53) pour les cas pathologiques. Les erreurs lors de l'identification des patches sont dues au fait que, pour le moment, les connaissances a priori sur l'arrangement spatial des gyri et des parties de gyri ne tiennent compte que d'une seule direction cardinale (la plus significative) pour modéliser la position d'une structure anatomique par rapport à une autre. Cependant, on constate en pratique que ce n'est pas toujours cette direction qui est calculée comme la plus significative. Par exemple dans les connaissances a priori on a spécifié qu'une partie du gyrus postcentral peut être inférieure ou supérieure à une autre partie du même gyrus, cependant dans certains découpages en patches du gyrus postcentral, d'un sujet particulier, il peut y avoir un patch, qui est une partie de ce gyrus et qui est postérieur ou antérieur à un autre patch qui fait partie de ce même gyrus. L'identification des sillons étant basée en partie sur les étiquettes des patches, il s'ensuit que des erreurs dans ces étiquettes conduisent à des erreurs dans l'identification des sillons. Une autre caractéristique intéressante du système qui ressort de l'évaluation, est le fait qu'il n'y ait pas de différence, en terme de précision, entre les cas normaux et pathologiques,

ce qui suggère que, contrairement aux méthodes classiques, notre méthode hybride est robuste vis-à-vis des décalages causés par des processus pathologiques comme les tumeurs.

Ces résultats montrent que le système proposé peut être très utile pour assister l'utilisateur dans la production d'annotations cohérentes des images IRM du cerveau. Il permet aussi d'obtenir des annotations d'une manière assez rapide, vu que l'utilisateur met moins de deux minutes pour annoter les patches, et moins de trois minutes pour une annotation complètement automatique des segments de sillons.

5.4 Prolongement des patches en profondeur

Afin que les patches correspondent réellement à des parties de gyri, il est nécessaire de les prolonger en profondeur et de caractériser la matière qu'ils contiennent. Pour ce faire, deux étapes de traitement ont été réalisées : la première consiste à former des patches 3D, et la deuxième consiste à extraire et étiqueter la matière blanche et la matière grise contenues dans ces patches. La réalisation de la première étape s'est faite en trois temps : 1) d'abord les traces externes des sillons sont prolongées en profondeur afin de former les rubans représentant la vraie nature des sillons entourant les gyri [118] ; 2) ensuite, et afin d'obtenir un contour fermé pour le patch, on génère les surfaces correspondant aux séparations conventionnelles, à partir des rubans précédent et suivant ; 3) et enfin, pour terminer la fermeture du patch, les rubans ont été rejoints entr'eux.

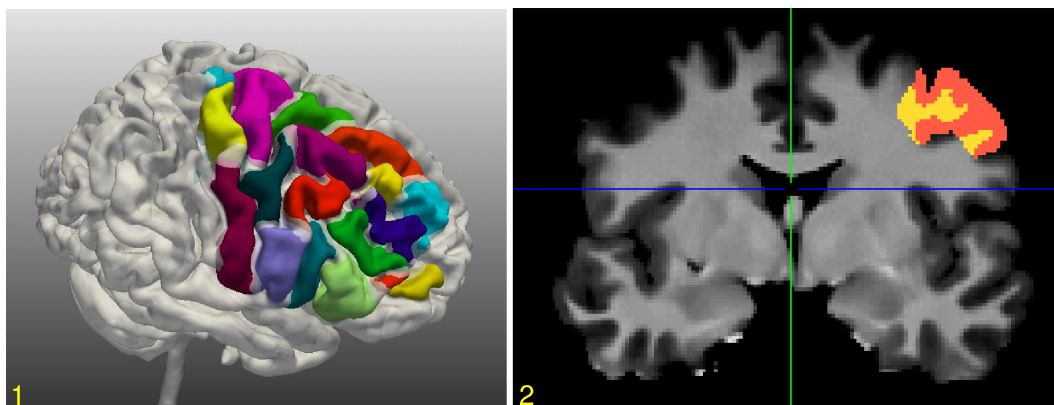


FIG. 5.13: (1) Construction 3D des patches délimités en surface, (2) volumes correspondant à la matière grise (en rouge) et blanche (en jaune) d'un patch 3D reconstruit.

La deuxième étape est réalisée en trois temps : 1) la matière contenue dans le patch est

extraite (figure 5.13-1), en utilisant une méthode de type “region growing”¹¹, 2) ensuite la matière extraite du patch est séparée en deux sous volumes caractérisant la matière grise et la matière blanche (figure 5.13-2), en utilisant les masques correspondants produits lors des pré-traitements (l’extraction des sillons), 3) et enfin, la description des volumes extraits est générée, contenant, entre autres, le niveau de gris utilisé pour chaque volume. Dans cette description, les étiquettes produites par le système d’annotation pour les patches sont également référencées.

5.5 Partage des annotations

Deux critères sont indispensables pour le partage d’annotations : 1) elles doivent être consensuelles et, 2) représentées dans un langage qui facilite leur partage à une grande échelle. Cela nous a amenés à réutiliser une partie de l’ontologie de [203] conçue, justement, pour le partage d’informations relatives à des régions d’intérêt en neuroimagerie.

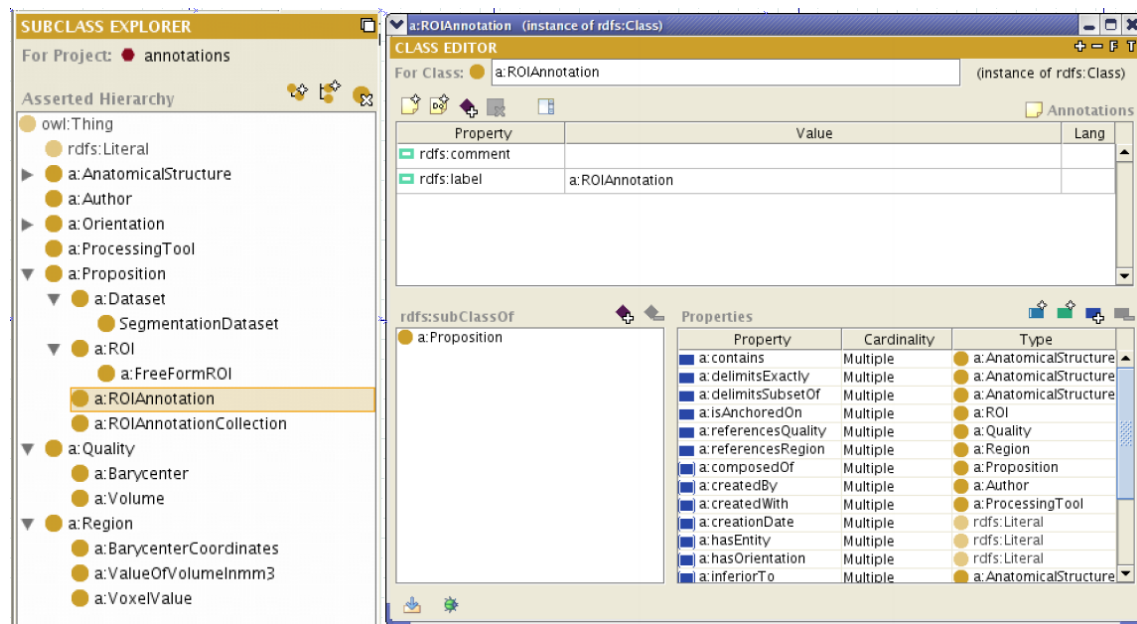


FIG. 5.14: Représentation en RDF(S) d’une partie de l’ontologie d’annotation de régions d’intérêt en neuroimagerie de Temal et al. [203].

Un extrait de cette ontologie a été repris et représenté sous Protégé, en utilisant le

¹¹http://en.wikipedia.org/wiki/Region_growing

langage RDF(S) (figure 5.14). La représentation en RDF permet non seulement le partage des annotations, mais aussi leur interrogation par des requêtes SPARQL.

La figure 5.15 montre un exemple d'un fichier RDF contenant les annotations, produites par le système pour une région d'intérêt sélectionnée sur une image d'un cerveau sain, et représentées selon l'ontologie de Temal et al. [203].



FIG. 5.15: Exemple d'un fichier RDF contenant les annotations, produites par le système pour une région d'intérêt sélectionnée sur une image d'un cerveau sain, et représentées selon l'ontologie de Temal et al. [203]. (1) représentation des différentes ROIAnnotations, (2) la collection de toutes les ROIAnnotations, (3) référencement des patches annotés, (4) autres métadonnées.

5.6 Discussion

L'approche que nous avons proposée pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau est à la fois nouvelle et différente des approches classiques de découpage en régions du cortex sur plusieurs aspects. D'abord elle combine de manière complémentaire des connaissances numériques et symboliques. En effet, l'utilisation d'un atlas nous a permis d'initialiser un raisonnement basé sur une ontologie fortement axiomatisée et qui permet de traiter aussi bien les cas normaux que pathologiques. Par ailleurs, l'approche que nous avons proposée est locale, c'est-à-dire qu'elle se focalise sur une région particulière du cerveau. Elle diffère aussi des approches similaires d'annotation, utilisant les technologies du Web Sémantique [176, 58]. En particulier, notre processus d'identification implique un raisonnement sur les propriétés topologiques des primitives graphiques extraites des images.

Concernant le type de raisonnement utilisé, nous avons là aussi combiné un raisonnement par contraintes (pour l'étiquetage des patches) avec un raisonnement en logiques de description classiques (pour l'étiquetage des sillons). En effet, la forte variabilité anatomique sulco-gyrale constitue un grand obstacle pour une utilisation efficace d'un raisonnement monotone, tel que le raisonnement en logiques de description classiques, inefficace en traitement des imprécisions et des exceptions qui caractérisent l'anatomie sulco-gyrale. Ceci nous a amenés à opter pour un raisonnement par contraintes beaucoup plus adapté à notre problème. Plus particulièrement, la modélisation de notre problème d'annotation des patches en un problème de satisfaction de contraintes était très appropriée. Ainsi, on affecte à chaque patch un ensemble d'étiquettes possibles, résultant d'un "matching" avec l'atlas, ensuite un raisonnement CSP permet de déterminer un ensemble d'interprétations pour les patches s'appuyant sur la connaissance a priori sur l'arrangement spatial des gyri et des parties de gyri. Cette dernière, c'est-à-dire la connaissance a priori sur l'arrangement spatial des gyri et des parties de gyri, étant relativement plus stable, comparée à la connaissance sur les autres aspects de l'anatomie sulco-gyrale tels que la forme des sillons. L'interprétation finale des patches est déterminée interactivement avec l'utilisateur en l'invitant à fixer les étiquettes de certains patches. Enfin, une fois la labellisation des patches faite, un raisonnement en logiques de description permet d'identifier les segments de sillons en s'appuyant sur les définitions des sillons dans l'ontologie.

Notre système d'annotation a été implémenté avec une architecture de type client-serveur. Tous les modules de raisonnement ont été déployés sous forme de services Web, facilitant ainsi l'utilisation du système, la gestion et la mise à jour des connaissances (ontologie et atlas). Les fonctionnalités de visualisation sur l'image ont été implémentées sous forme d'un nouveau "plug-in" du visualisateur d'images 3D (**GisViewer**), offrant une interface conviviale qui facilite l'utilisation du système et la visualisation des résultats d'annotation.

Enfin, le système développé a été testé sur des données issues de sujets sains et de patients porteurs de processus pathologiques (en l'occurrence des tumeurs), et les résultats obtenus sont très prometteurs aussi bien en terme de précision qu'en terme de temps de calcul. En effet, les différents traitements s'exécutent en un temps compatible avec une application interactive, ce qui est essentiel dans un tel système, de nature interactif. Ce dernier peut néanmoins être amélioré sur les aspects suivants :

- La définition des séparations conventionnelles entre les gyri est faite manuellement dans l'implémentation actuelle, et pourrait être automatisée, en utilisant par exemple des procédures d'apprentissage ;
- Le raisonnement actuel permet à l'utilisateur d'intervenir uniquement lors de l'interprétation des patches, il serait plus naturel de lui permettre également d'intervenir lors de l'identification des sillons ;
- L'utilisation de l'atlas pour produire les hypothèses initiales pourrait être optimisée,

- en utilisant par exemple différents atlas, mieux adaptés au cas particulier étudié ;
- Le “matching” avec l’atlas peut être amélioré, notamment en améliorant le calcul des orientations entre les segments de sillons et les SPAMs ;
- L’ontologie peut être améliorée, en définissant les gyri et les sillons à un niveau de granularité plus fin, et cette connaissance pourrait être directement utilisée pour dériver automatiquement les contraintes spatiales du CSP ;
- La modélisation du problème par un CSP flou comme dans [57], utilisé conjointement avec des représentations floues des relations spatiales entre les structures anatomiques, en se basant par exemple sur le travail de [107], pourraient permettre d’améliorer les performances du système. En effet, l’une des difficultés du système est l’obtention d’interprétations plausibles pour les patches, due à la variabilité des arrangements spatiaux discriminants entre les structures neuroanatomiques ;
- Les aspects d’interface peuvent également être améliorés, en permettant par exemple de déplacer une étiquette si elle gêne la visualisation de la structure anatomique qu’elle désigne, ou encore en permettant d’afficher la définition d’une structure anatomique, à partir de l’ontologie, lorsqu’on sélectionne l’étiquette qui la désigne.
- Enfin, la dépendance des performances du système vis-à-vis des pré-traitements initiaux, plus particulièrement de la définition des séparations conventionnelles, devrait être étudiée davantage, et la comparaison de ces performances à celles d’autres systèmes similaires, tels que les outils de FreeSurfer¹² ou encore la méthode de Olivier Nempont [144], peut être intéressante, afin d’envisager d’autres améliorations.

Nous avons par ailleurs représenté les annotations d’une façon qui permet leur partage et leur interrogation par des moteurs d’inférence, tels que CORESE (CONceptual REsource Search Engine)¹³, en réutilisant une ontologie d’annotation des régions d’intérêt en neuroimagerie, et en les représentant dans un langage standard, RDF en l’occurrence.

5.7 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté un système hybride, développé pour labelliser semi-automatiquement les images IRM du cerveau avec des annotations sémantiques, ainsi que l’évaluation de ses performances. L’approche est nouvelle sur plusieurs aspects : (1) l’utilisation d’un raisonneur CSP pour la sélection automatique des interprétations cohérentes pour les gyri ; (2) la génération facile d’annotations, sémantiquement riches, pour les structures sulco-gyrales, et leur représentation en RDF selon une ontologie existante de partage d’annotations en neuroimagerie ; (3) l’utilisation d’une connaissance a priori explicite, décrite dans une ontologie formelle représentée en OWL, afin de faciliter son partage. L’implémentation du

¹²<http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/>

¹³<http://ralyx.inria.fr/2002/Raweb/acacia/uid31.html> - un moteur RDF(S) basé sur les graphes conceptuels.

système avec une architecture de type client-serveur, utilisant les services Web et un logiciel de visualisation facilite son utilisation. L'évaluation du système a montré de bonnes performances sur des cas normaux et pathologiques. En conclusion, la rapidité des réponses du système, sa robustesse vis-à-vis des cas pathologiques, et son architecture en services Web en font un outil très prometteur pour une utilisation future dans le cadre de la préparation des interventions chirurgicales en neurochirurgie et la production d'annotations partageables.

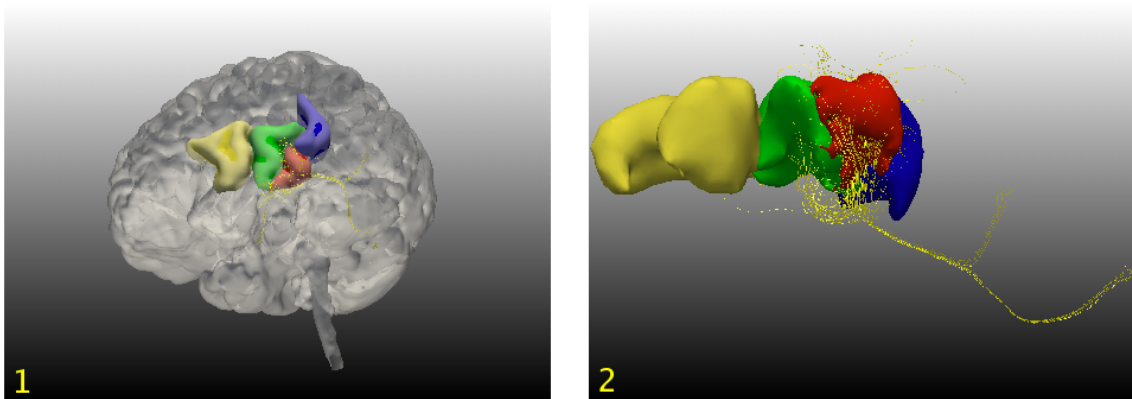


FIG. 5.16: Exemple de fibres connectant des régions dans le cerveau. (1) Patchs 3D identifiés par le système, (2) fibres connectant les régions délimitées par les patchs entr'elles et avec d'autres régions du cerveau.

Comme perspectives, nous envisageons d'utiliser le système proposé dans deux applications de la neuroimagerie. La première est relative à l'étude de la corrélation anatomo-fonctionnelle en IRM fonctionnelle (IRMf), et la seconde à l'étude des connexions des faisceaux de fibres dans le cerveau, en utilisant l'imagerie du tenseur de diffusion DTI (Diffusion Tensor Imaging) (figure 5.16).

Discussion générale

Dans cette thèse, nous avons abordé le problème de la modélisation et de la représentation des connaissances neuroanatomiques dans le cadre du Web Sémantique, ainsi que l'utilisation de ces connaissances pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau humain. Dans l'introduction, nous avons énuméré les motivations de la thèse, notamment celles relatives aux nouveaux besoins de la recherche translationnelle en terme de partage de connaissances et de données expérimentales, et le rôle central que joue la neuroanatomie comme cadre organisationnel pour les images du cerveau mais aussi pour la plupart des données en neurosciences. Nous avons donc, dans un premier temps, développé une ontologie de l'anatomie sulco-gyrale à partir d'un atlas de référence des sillons, en nous appuyant sur des travaux précédents sur la modélisation des connaissances anatomiques, qui sont bien reconnus dans la communauté biomédicale et qui respectent un minimum de principes de construction d'ontologies. Nous avons aussi travaillé en étroite collaboration avec un expert en anatomie, afin de nous assurer que nos choix étaient pertinents, notamment lorsque nous définissions de nouveaux concepts qui n'étaient pas définis dans les sources que nous avons considérées. Ceci nous a permis de modéliser des connaissances génériques et d'une sémantique riche sur l'anatomie sulco-gyrale ; par génériques, nous entendons des connaissances indépendantes d'une application particulière.

Notre contribution sur cette partie a consisté à exploiter des ontologies existantes pour modéliser la connaissance sur l'anatomie sulco-gyrale sous forme d'une ontologie complétée à partir d'un atlas des sillons et de la connaissance d'un expert anatomiste. Nous avons réutilisé l'ontologie de référence dans le domaine de l'anatomie humaine qui respecte les principes de construction d'ontologies, *FMA* [173] en l'occurrence. Cependant, cette dernière n'est pas exhaustive (notamment sur le cerveau), ce qui nous a amenés à considérer l'ontologie de l'anatomie du cerveau humain de *Dameron* [53], qui est basée sur l'ontologie *FMA* mais qui est plus détaillée sur le cortex cérébral. Enfin, l'atlas des sillons de *Ono* [152] nous a été utile pour compléter les définitions des sillons qui n'étaient disponibles ni dans *FMA* ni dans la modélisation de *Dameron*. Ainsi, notre ontologie, étant basée sur des ontologies génériques, est elle aussi générique. Cependant, d'une part il n'est pas toujours évident de dire à partir de quel niveau d'abstraction une ontologie est générique, et d'autre part il est difficile de définir une ontologie consensuelle dans la mesure où plusieurs points de vue sont possibles, et qui peuvent être subjectifs et parfois contradictoires. En effet, une ontologie reflète le point de vue de celui qui la conçoit, et ce point de vue est souvent guidé par des motivations ou des convictions individuelles (personnelles) basées sur une expérience acquise dans le domaine étudié ou une ambition personnelle de modéliser des connaissances en vue de les utiliser dans un contexte défini. Notre ontologie n'a pas échappé totalement à cette subjectivité, nous avons certes modélisé des connaissances génériques sur l'anatomie sulco-gyrale, mais ces dernières concernaient plutôt les relations partie-tout, l'héritage, la méréologie, les relations de direction et la topologie entre les structures anatomiques, ce qui n'était pas fortuit car nous voulions nous servir de ces concepts dans un raisonnement visant l'identification des structures anatomiques localisées dans les im-

ages du cerveau. De ce point de vue, notre ontologie pouvait inclure d'autres aspects de l'anatomie tels que leurs structures cytoarchitectoniques. La généricité d'une ontologie, qui est un élément important en modélisation de connaissances, nous amène à nous demander si, à force de vouloir modéliser les connaissances d'un domaine de manière générique, exploitable dans différents contextes, nous ne les rendons pas difficilement exploitables dans chaque contexte particulier. Nous pensons qu'il est nécessaire de disposer d'ontologies génériques à partir desquelles nous pourrions déduire des ontologies applicatives qui répondent le mieux possible aux spécificités des différentes applications. Cependant, il reste à savoir comment faire de telles déductions et sur quels critères. Dans notre cas, nous avons défini deux ontologies : la première à caractère générique (l'ontologie partageable), elle modélise la connaissance sur l'anatomie sulco-gyrale, et la deuxième est spécifique à notre application d'annotation (l'ontologie applicative) ; elle définit des entités liées à l'application telles que le concept *Patch*. Nous avons ensuite défini une relation d'héritage entre l'ontologie applicative et l'ontologie partageable afin d'associer aux entités anatomiques extraites des images, une sémantique riche explicitée dans l'ontologie partageable. Cependant, dans certaines applications il est plus approprié de définir les connaissances sous d'autres formes, et parfois la même application peut utiliser les connaissances exprimées dans l'ontologie générique sous plusieurs formes. Dans notre cas par exemple, nous avons représenté certaines connaissances exprimées dans l'ontologie sulco-gyrale sous forme de tuples définissant des contraintes spatiales, utilisées dans notre raisonnement CSP.

Dans cette phase de modélisation que nous avons effectuée, nous avons constaté l'importance de réutiliser des ontologies existantes. En effet, le développement d'une ontologie est un processus coûteux en temps et nécessitant différents profils de compétences, par conséquent la réutilisation d'ontologies existantes s'impose naturellement, pour d'une part accélérer la modélisation du problème considéré et d'autre part faciliter l'interopérabilité des systèmes qui utilisent ces ontologies. Cependant, parfois il est plus rapide et plus facile de construire une nouvelle ontologie que de réutiliser des ontologies existantes. Une excellente étude sur l'apport des ontologies et leur réutilisation a été réalisée en 2007 par Tobias Bürger, et dont les résultats sont accessibles sur le lien suivant : <http://www.tobiasbuerger.com/mmsurvey/>. Cette étude met en évidence que, parfois, l'effort requis pour l'analyse des ontologies qui peuvent être réutilisées et l'effort nécessaire pour les intégrer est plus considérable que l'effort requis pour créer de nouvelles ontologies. Cependant, l'étude met en évidence aussi que la réutilisation des ontologies est très importante pour, d'une part, augmenter la qualité des ontologies qui les réutilisent, et d'autre part permettre l'interopérabilité des systèmes informatiques.

Le défi que nous devons relever aussi était celui de représenter les connaissances modélisées de manière à pouvoir les partager et les diffuser le mieux et le plus largement possible. Ceci nous a amenés naturellement à utiliser les technologies du Web Sémantique disponibles, qui permettent un partage de connaissances via Internet. Nous avons alors représenté notre ontologie sulco-gyrale avec le langage OWL, recommandé par le W3C.

Afin de représenter la variabilité qui caractérise l'anatomie du cerveau, et afin que notre ontologie sulco-gyrale puisse être utilisée dans des raisonnements automatiques divers, nous l'avons formalisée en utilisant les logiques de description. En effet, les différents constructeurs qu'offrent les logiques de description nous ont servis à exprimer par exemple que deux structures anatomiques peuvent être connectées chez certains individus et contiguës chez d'autres. La formalisation en logiques de description nous a permis par ailleurs de vérifier la cohérence de notre ontologie, d'un point de vue logique, en utilisant les raisonneurs développés par la communauté de l'Intelligence Artificielle. Cependant, nous étions confrontés au dilemme de l'expressivité de notre ontologie, représentée en OWL DL, et de son utilisation par les raisonneurs DL existants. En effet, plus une logique de description est expressive, moins elle est supportée par des algorithmes de raisonnement décidables et d'une complexité raisonnable. Nous pensons qu'une ontologie générique doit se baser sur la logique de description dont les constructeurs permettent d'exprimer clairement et le mieux possible la sémantique véhiculée par les concepts de l'ontologie. Il s'agit ensuite de pouvoir en dériver, si nécessaire, des représentations "opérationnelles", certes moins expressives, mais qui peuvent être utilisées par un raisonneur particulier, dans le cadre d'une application. Il est donc plus judicieux de s'abstraire des raisonneurs existants et de représenter les ontologies en se basant sur les logiques de description qui permettent d'exprimer clairement leurs sémantiques, afin de garantir leur pérennité.

En ce qui nous concerne, notre ontologie partageable est étendue avec des règles qui augmentent son expressivité, et comme elle était destinée à servir comme une source de connaissances dans un raisonnement en vue d'annoter les images du cerveau, nous avons dû nous restreindre à la logique de description *SHIQ(D)* supportée par le raisonneur KAON2, sans pour autant trop perdre en expressivité, et nous avons dû adapter la représentation de l'ontologie à cette logique de description. L'extension avec des règles constitue d'ailleurs l'un des éléments d'originalité de notre ontologie, comparée aux travaux similaires dans le domaine de la neuroanatomie, par exemple l'ontologie *SAO* [117]. Ceci dit, bien que les logiques de description classiques soient bien appropriées à la représentation de connaissances génériques dans le cadre du Web Sémantique, elles le sont beaucoup moins lorsqu'il s'agit de représenter les incertitudes et les imprécisions liées aux applications réelles. Ces logiques permettent d'exprimer par exemple que deux sillons dans le cerveau sont soit connectés soit contigus, mais elles ne permettent pas d'associer une valeur indiquant le cas le plus plausible des deux ; elles permettent de dire que deux structures anatomiques sont voisines si elles partagent une frontière, sans pour autant donner une définition souple (qui tolère les imprécisions) de la frontière permettant de gérer les imperfections des prétraitements, etc. Nous pensons que la modélisation et la représentation des connaissances d'un domaine doit à la fois garder un aspect générique leur permettant d'être réutilisables dans plusieurs applications et permettre leur adaptation pour mieux représenter la spécificité d'une application particulière.

Notre deuxième objectif était l'annotation sémantique des images IRM du cerveau en

se basant sur l'ontologie sulco-gyrale. Cette partie constitue la principale contribution de la thèse. Il s'agit d'associer aux structures anatomiques, segmentées dans des images IRM du cerveau, une sémantique explicite et riche, formalisée dans l'ontologie. Ces annotations constituent des métadonnées d'une grande importance dont les utilisations sont diverses. En ce qui nous concerne, nous nous sommes intéressés aux applications dans le cadre clinique. Notre première application était de produire des annotations utilisables en tant que repères anatomiques pour le neurochirurgien, lui permettant de mieux préparer son intervention chirurgicale afin par exemple d'extraire une tumeur tout en préservant les zones fonctionnelles qui l'entourent. De ce fait, les annotations produites doivent être de qualité satisfaisante, par conséquent notre système ne devait pas être complètement automatique, mais supervisé par l'utilisateur. Notre deuxième application était de décrire le contenu des images du cerveau en utilisant les langages standards du Web et en nous appuyant sur notre ontologie sulco-gyrale, qui nous fournit le vocabulaire nécessaire et une connaissance formelle sur les relations méréologiques et topologiques entre les structures anatomiques. Ceci permet d'effectuer des recherches d'images par leur contenu sémantique en utilisant des requêtes telles que les requêtes **SPARQL**, potentiellement utiles pour un neurochirurgien lorsqu'il prépare une intervention chirurgicale et veut tirer profit des expériences précédentes en recherchant, dans une base d'images annotées, des cas similaires à celui qu'il est en train de préparer. Les annotations sémantiques sont également utiles dans le processus d'intégration de données dans le Web, notamment des images dispersées dans un environnement distribué. Par conséquent, et aussi dans un souci d'interopérabilité des systèmes de santé, nous avons représenté les annotations selon une ontologie conçue pour le partage des ROI en neuroimagerie [203].

Notre système d'annotation est original sur plusieurs aspects. D'abord, il combine de manière complémentaire des connaissances numériques (un atlas) avec des connaissances symboliques (l'ontologie sulco-gyrale). Il est évident que développer une ontologie ou un modèle d'annotation pose un certain nombre de problèmes, et qu'utiliser l'ontologie ou le modèle dans un système opérationnel pose de nombreuses autres questions pratiques. Par exemple, les ontologies décrivent un domaine d'une manière abstraite, elles ne sont pas reliées à un repère dans l'espace, ceci rend leur utilisation difficile, particulièrement dans des applications de l'imagerie. De plus, comme déjà dit, les algorithmes de raisonnement ne sont pas encore au point pour pouvoir exploiter toute la connaissance qu'on peut exprimer dans les ontologies. La combinaison d'un atlas des gyri et de l'ontologie sulco-gyrale nous a permis d'une part d'apporter des solutions aux limites classiques des atlas, en associant une sémantique explicite et riche aux structures représentées, en représentant explicitement les relations entre les différentes structures anatomiques, en permettant d'interpréter aussi bien les images de sujets normaux que pathologiques, etc. D'autre part, cette combinaison nous a permis de répondre aux nouveaux défis nés avec Internet en termes de partage de données expérimentales, et cela en produisant des annotations basées sur une ontologie partageable. Ce type d'approches, combinant les modèles numériques avec les

modèles symboliques, ou les modèles mathématiques avec les modèles logiques ont sûrement un avenir dans de nombreux domaines, tels que l'imagerie cérébrale (algorithmes de segmentation par exemple), la vision par ordinateur, la géographie, etc. En effet, les modèles numériques commencent à atteindre leur limites en termes de performance, et leur amélioration seront toujours minimales par rapport aux vraies attentes. Les modèles symboliques, quant à eux, restent à un niveau d'abstraction plus élevé et sont peu adaptés à des utilisations dans de vraies applications telles que l'imagerie. Cependant, leur utilisation pour améliorer les modèles numériques est une piste prometteuse.

Le deuxième élément d'originalité de notre système d'annotation est la détermination automatique des interprétations pour les patches, qui sont compatibles avec la connaissance a priori de l'arrangement spatial des gyri et des parties de gyri dans le cerveau. Ceci est fait en se basant sur une formalisation de notre problème d'interprétation comme un problème de satisfaction de contraintes et en définissant des contraintes spatiales symboliques par des ensembles de tuples. Ceci rejoint ce que nous avons dit auparavant, à savoir que la connaissance exprimée dans l'ontologie peut être utilisée sous une autre forme dans un raisonnement spécifique, en vue d'effectuer une tâche particulière. Quant à l'identification des parties de sillons, elle est basée sur leurs définitions dans l'ontologie applicative. Ces définitions sont précisément les conditions nécessaires et suffisantes qui consistent en un sous ensemble d'axiomes définissant un concept. Là aussi, on peut se poser la question de savoir selon quels critères "objectifs" on sélectionne les axiomes qui seront la base de l'identification des instances de sillons. Dans notre cas, les conditions nécessaires et suffisantes impliquent les axiomes relatifs à la topologie et aux relations directionnelles. Ceci est motivé par le fait que le raisonnement que nous voulions appliquer pour l'annotation utilise les relations topologiques et directionnelles entre les entités graphiques extraites des images.

Le troisième élément d'originalité de notre approche est la possibilité d'interpréter aussi bien les images de sujets normaux que pathologiques, ceci grâce aux définitions abstraites des concepts dans l'ontologie. Un processus pathologique, telle qu'une tumeur, peut causer des déplacements des structures anatomiques voisines. Dans ce cas, les atlas, obtenus généralement à partir d'images de sujets sains uniquement et dans un repère particulier, vont échouer à identifier les zones entourant la tumeur. En revanche, notre approche, basée sur la connaissance a priori sur les relations topologiques, méréologiques et directionnelles, définies dans l'ontologie indépendamment de tout repère, n'est pas sensible à ces décalages tant que ces relations sont préservées, notamment les relations topologiques ; ce qui est souvent le cas.

Enfin, le quatrième élément d'originalité concerne le mode d'utilisation du système d'annotation, où nous avons privilégié également l'utilisation des technologies du Web. En effet, nous avons implémenté les différents modules de raisonnement sous forme de services Web que n'importe quel utilisateur peut exécuter à distance. Outre la facilitation de la

mise à jour des connaissances impliquées dans le raisonnement (atlas et ontologie), l'implémentation sous forme de services Web facilite aussi l'utilisation du système d'annotation, ce qui est très important. En effet, vu le grand nombre d'images qui sont produites dans les différents centres de recherche, cela nécessite des outils d'annotation facilement utilisables, afin que ces images soient mieux gérées et facilement intégrées.

Examinons maintenant d'une manière plus générale comment un processus d'interprétation d'images peut être supporté par des services de raisonnement en logiques de description. En effet, les langages des logiques de description ont l'avantage d'offrir une sémantique formelle qui aide à éviter les ambiguïtés qui apparaissent souvent lorsque les bases de connaissances et les procédures d'inférence sont construites de manière intuitive. Un système de logiques de description vérifie toujours la cohérence de la ABox par rapport à la TBox. Par conséquent, la ABox correspond formellement à un modèle (partiel) de la TBox, et donc, étant donné son rôle en interprétation d'images, est une interprétation partielle de l'image. On conclut que la vérification de cohérence en logiques de description peut être utilisée pour s'assurer de la cohérence des interprétations des images. L'autre service d'inférence important en logiques de description est la vérification d'instance (instance checking en anglais), qui consiste à déterminer si un individu de la ABox est une instance d'un concept donné de la TBox. La vérification d'instance constitue un service d'inférence immédiatement applicable à l'interprétation de scènes en général et d'images en particulier. Etant donné un segment d'une image représenté comme un individu d'une ABox, le service de vérification d'instance permet de déterminer le concept de la TBox le plus spécifique applicable à cet individu. Cependant, en général ceci n'est pas applicable en interprétation d'images, parce que le processus d'interprétation d'images est très complexe et ne peut être modélisé uniquement comme une déduction. Il est plus approprié de modéliser l'interprétation d'images comme une tâche de construction de modèle logique. En interprétation d'images, il est préférable aussi d'utiliser des systèmes qui peuvent faire des retours en arrière pour prendre la bonne décision, ce qui n'est pas le cas des systèmes actuels basés sur les logiques de description. De plus, un système d'interprétation d'images, et surtout un système de vision, devrait pouvoir effectuer un choix parmi plusieurs hypothèses possibles, en leur associant un ordre de préférence, ce que ne peuvent pas faire les systèmes des logiques de description classiques. Dans notre cas, nous avons d'abord calculé des hypothèses pour les patches délimités sur l'image, en utilisant un atlas des gyri. Ensuite, nous avons utilisé un raisonnement par contraintes pour déterminer les bonnes étiquettes pour les patches. Enfin, une fois les patches étiquetés, un raisonnement déductif simple en logiques de description nous a permis d'étiqueter les segments de sillons.

Ces dernières années plusieurs projets ont été lancés sur l'annotation sémantique de données, notamment des images médicales, utilisant les ontologies et les nouvelles technologies du Web Sémantique. Cependant, ces travaux s'intéressent le plus souvent aux modèles d'annotation (c'est-à-dire aux ontologies décrivant les annotations), et beaucoup moins à l'utilisation de ces modèles dans des applications réelles d'annotation. Dans notre cas en

revanche, nous avons développé un nouveau système d'annotation opérationnel, basé sur l'ontologie sulco-gyrale, et nous avons décrit les annotations produites selon un modèle que nous avons réutilisé, qui est l'ontologie de Temal et al. [203] (pour le partage d'informations relatives à des ROI en neuroimagerie), et nous les avons représentées en RDF afin de faciliter leur partage, l'interopérabilité des systèmes qui les utilisent, ainsi que l'intégration de données images. En effet, l'annotation sémantique des données et des ressources du Web, basée sur des modèles ontologiques, est une piste prometteuse pour transformer le Web actuel en un Web Sémantique. Cependant, plusieurs aspects de l'annotation sémantique des données du Web restent des problèmes ouverts : on peut citer, par exemple, la gestion des incohérences dans un environnement distribué de données annotées, la gestion de l'évolution des vocabulaires (des ontologies) sur lesquels les annotations sont basées, le développement de systèmes de gestion d'annotations permettant leur interrogation, leur stockage et leur utilisation dans des raisonnements, etc.

En conclusion, nous pensons que le nombre sans cesse croissant d'images et de données médicales, situées dans différents centres, implique le développement de nouvelles méthodes afin de les gérer de manière efficace. Par ailleurs, le partage et la réutilisation des données expérimentales et des connaissances médicales joue un rôle déterminant dans la recherche biomédicale et translationnelle, l'aide à la décision et l'enseignement des disciplines médicales. Cela passe d'une part par une meilleure connaissance des différents domaines et une meilleure description des données au niveau de chaque centre, et d'autre part par une meilleure gestion globale du partage de l'information entre les différents centres. De ce point de vue, les ontologies dont la construction est régie par des règles syntaxiques et sémantiques communément adoptées au sein de la communauté scientifique, constituent une solution acceptable pour la représentation des connaissances et des données, permettant leur partage et leur réutilisation. Par ailleurs, Internet constitue une excellente infrastructure permettant une gestion collaborative et distribuée des données et des connaissances dans le Web. Le Web Sémantique a justement comme ambition d'associer une sémantique claire et bien définie aux différentes sources d'information, en vue d'une organisation cohérente des données dans le Web. Concernant le travail sur le système d'annotation que nous avons développé dans cette thèse, il fallait coordonner et tenir compte de plusieurs aspects. En effet, le travail de la thèse se situe à l'intersection de plusieurs disciplines : l'Intelligence Artificielle, l'imagerie médicale, l'Ingénierie des Connaissances et l'anatomie. Il fallait faire les bons choix de telle sorte que l'ensemble combiné réponde d'une part aux objectifs en termes de recherche formulés au départ, et d'autre part aboutir à un résultat applicatif tangible qui réponde aux attentes des partenaires du domaine clinique avec qui nous avons collaboré. L'intérêt des domaines pluridisciplinaires est de pouvoir étudier un problème d'une manière approfondie et sur ses différentes facettes, afin d'aboutir à une solution globalement satisfaisante. En revanche, la difficulté de ces domaines est de trouver les bons partenaires de différentes sensibilités qui puissent travailler pour un objectif commun. Ceci reste, à notre avis, un défi de la recherche pluridisciplinaire. Au delà

de la pluridisciplinarité, nous pensons que c'est important de faire un rapprochement entre les différents travaux qui ont des objectifs similaires. A ce titre, il se trouve que le travail que nous avons réalisé dans le cadre de la thèse est similaire à des travaux en Systèmes d'Information Géographiques (SIG). En effet, il s'avère que des analogies peuvent être établies, notamment sur le plan de la modélisation, entre notre travail et des SIG qui décrivent de façon détaillée les villes et les pays. Nous avons parlé de la variabilité anatomique inter-individuelle dans le cerveau, où, néanmoins, certains repères varient peu d'un individu à l'autre, ce qui est semblable aux villes qui sont différentes et changent au cours du temps, mais qui peuvent avoir plusieurs points communs. Il serait alors intéressant de voir, d'une part, comment les SIG gèrent les cartographies, les données et les connaissances sur le fonctionnement et l'organisation des villes, et d'autre part analyser comment les SIG intègrent la double variabilité structurelle et fonctionnelle, afin de voir si les modèles développés dans le cadre des SIG peuvent être adaptés pour étudier cette fois-ci la variabilité anatomo-fonctionnelle dans le cerveau. En effet, un bon modèle ou un bon système est celui qui peut être adapté pour résoudre des problèmes similaires dans d'autres domaines. Par conséquent, les systèmes développés en imagerie médicale et en biomédecine en général devraient être, eux aussi, génériques afin qu'ils soient réutilisables dans d'autres applications de la biomédecine ou d'un tout autre domaine.

Conclusion générale

Le partage de connaissances et de données expérimentales à grande échelle est un nouveau besoin exprimé par la communauté scientifique du domaine biomédical. De plus, la prolifération rapide des données, notamment des images médicales, dans les différents centres de recherche incite à une nouvelle approche permettant de les mieux gérer. Dans ce contexte, le cerveau fait l'objet de très nombreuses recherches qui visent à étudier et à comprendre sa structure et son fonctionnement, et l'imagerie médicale a permis des avancées considérables dans ce domaine. Elle permet d'examiner un cerveau d'un être vivant de façon totalement non invasive. De ce fait, un nombre considérable d'images est produit dans différents sites, et par conséquent leur gestion devient de plus en plus difficile aussi bien au niveau local, c'est-à-dire au niveau de chaque site, que global, c'est-à-dire dans le cadre d'une gestion collaborative et partagée de ces images. Par ailleurs, l'anatomie du cerveau joue un rôle central en neurosciences, aussi bien sur le plan structurel que fonctionnel. Partager les connaissances anatomiques sur le cerveau est donc très important sur plusieurs plans. Cependant, la modélisation et la représentation de ces connaissances n'est pas une tâche facile, en particulier du fait de l'existence d'une forte variabilité anatomique inter-individuelle. En outre, l'utilisation de ces connaissances dans des applications réelles est un autre problème difficile, étant donné que leur représentation diffère d'une application à une autre.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons abordé justement le problème de la modélisation, mais surtout de la représentation des connaissances anatomiques sulco-gyrales, ainsi que leur utilisation pour l'annotation sémantique des images IRM du cerveau. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur des travaux déjà existants, qui sont complémentaires et bien reconnus dans la communauté de la neuroanatomie. Il s'agit de la modélisation des connaissances neuroanatomiques proposée par *Dameron*, de l'ontologie *FMA* et de l'atlas de *Ono* pour les sillons. Notre contribution sur cette partie a consisté d'abord à proposer une ontologie qui modélise la connaissance sur l'anatomie sulco-gyrale, et qui soit la plus complète possible. Ensuite il fallait formaliser l'ontologie de telle sorte qu'elle soit exploitable par les programmes informatiques. Pour cela, nous avons utilisé le formalisme des logiques de description, qui a l'avantage d'offrir une sémantique formelle qui aide à maintenir la cohérence des connaissances exprimées. Nous avons également représenté certaines connaissances en utilisant des règles qui augmentent l'expressivité de l'ontologie. Les règles ont notamment été utiles pour pouvoir raisonner sur les parties des entités anatomiques - parties des sillons et parties des gyri - afin de pouvoir les attacher à des tout identifiables. Enfin, et dans le souci de partager l'ontologie via Internet, nous avons privilégié l'utilisation des technologies développées dans le cadre du Web Sémantique, en particulier le langage OWL pour la représentation des ontologies et le langage SWRL pour la représentation des règles. La deuxième contribution de la thèse, qui est la plus importante, concernait l'annotation sémantique des parties de gyri et de sillons extraites par les outils d'imagerie à partir des images IRM du cerveau. En effet, l'ontologie sulco-gyrale devait servir comme support pour l'annotation des images. Cependant, l'utilisation des on-

tologies dans le domaine de l'imagerie est loin d'être évidente, du fait, essentiellement, de leur haut niveau d'abstraction. Nous avons alors combiné un raisonnement par contraintes, qui consistait à modéliser notre problème d'identification de patches sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes, dont les domaines des variables sont initialisés à partir d'un atlas des gyri, avec un raisonnement en logiques de description, pour l'identification des segments de sillons. Cette combinaison représente l'élément d'originalité principal de la thèse. La production d'annotations reliées à l'ontologie sulco-gyrale et décrites selon une ontologie existante sur le partage d'informations relatives à des régions d'intérêt en neuroimagerie est aussi originale. De cette manière, les annotations permettront, d'une part, l'intégration des images et leur partage via Internet et, d'autre part, elles peuvent servir comme des repères anatomiques pour un neurochirurgien lors de la préparation de sa chirurgie, elles facilitent par ailleurs la recherche automatique de cas similaires dans une base d'images annotées. Enfin, l'implémentation du système avec une architecture client-serveur utilisant les services Web est aussi originale, car elle facilite l'utilisation du système et la maintenance des connaissances impliquées dans le raisonnement.

Des perspectives intéressantes de ce travail de thèse sont envisagées, elles concernent aussi bien la modélisation et la représentation des connaissances relatives au cerveau que l'extension du système pour pouvoir traiter d'autres problèmes d'actualité en neuroimagerie. En effet, et outre les améliorations possibles de l'ontologie et du système d'annotation énoncées dans les chapitres 3 et 5, il serait intéressant d'enrichir l'ontologie par d'autres types de connaissances. Il s'agit par exemple de connaissances a priori sur les différents types de tumeurs et sur leur influence sur l'anatomie normale du cerveau. Ceci peut être fait par exemple, comme dans [9], en apprenant la variabilité des relations spatiales entre les structures anatomiques, causée par les différents types de tumeurs, sur une base d'images de plusieurs cas pathologiques. Cette connaissance peut ensuite être utilisée dans un raisonnement qui aide à mieux interpréter les images présentant des tumeurs. La modélisation des connaissances sur les connexions des faisceaux de fibres est, à notre avis, la plus intéressante à faire. En effet, il est particulièrement pertinent d'étendre le système d'annotation actuel pour qu'il permette d'assister l'annotation sémantique des faisceaux de fibres nerveuses mis en évidence en IRM de diffusion, en se basant sur la connaissance a priori sur les connexions de ces derniers. L'extension du système peut consister dans un premier temps à étiqueter les faisceaux de fibres, en se basant sur les étiquettes des patches, produites par le système actuel, ainsi que sur la connaissance a priori sur les connexions des faisceaux de fibres ; c'est-à-dire étendre le système afin de pouvoir assister l'utilisateur dans l'étiquetage des faisceaux de fibres, qui soit cohérent avec l'étiquetage des gyri. Cependant, nous souhaitons aller plus loin, en permettant une annotation conjointe des faisceaux de fibres et des structures corticales (les patches) qu'ils connectent. En effet, dans certaines situations il est plus facile d'identifier les gyri en connaissant les faisceaux de fibres qui les connectent, et dans d'autres c'est plutôt l'inverse, d'où l'intérêt d'un étiquetage se faisant dans les deux sens. Ceci remet en cause, évidemment, le fonctionnement

du système d'annotation actuel, mais permet de produire des étiquettes plus précises pour les faisceaux de fibres et pour les structures corticales, et qui correspondent mieux à la réalité de l'anatomie dans le cerveau.

Annexe

Chapitre 6

Détails sur l'extraction des patches

6.1 Extraction des patches

L'étape décrite ici correspond à la détection des patches. On peut intuitivement déterminer des patches visuellement (voir figure 5.1). Notre objectif est de trouver les cycles les plus simples dans la liste des segments pour arriver au résultat présenté sur la figure 5.1. Pour ce faire, on dispose de deux types d'informations : numériques et topologiques. A l'issue de ce traitement, le module développé doit fournir les informations suivantes :

- les segments qui forment chaque patch ;
- le type de chaque segment appartenant au patch (trace originelle ou séparation conventionnelle) ;
- l'emplacement de chacun de ces segments par rapport au "corps" du patch ;
- l'emplacement du patch par rapport aux autres patches.

6.1.1 Solution envisagée

Après de nombreux essais, la solution retenue vise à s'appuyer sur les informations topologiques de la zone du cortex dont nous disposons et notamment des segments. Il existe certes une multitude d'algorithmes de graphes existants mais, à notre connaissance, aucune méthode existante ne correspond à notre problème. Ainsi, la solution retenue est de choisir le segment le "plus à droite" chaque fois qu'un choix est nécessaire. De cette façon, il est possible de faire converger notre algorithme. Voyons comment cela est mis en oeuvre.

Le calcul des orientations

Le problème se pose aux intersections mettant en jeu plus de deux segments. En effet, nous cherchons le segment qui doit succéder à un précédent parmi un choix d'au moins deux segments candidats (voir figure 6.1). Pour cela, nous commençons par déterminer l'angle que fait le segment courant avec chacune de ses segments amis (voisins). Nous répétons cette opération pour tous les segments du graphe. Enfin, nous obtenons une table d'orientation pour chaque segment.

L'idée est de retenir des vecteurs qui vont représenter nos segments, de former un plan approximant la surface du cortex localement et de comparer les positions respectives des différents vecteurs. Pour cela, nous commençons par déterminer l'orientation locale d'un segment à partir d'un certain nombre de points, dont nous calculons le barycentre. Ensuite, nous récupérons le barycentre du graphe à partir duquel nous avons extrait la ROI. Ce point, avec le point de jonction ami le plus proche de l'extrémité en question (le point C sur le graphe 6.1), forment la normale au plan de projection. Puis, nous projetons orthogonalement les points représentatifs des segments (les points A , B et D sur la figure

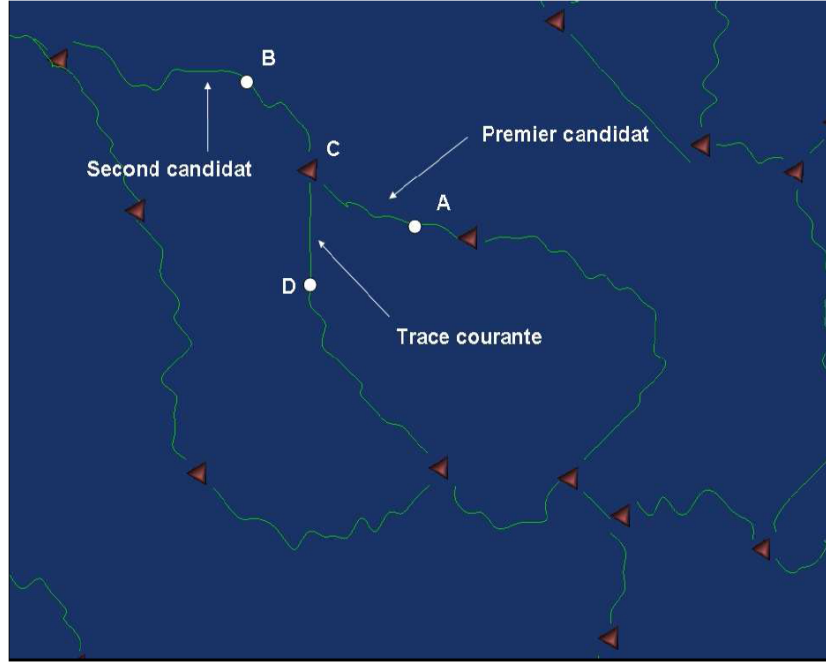


FIG. 6.1: Situation de choix entre deux segments candidats.

6.1) sur ce plan.

A partir de ce moment, nous disposons de projections de n points et allons nous intéresser aux n vecteurs de ce plan : ceux correspondant aux segments. Ce plan de travail est représenté sur la figure 6.2, les vecteurs représentant nos segments sont $\overrightarrow{CD_p}$, $\overrightarrow{CA_p}$ et $\overrightarrow{CB_p}$ où D_p , A_p et B_p sont respectivement les projections orthogonales des points D , A et B représentées sur la figure 6.1.

Comme on peut le constater sur la figure 6.2, les angles entre les segments varient entre 0 et 2π . En raisonnant seulement sur le produit scalaire entre les deux vecteurs, on ne peut avoir que des angles entre 0 et π . Pour cette raison, nous avons choisi de faire le produit scalaire entre le produit vectoriel de deux vecteurs en question et la normale au plan (le vecteur N sur la figure 6.2).

Extraction des patches

Un patch est une chaîne de segments formant un cycle élémentaire. Le fait que ce cycle soit élémentaire nous a amené à calculer les orientations et le fait que cette chaîne

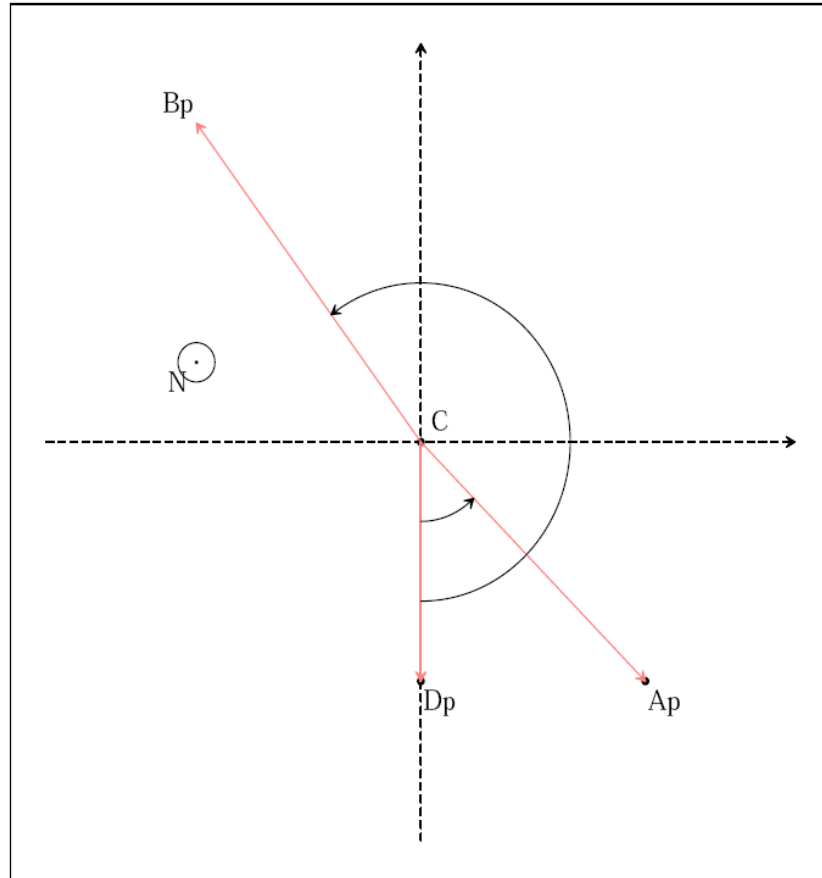


FIG. 6.2: Le plan de projection de segments.

soit un cycle nous a obligé à opter pour une fonction récursive qui aura pour but de détecter le patch qui passe par un segment initialisée au début. Cette fonction prend en entrée un segment, elle génère l'ami successeur (`selectCandidate()` dans l'algorithme 1), dont l'angle avec ce segment est le plus petit. Puis, selon le résultat de cette fonction, on choisit de continuer le raisonnement, en prenant comme segment courant l'ami successeur ou d'arrêter le raisonnement et passer à le segment suivant. L'algorithme 1 permet de mieux expliquer la méthode utilisée pour détecter les patches qui passent par un segment donné.

Algorithm 1 L'algorithme de détection des patches.

Require: segment, patch

Ensure: boolean

```

patch.add(segment)
selectedSegment = selectCandidate(segment)
if isPatchElement(selectedSegment, patch) then
    patch.add(selectedSegment)
    return true
else
    if hasFriends(selectedSegment) then
        return extractPatch(selectedSegment, patch)
    else
        return false
    end if
end if

```

6.2 Diagramme de séquence relatif au système d'annotation

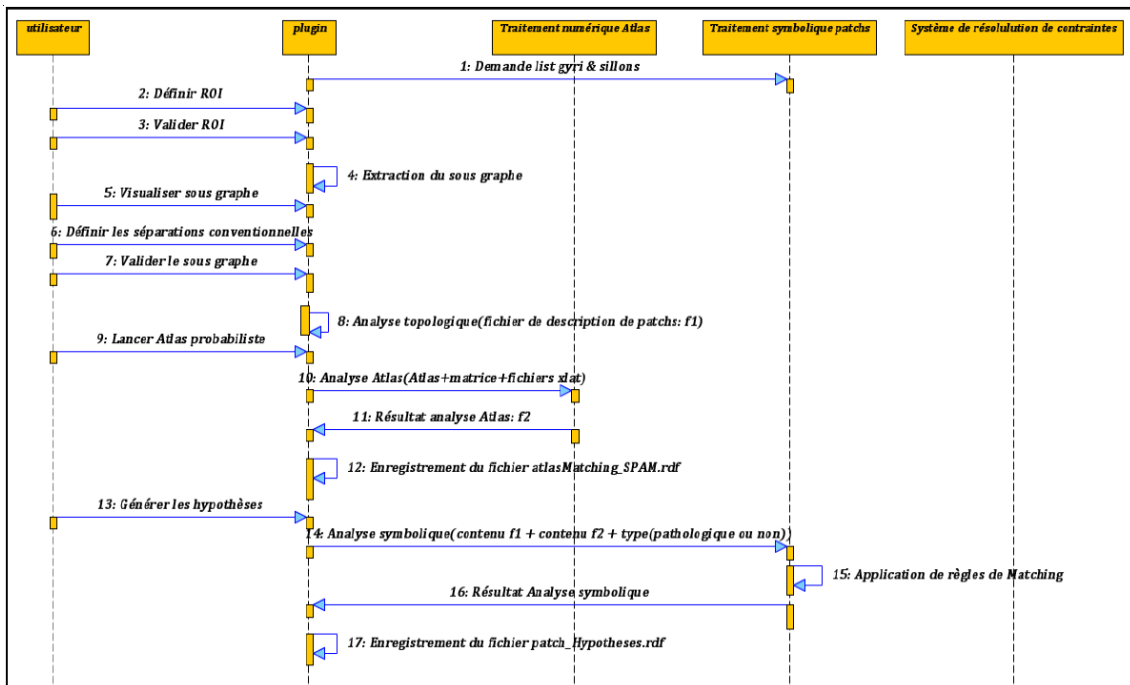


FIG. 6.3: Diagramme de séquence (partie 1/3).

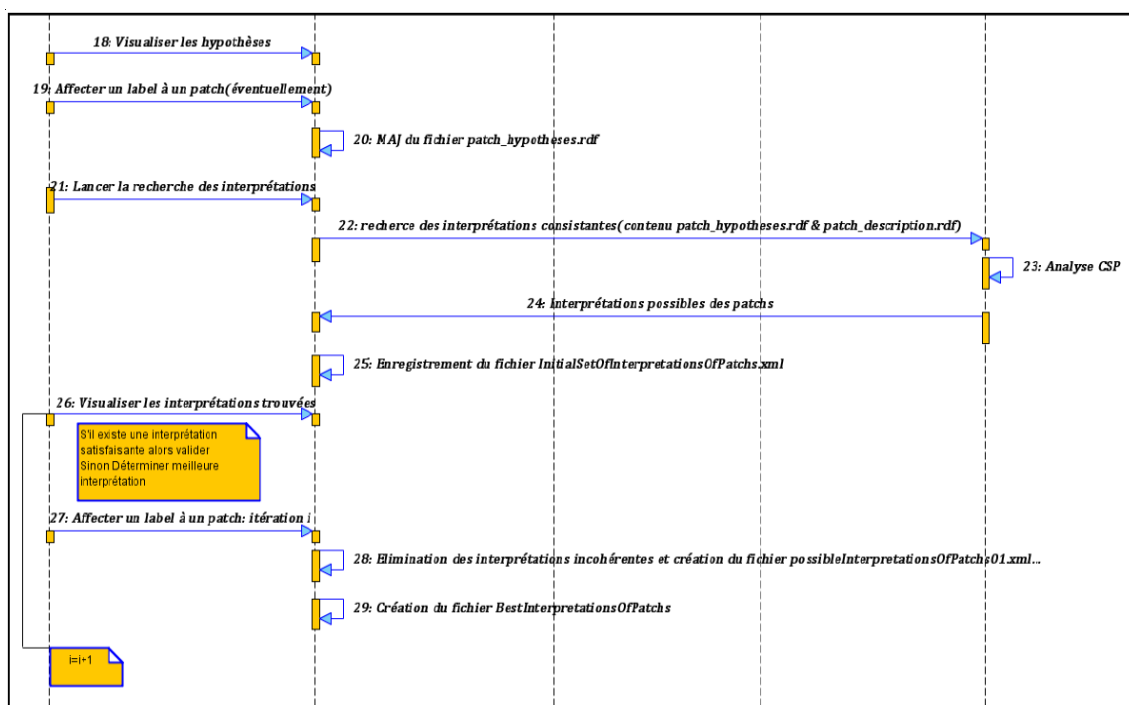


FIG. 6.4: Diagramme de séquence (partie 2/3).

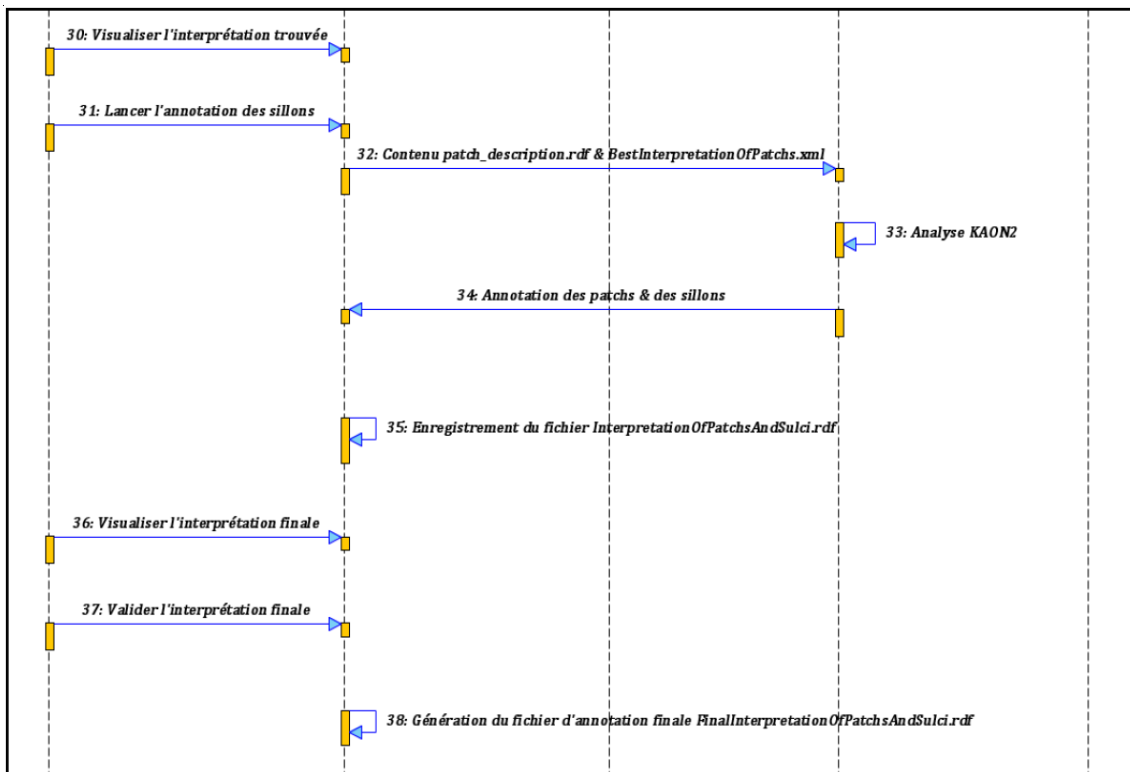


FIG. 6.5: Diagramme de séquence (partie 3/3).

Bibliographie

- [1] Prolog, <http://fr.wikipedia.org/wiki/prolog>, 1972.
- [2] Règles de Horn, 2005.
- [3] Comprendre et modéliser la variabilité anatomique du cerveau, 2007.
- [4] Rakesh Agrawal and Narain H. Gehani. Ode (object database and environment) : The language and the data model. In *SIGMOD Conference*, pages 36–45, 1989.
- [5] James F. Allen. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, 26(11) :832–843, 1983.
- [6] G. Antoniou and F. Van Harmelen. *A Semantic Web Primer*. 2004.
- [7] Grigoris Antoniou, Carlos V. Damásio, Benjamin Grosz, Ian Horrocks, Michael Kifer, Jan Maluszynski, and Peter. Combining Rules and Ontologies. A survey., 2005.
- [8] M. Ashburner, C. A. Ball, J. A. Blake, D. Botstein, H. Butler, J. M. Cherry, A. P. Davis, K. Dolinski, S. S. Dwight, J. T. Eppig, M. A. Harris, D. P. Hill, L. Issel-Tarver, A. Kasarskis, S. Lewis, J. C. Matese, J. E. Richardson, M. Ringwald, G. M. Rubin, and G. Sherlock. Gene ontology : tool for the unification of biology. the gene ontology consortium. *Nat Genet*, 25(1) :25–29, May 2000.
- [9] Jamal Atif, Céline Hudelot, Geoffroy Fouquier, Isabelle Bloch, and Elsa D. Angelini. From generic knowledge to specific reasoning for medical image interpretation using graph based representations. In *IJCAI*, pages 224–229, 2007.
- [10] B. Aubert-Broche, A. C. Evans, and L. Collins. A new improved version of the realistic digital brain phantom. *Neuroimage*, 32(1) :138–145, August 2006.
- [11] Marie-Aude Aufaure and Hicham Hajji. Semantic structuration of image annotations : A data mining approach. In *Multimedia Information Systems*, pages 38–47, 2002.
- [12] N. Aussenac-Gilles, B. Biebow, and S. Szulman. Revisiting ontology design : A methodology based on corpus analysis. In *EKAW '00 : Proceedings of the 12th European Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management*, pages 172–188, London, UK, 2000. Springer-Verlag.

- [13] B. Bachimont. *Arts et Sciences du numérique : ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*. 2004.
- [14] Fadi Badra, Rokia Bendaoud, Rim Bentebitel, Pierre-Antoine Champin, Julien Cojan, Amélie Cordier, Sylvie Desprès, Stéphanie Jean-Daubias, Jean Lieber, Thomas Meilender, Alain Mille, Emmanuel Nauer, Amedeo Napoli, and Yannick Toussaint. Taaable : Text mining, ontology engineering, and hierarchical classification for textual case-based cooking. In *ECCBR Workshops*, pages 219–228, 2008.
- [15] B. Batrancourt. *Modélisation et outils logiciels pour une Connaissance anatomo-fonctionnelle du Cerveau humain*. 2003.
- [16] R. Baud, P. Fabry, F. Namer, P. Ruch, V Griesser, C. Lovis, and A Geissbuhler. Version francophone de la terminologia anatomica. In *JFIM*, 2005.
- [17] Brandon Bennett, Amar Isli, and Anthony G. Cohn. A system handling rcc-8 queries on 2d regions representable in the closure algebra of half-planes. In *IEA/AIE (Vol. 1)*, pages 281–290, 1998.
- [18] T. Berners-Lee, J. Hendler, and O. Lassila. *A Semantic Web*. 2001.
- [19] Thomas Bittner and Maureen Donnelly. Logical properties of foundational relations in bio-ontologies. *Artif. Intell. Med.*, 39(3) :197–216, 2007.
- [20] Thomas Bittner and Louis J. Goldberg. The qualitative and time-dependent character of spatial relations in biomedical ontologies. *Bioinformatics*, 23(13) :1674–1682, 2007.
- [21] Isabelle Bloch. Fuzzy spatial relationships for image processing and interpretation : a review. *Image Vision Comput.*, 23(2) :89–110, 2005.
- [22] Isabelle Bloch. Spatial reasoning under imprecision using fuzzy set theory, formal logics and mathematical morphology. *Int. J. Approx. Reasoning*, 41(2) :77–95, 2006.
- [23] Isabelle Bloch, Olivier Colliot, and Roberto Marcondes Cesar Junior. On the ternary spatial relation "between". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 36(2) :312–327, 2006.
- [24] Olivier Bodenreider. Evaluation of the umls as a terminology and knowledge resource for biomedical informatics. In McCray AT. Bodenreider O, Mitchell JA, editor, *Proc Am Med Inf Assoc*, pages 61–65., 2002.
- [25] C. Bohm, T. Greitz, R. Seitz, and L. Eriksson. Specification and selection of regions of interest (roi) in a computerized brain atlas. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 11 :A64–A68, 1991.
- [26] H. Boley, M. Kifer, P.-L. Patranjan, and A. Polleres. Rule interchange on the web. *Reasoning Web 2007 Summer School.*, NRC 49874, 2007.
- [27] Piero Bonatti. Rule languages for security and privacy in cooperative systems. In *COMPSAC '05 : Proceedings of the 29th Annual International Computer Software*

- and Applications Conference (COMPSAC'05) Volume 1*, pages 268–269, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [28] S. Borgo and P. Leitão. The role of foundational ontologies in manufacturing domain applications. In *On the Move to Meaningful Internet Systems 2004 : CoopIS, DOA, and ODBASE*, volume 3290. Springer Berlin / Heidelberg, 2004.
- [29] J. Bouaud, Bruno Bachimont, Jean Charlet, and Pierre Zweigenbaum. Methodological principles for structuring an ontology. In *IJCAI-95 Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*, Montreal, August 1995.
- [30] D. Bourigault and N. Aussenac-Gilles. Construction d'ontologies à partir de textes. 2003.
- [31] D.M. Bowden and R.F. Martin. Neuronames brain hierarchy. *Neuroimage*, 2 :63–83, 1995.
- [32] Douglas M. Bowden and Mark F. Dubach. NeuroNames 2002. *Neuroinformatics*, 1(1) :43–59, 2003.
- [33] R. J. Brachman and J. G. Schmolze. An overview of the kl-one knowledge representation system. *Cognitive Science*, 9(2) :171–216, 1985.
- [34] J. Brinkley, B. Wong, K. Hinshaw, and C. Rosse. Design of an anatomy information system. *IEEE Computer Graphics*, 19(3) :38–48, 1999.
- [35] Annita Burgun and Olivier Bodenreider. Mapping the umls semantic network into general ontologies. In *AMIA Symp*, 2001.
- [36] A. Cachia, J.F. Mangin, D. Rivièrea, D. Papadopoulos-Orfanos, F. Kherif, I. Bloch, and J. A Régis. A generic framework for parcellation of the cortical surface into gyri using geodesic Voronoï diagrams. *Medical Image Analysis*, 7(4)(403-416), 2003.
- [37] Andrea Calì, Thomas Lukasiewicz, Livia Predoiu, and Heiner Stuckenschmidt. Representing ontology mappings with probabilistic description logics programs. In *SEBD*, pages 438–445, 2008.
- [38] I.C. Carlsen, M. Imme, M.H. Kuhn, W. Menhardt, K. Ottenberg, and K.H. Schmidt. Knowledge based interpretation of cranial mr images. *CAR*, pages 277–282, 1991.
- [39] M. Chakravarty, G. Bertrand, C. P. Hodge, A. F. Sadikot, and D. L. Collins. The creation of a brain atlas for image guided neurosurgery using serial histological data. *NeuroImage*, 30 :359–376, 2006.
- [40] Tsuhan Chen. From low-level features to high-level semantics : Are we bridging the gap? In *ISM '05 : Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Multimedia*, page 179, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [41] D. Chris and H. Xiaofeng. K-means clustering via principal component analysis. In *ICML '04 : Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*, page 29, New York, NY, USA, 2004. ACM.

- [42] Churchill-Livingstone, editor. *Nomina Anatomica*. Edimburgh, 6 edition, 1989.
- [43] Churchill-Livingstone, editor. *Terminologia Anatomica*. International Anatomical Terminology, New York, thieme medical publishers edition, 1998.
- [44] C. Clouchoux, O. Coulon, J.L. Anton, J.F. Mangin, and J. Régis. A new cortical surface parcellation model and its automatic implementation. In *MICCAI 2006*, LNCS 4191, pages 193–200. Springer, 2006.
- [45] D. L. Collins. *3D Model-based segmentation of individual brain structures from magnetic resonance imaging data*. 1994.
- [46] D.L. Collins, A.P. Zijdenbos, W.F.C. Baaré, and A.C. Evans. ANIMAL+INSECT : Improved cortical structure segmentation. In *Proc. of the Annual Symposium on Information Processing in Medical Imaging IPMI99*, LNCS 1613, pages 210–223, 1999.
- [47] D.L. Collins, A.P. Zijdenbos, V. Kollokian, J.G. Sled, N.J. Kabani, C.J. Holmes, and A.C. Evans. Design and construction of a realistic digital brain phantom. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 17(3) :463–468, June 1998.
- [48] Olivier Colliot, Oscar Camara, and Isabelle Bloch. Integration of fuzzy spatial relations in deformable models - application to brain mri segmentation. *Pattern Recognition*, 39(8) :1401–1414, 2006.
- [49] D.L. Cook, J.L.V. Mejino, and C. Rosse. The foundational model of anatomy : a template for the symbolic representation of multi-scale physiological functions. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE*, 2 :5415–5418, Sept. 2004.
- [50] O. Corcho, F.L. Mariano, and G.P. Asunción. Methodologies, tools and languages for building ontologies : where is their meeting point ? *Data Knowl. Eng.*, 46(1) :41–64, 2003.
- [51] N. Cullot, C. Parent, S. Spaccapietra, and C. Vangenot. Des sig aux ontologies géographiques. In *Revue internationale de géomatique*, 2003.
- [52] Nadine CULLOT. Ontologies : Vers une réconciliation des approches logique de description et bases de données. In *Actes du XXIIème congrès INFORSID*, pages 19–21, 2004.
- [53] O. Dameron. *Modélisation, représentation et partage de connaissances anatomiques*. 2003.
- [54] O. Dameron, B. Gibaud, and X. Morandi. Numeric and symbolic representation of the cerebral cortex anatomy : Methods and preliminary results. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 26(3) :191–197, 2004.
- [55] O. Dameron, D. L. Rubin, and Mark A. Musen. Challenges in converting frame-based ontology into OWL : the Foundational Model of Anatomy case-study. In *American Medical Informatics Association Conference AMIA05*, pages 181–185, 2005.

- [56] Olivier Dameron, Mark A. Musen, and Bernard Gibaud. Using semantic dependencies for consistency management of an ontology of brain-cortex anatomy. *Artificial Intelligence in Medicine*, 39(3) :217–225, 2007.
- [57] S. Dasiopoulou, J. Heinecke, C. Saathoff, and M.G. Strintzis. Multimedia reasoning with natural language support. *Semantic Computing, 2007. ICSC 2007. International Conference on*, pages 413–420, Sept. 2007.
- [58] Srinandan Dasmahapatra, David Dupplaw, Bo Hu, Hugh Lewis, Paul Lewis, and Nigel Shadbolt. Facilitating multi-disciplinary knowledge-based support for breast cancer screening. *International Journal of Healthcare Technology and Management*, 7(5) :403–420, 2006.
- [59] S. Dellepiane, C. Regazzoni, S. B. Serpico, and G. Vernazza. Extension of ibis for 3d organ recognition in nmr multi-slices. *Pattern Recogn. Lett.*, 8(2) :65–72, 1988.
- [60] Silvana G. Dellepiane, Giovanni Venturi, and Gianni Vernazza. A fuzzy model for the processing and recognition of mr pathological images. In *IPMI*, pages 444–457, 1991.
- [61] A. Deruyver and H. Hodé. Un système de relations spatiales pour l’interprétation d’images : intégration dans un graphe conceptuel. In *RFIA : Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, 2008.
- [62] R. S. Desikan, F. Ségonne, B. Fischl, B. T. Quinn, B. C. Dickerson, D. Blacker, R. L. Buckner, A. M. Dale, R. P. Maguire, B. T. Hyman, M. S. Albert, and R. J. Killiany. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on mri scans into gyral based regions of interest. *Neuroimage*, 31(3) :968–980, July 2006.
- [63] P. T. Devanbu, R. J. Brachman, P. G. Selfridge, and B. W. Ballard. Lassie—a knowledge-based software information system. In *ICSE ’90 : Proceedings of the 12th international conference on Software engineering*, pages 249–261, Los Alamitos, CA, USA, 1990. IEEE Computer Society Press.
- [64] Francesco M. Donini, Maurizio Lenzerini, Daniele Nardi, and Andrea Schaerf. Allego : Integrating datalog and description logics. *J. Intell. Inf. Syst.*, 10(3) :227–252, 1998.
- [65] Maureen Donnelly, Thomas Bittner, and Cornelius Rosse. A formal theory for spatial representation and reasoning in biomedical ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*, 36 :1–27, 2006.
- [66] Edouard Duchesnay, Jean-Francois Mangin, Alexis Roche, Denis Rivière, Dimitri Papadopoulos-Orfanos, and Yann Cointepas. Population classification based on structural morphometry of cortical sulci. In *ISBI*, pages 1267–1270, 2004.
- [67] J. C. Dunn. A fuzzy relative of the isodata process and its use in detecting compact well-separated clusters. *Cybernetics and Systems*, 3(3) :32–57, 1973.

- [68] H. Duvernoy. *The Human Brain Surface, Blood Supply and Three Dimensional Sectional Anatomy*. Springer Verlag, 1999.
- [69] David Eichmann, Miguel E. Ruiz, and Padmini Srinivasan. Cross-language information retrieval with the umls metathesaurus. In *SIGIR '98 : Proceedings of the 21st annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, pages 72–80, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [70] Thomas Eiter, Giovambattista Ianni, Axel Polleres, Roman Schindlauer, and Hans Tompits. Reasoning with rules and ontologies. In Pedro Barahona, François Bry, Enrico Franconi, Nicola Henze, and Ulrike Sattler, editors, *Reasoning Web*, volume 4126 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 93–127. Springer, 2006.
- [71] A.C. Evans, S. Marrett, P. Neelin, L. Collins, K. Worsley, D. Dai, S. Milot, E. Meyer, and D. Bub. Anatomical mapping of functional activation in stereotactic coordinate space. *NeuroImage*, 1 :43–53, 1992.
- [72] M. Fernández-López and A. Gómez-Pérez. Overview and analysis of methodologies for building ontologies. *Knowl. Eng. Rev.*, 17(2) :129–156, 2002.
- [73] B. Fischl, A. van der Kouwe, C. Destrieux, E. Halgren, F. Ségonne, D.H. Salat, E. Busa, L.J. Seidman, J. Goldstein, D. Kennedy, V. Caviness, N. Makris, B. Rosen, and A.M. Dale. Automatically parcellating the human cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 14(11-22), 2004.
- [74] B. Franz, C. Diego, L.M. Deborah, N. Daniele, and Peter F.P.S., editors. *The Description Logic Handbook : Theory, Implementation, and Applications*. Cambridge University Press, 2003.
- [75] P. Gamba and P. Savazzi. Classification of urban environments in sar images : a fuzzy clustering perspective. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1 :351–353 vol.1, Jul 1998.
- [76] A.J. García de Linares and L. de la Peña Fernández. An anatomical and functional model for the study of cortical functions. In *ISMDA01 conference proceedings*, pages 101–107, 2001.
- [77] B. Gibaud, S. Garlatti, C. Barillot, and E. Faure. Methodology for the design of digital brain atlases. In *AIME*, pages 441–452, 1997.
- [78] Carole Goble, Peter Crowther, and Danny Solomon. A medical terminology server. In *Proc. 5th DEXA, volume LNCS Vol 856*, pages 661–670. Springer-Verlag, 1994.
- [79] C Golbreich. Web rules for Health Care and Life Sciences : use cases and requirements. In *RoW Workshop at WWW2006*, 2006.
- [80] C. Golbreich, O. Bierlaire, O. Dameron, and B. Gibaud. Use case : Ontology with rules for identifying brain anatomical structures. In *Rule Languages for Interoperability*, 2005.

- [81] C. Golbreich, O. Dameron, B. Gibaud, and A. Burgun. Comment représenter les ontologies pour tendre vers un web sémantique médical ? In *Journées Françaises de la Toile*, 2003.
- [82] C. Golbreich, S. Zhang, and O. Bodenreider. The foundational model of anatomy in owl : Experience and perspectives. *J. Web Sem.*, 4(3) :181–195, 2006.
- [83] Christine Golbreich. Semantic Web Rules Use Cases and Requirements for Health Care and Life Sciences, 2006.
- [84] Christine Golbreich, Olivier Dameron, Bernard Gibaud, and Anita Burgun. Web ontology language requirements w.r.t expressiveness of taxonomy and axioms in medicine. In *International Semantic Web Conference*, pages 180–194, 2003.
- [85] T. R. Gruber. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 43(5-6) :907–928, 1995.
- [86] Thomas R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowl. Acquis.*, 5(2) :199–220, 1993.
- [87] Rolf Grütter and Bettina Bauer-Messmer. Combining owl with rcc for spatioterminological reasoning on environmental data. In *OWLED*, 2007.
- [88] Rolf Grütter, Thomas Scharrenbach, and Bettina Bauer-Messmer. Improving an rcc-derived geospatial approximation by owl axioms. In *International Semantic Web Conference*, pages 293–306, 2008.
- [89] N. Guarino. Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 43(5-6) :625–640, 1995.
- [90] N. Guarino. Understanding, building, and using ontologies. *International Journal of Human and Computer Studies*, 46 :293–310, 1997.
- [91] N. Guarino and C.A. Welty. A formal ontology of properties. In *EKAW '00 : Proceedings of the 12th European Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management*, pages 97–112, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
- [92] Volker Haarslev, Carsten Lutz, and Ralf Möller. Foundations of spatioterminological reasoning with description logics. In *KR*, pages 112–123, 1998.
- [93] H.L. Harkey, O. Al-Mefty, D.E. Haines, and Smith R.R. The surgical anatomy of the cerebral sulci. *Neurosurgery*, 1989.
- [94] J.A. Hartigan. *Clustering algorithms*, volume xiii. 1975.
- [95] D Hay and K. A. Healy. Defining business rules - what are they really. 2000.
- [96] Barbara Hayes-Roth. A blackboard architecture for control. *Artif. Intell.*, 26(3) :251–321, 1985.
- [97] G. van Heijst, A. Th. Schreiber, and B. J. Wielinga. Using explicit ontologies in kbs development. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 46(2-3) :183–292, 1997.

- [98] P. Hellier. *Recalage non rigide en imagerie cérébrale : méthodes et validation*. PhD thesis, Université de Rennes 1, December 2000.
- [99] Yann Hodé and Aline Deruyver. Qualitative spatial relationships for image interpretation by using semantic graph. In *GbRPR*, pages 240–250, 2007.
- [100] K.H. Höhne, B. Pflessner, A. Pommert, M. Riemer, T. Schiemann, R. Schubert, and U. Tiede. A 'virtual body' model for surgical education and rehearsal. *Computer*, pages 25–31, 1996.
- [101] K.H. Hohné, A. Pommert, M. Riemer, Th. Schiemann, R. Schubert, and U. Tiede. Framework for the generation of 3d anatomical atlases. In *Proc Visualization in Biomedical Computing*, pages 510–520, 1992.
- [102] C. J. Holmes, R. Hoge, L. Collins, R. Woods, A. W. Toga, and A. C. Evans. Enhancement of mr images using registration for signal averaging. *J Comput Assist Tomogr*, 22(2) :324–333, 1998.
- [103] Alfred Horn. On sentences which are true of direct unions of algebras. *Journal of Symbolic Logic*, 16 :14–21, 1951.
- [104] I. Horrocks and P.F Patel-Schneider. A proposal for an owl rules language. In *WWW*, pages 723–731, 2004.
- [105] Ian Horrocks, Peter F. Patel-Schneider, and Franck van Harmelen. From *SHIQ* and RDF to OWL : The making of a web ontology language. *Journal of Web Semantics*, 2003. To appear.
- [106] Bo Hu, Srinandan Dasmahapatra, Paul Lewis, and Nigel Shadbolt. Ontology-based medical image annotation with description logics. In *ICTAI '03 : Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, page 77, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [107] C. Hudelot, J. Atif, and I. Bloch. Fuzzy spatial relation ontology for image interpretation. *Fuzzy Sets Syst.*, 159(15) :1929–1951, 2008.
- [108] C.B. James. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1981.
- [109] P. Jannin, X. Morandi, O.J. Fleig, E. Le Rumeur, P. Toulouse, B. Gibaud, and J.M. Scarabin. Integration of sulcal and functional information for multimodal neuronavigation. *Journal of Neurosurgery*, 96(4)(713-723), 2002.
- [110] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes : Active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1(4) :321–331, 1988.
- [111] R. Kikinis, M.E. Shenton, D.V. Iosifescu, R.W. McCarley, P. Saiviroonporn, H.H. Hokama, 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*, 2(3) :232–241, 1996.

- [112] J. d. Kleer. An assumption-based tms. *Artif. Intell.*, 28(2) :127–162, 1986.
- [113] Pavel Klinov and Bijan Parsia. Pronto : Probabilistic ontological modeling in the semantic web. In *International Semantic Web Conference (Posters & Demos)*, 2008.
- [114] H. Knublauch, O. Dameron, and M. Musen. Weaving the biomedical semantic web with the Protégé OWL plugin. In *First International Workshop on Formal Biomedical Knowledge Representation KRMED04*, pages 39–47, 2004.
- [115] A. Krzysztof. *Principles of Constraint Programming*. 2003.
- [116] S. Lajmi, E. Egyed-Zsigmond, J.M Pinon, and B. Ben Hamadou. Système en ligne de gestion collaborative d’images médicales. In *RJCIA*, 2007.
- [117] S.D Larson, L.L Fong, A. Gupta, C. Condit, W.J. Bug, and M.E. Martone. A formal ontology of subcellular neuroanatomy. *Front Neuroinformatics*, 1 :3, 2007.
- [118] G. Le Goualher, C. Barillot, and Y. Bizais. Modeling cortical sulci with active ribbons. *IJPRAI*, 11(8) :1295–1315, 1997.
- [119] Yugyung Lee and James Geller. Semantic enrichment for medical ontologies. *J. of Biomedical Informatics*, 39(2) :209–226, 2006.
- [120] H. J. Levesque and R. J. Brachman. Expressiveness and tractability in knowledge representation and reasoning. *Computational Intelligence*, 3 :78–93, 1987.
- [121] Alon Y. Levy and Marie-Christine Rousset. Carin : A representation language combining horn rules and description logics. In *ECAI*, pages 323–327, 1996.
- [122] A.Y. Levy and M.R. Rousset. Combining horn rules and description logics in carin. *Artif. Intell.*, 104(1-2) :165–209, 1998.
- [123] Sanjiang Li, Mingsheng Ying, and Yongming Li. On countable rcc models. *Fundam. Inf.*, 65(4) :329–351, 2004.
- [124] D.A. Lindberg, B.L. Humphreys, and A.T. McCray. The unified medical language system. *Methods of Information in Medicine*, 32(4) :281–291, 1993.
- [125] N. Loménie, N. Vincent, and R. Mullot. Les relations spatiales : de la modélisation à la mise en oeuvre, 2009.
- [126] J. B. MacQueen. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In L. M. Le Cam and J. Neyman, editors, *Proc. of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, volume 1, pages 281–297. University of California Press, 1967.
- [127] Meena Mani, Anuj Srivastava, and Christian Barillot. The Labeling of Cortical Sulci using Multidimensional Scaling. *The Midas Journal*, 2008. <http://hdl.handle.net/10380/1502>.
- [128] R.F. Martin, J.L.V. Mejino, D.M. Bowden, J.F. Brinkley, and C. Rosse. Foundational model of neuroanatomy : Implications for the human brain project. In *AMIA*

- Symp. 01*, 2001. <http://sig.biostr.washington.edu/~onard/AMIApapers/NAFMSubmit3.01.doc>.
- [129] J. Mazziotta, A. Toga, A. Evans, P. Fox, J. Lancaster, K. Zilles, R. Woods, T. Paus, G. Simpson, B. Pike, C. Holmes, L. Collins, P. Thompson, D. MacDonald, Iacoboni M., T. Schormann, K. Amunts, N. Palomero-Gallagher, S. Geyer, L. Parsons, K. Narr, N. Kabani, G. Le Goualher, J. Feidler, K. Smith, D. Boomsma, H. Hulshoff Pol, T. Cannon, R. Kawashima, and B. Mazoyer. A four-dimensional probabilistic atlas of the human brain. *Journal of the American Medical Informatics Association (JAMIA)*, 8(5) :401–430, 2001.
 - [130] J. C. Mazziotta, A. W. Toga, A. Evans, P. Fox, and J. Lancaster. A probabilistic atlas of the human brain : theory and rationale for its development. the international consortium for brain mapping (icbm). *Neuroimage*, 2(2) :89–101, 1995.
 - [131] Ammar Mechouche, Christine Golbreich, and Bernard Gibaud. Vers un système hybride pour l’annotation sémantique d’images irm du cerveau. In *EGC*, pages 433–444, 2007.
 - [132] Ammar Mechouche, Christine Golbreich, Xavier Morandi, and Bernard Gibaud. Ontology-based annotation of brain mri images. In *American Medical Informatics Association, AMIA 2008 Annual Symposium*, pages 460–464, Washington, USA, November 2008.
 - [133] Ammar Mechouche, Xavier Morandi, Christine Golbreich, and Bernard Gibaud. A hybrid system for the semantic annotation of sulco-gyral anatomy in mri images. In *MICCAI (1)*, pages 807–814, 2008.
 - [134] S. Mehmet and Bulent S. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1) :146–168, 2004.
 - [135] Wido Menhardt. Image analysis using iconic fuzzy sets. In *ECAI*, pages 672–674, 1988.
 - [136] Marvin Minsky. A framework for representing knowledge. Technical report, Cambridge, MA, USA, 1974.
 - [137] Manuel Möller and Michael Sintek. A scalable architecture for cross-modal semantic annotation and retrieval. In *KI*, pages 391–392, 2008.
 - [138] Manuel Möller, Michael Sintek, Paul Buitelaar, Saikat Mukherjee, Xiang Sean Zhou, and Joerg Freund. Medical image understanding through the integration of cross-modal object recognition with formal domain knowledge. In *HEALTHINF (1)*, pages 134–141, 2008.
 - [139] B. Motik, U. Sattler, and R. Studer. Query answering for OWL DL with rules. In *ISWC 2004, LNCS 3298 Springer*. Springer-Verlag, 2004.
 - [140] Duvernoy H.M. Delman B.N. Sorensen A.G. Kollias S.S. Haacke E.M. Naidich, Th.P. *Duvernoy’s Atlas of the Human Brain Stem and Cerebellum*. Number 876. 2009.

- [141] T.P. Naidich, A.G. Valavanis, and S. Kubik. Anatomical relationships along the low-middle convexity : Part i normal specimens and magnetic resonance imaging. *Neurosurgery*, 36 :517–532, 1995.
- [142] K. Natarajan, Claridge E., and D.N. Davis. The symbolic atlas of the brain : handling non-visual information associated with neuroanatomy. *Medical Informatics*, 21(1) :1–22, 1996.
- [143] Emmanuel Nauer and Amedeo Napoli. A proposal for annotation, semantic similarity and classification of textual documents. In *AIMSA*, pages 201–212, 2006.
- [144] Olivier Nempont, Jamal Atif, Elsa D. Angelini, and Isabelle Bloch. Structure segmentation and recognition in images guided by structural constraint propagation. In *ECAI*, pages 621–625, 2008.
- [145] Bernd Neumann and Ralf Möller. On scene interpretation with description logics. *Image Vision Comput.*, 26(1) :82–101, 2008.
- [146] H. Niemann, G.F. Sagerer, S. Schroder, and F. Kummert. Ernest : a semantic network system for pattern understanding. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 12(9) :883–905, Sep 1990.
- [147] W.L. Nowinski, A. Fang, B.T. Nguyen, J.K. Raphel, L. Jagannathan, R. Raghavan, R.N. Bryan, and G. Miller. Multiple brain atlas database and atlas-based neuroimaging system. *Computer Aided Surgery*, 2(1) :42–66, 1997.
- [148] Natalya F. Noy and Deborah L. mcguinness. Ontology development 101 : A guide to creating your first ontology. Online, 2001.
- [149] Natalya F. Noy and Daniel L. Rubin. Translating the foundational model of anatomy into owl. *Web Semant.*, 6(2) :133–136, 2008.
- [150] F. Noy Natalya and L. Mc Guinness Deborah. Développement d’une ontologie 101 : Guide pour la création de votre première ontologie. *Généralités et aspects théoriques des sciences de l’information*, 2008.
- [151] Martin J. O’Connor, Holger Knublauch, Samson W. Tu, Benjamin N. Grosof, Mike Dean, William E. Grosso, and Mark A. Musen. Supporting rule system interoperability on the semantic web with swrl. In *International Semantic Web Conference*, pages 974–986, 2005.
- [152] M. Ono, S. Kubik, and C. Abernathey. *Atlas of the Cerebral Sulci*. 1990.
- [153] Gilles Paintaud. Modélisation et biomarqueurs, 2002.
- [154] P.F Patel-Schneider and I. Horrocks. A comparison of two modelling paradigms in the semantic web. *Web Semant.*, 5(4) :240–250, 2007.
- [155] Matthieu Perrot, Denis Rivière, and Jean-Francois Mangin. Identifying cortical sulci from localization, shape and local organization. In *ISBI*, pages 420–423, 2008.

- [156] M. Petrou and P. Bosdogianni. *Image Processing the Fundamentals*. Wiley, UK, 2004.
- [157] N. Pham, A. Morrison, J. Schwock, S. Aviel-Ronen, V. Iakovlev, Tsao M., J. Ho, and D. Hedley. Quantitative image analysis of immunohistochemical stains using a cmyk color model. *Diagnostic Pathology*, 2 :8, 2007.
- [158] M. R. Quillian. *Semantic memory*. 1968.
- [159] David A. Randell and Anthony G. Cohn. Modelling topological and metrical properties in physical processes. In *KR*, pages 357–368, 1989.
- [160] S. P. Raya. Low-level segmentation of 3-d magnetic resonance brain images : a rule-based system. In *IEEE Trans. Med. Imag.*, pages 327–337, 1990.
- [161] A. Rector, S. Bechhofer, C. Goble, I. Horrocks, W. Nowlan, and W. Solomon. The grail concept modelling language for medical terminology. *Artificial Intelligence in Medicine*, 9 :139–171, 1997.
- [162] A.L. Rector. Compositional models of medical concepts : Towards re-usable application-independent medical terminologies. In *Proceedings of EPISTOL*, 1993.
- [163] A.L. Rector, P.D. Johnson, S. Tu, C. Wroe, and J. Rogers. Interface of inference models with concept and medical record models. In S Quaglini, P Barahona, and S Andreassen, editors, *Proceedings of the Artificial Intelligence in Medicine in Europe 2001 symposium*, LNCS 2101, pages 314–323, 2001.
- [164] A.L. Rector, J.E. Rogers, and P.M. Pole. The GALEN high level ontology. In *Medical Informatics in Europe*, pages 174–178, 1996.
- [165] A.L. Rector, P.E. Zanstra, W.D. Solomon, J.E. Rogers, R. Baud, W. Ceusters, W. Claassen, J. Kirby, J.M. Rodrigues, A. Rossi-Mori, van der Haring E.J., and J. Wagner. Reconciling users’ needs and formal requirements : Issues in developing a re-usable ontology for medicine. *IEEE Transactions on Information Technology in Medicine*, 1998.
- [166] Alan Rector and W. Nowlan. The galen project, 1993.
- [167] Denis Rivière, Jean-Francois Mangin, Dimitri Papadopoulos-Orfanos, Jean-Marc Martinez, Vincent Frouin, and Jean Régis. Automatic recognition of cortical sulci using a congregation of neural networks. In *MICCAI*, pages 40–49, 2000.
- [168] Denis Rivière, Jean francois Mangin, Dimitri Papadopoulos-orfanos, and Jean marc Martinez Vincent. Automatic recognition of cortical sulci of the human brain using a congregation of neural networks, 2002.
- [169] Glynn P. Robinson, Alan C. F. Colchester, and Lewis D. Griffin. Model-based recognition of anatomical objects from medical images. In *IPMI '93 : Proceedings of the 13th International Conference on Information Processing in Medical Imaging*, pages 197–211, London, UK, 1993. Springer-Verlag.

- [170] P.E. Roland, C.J. Graufelds, J. Wåhlin, L. Ingelman, M. Andersson, A. Ledberg, J. Pedersen, S. Åkerman, A. Dabringhaus, and K. Zilles. Human brain atlas : For high-resolution functional and anatomical mapping. *Human Brain Mapping*, 1 :173–184, 1994.
- [171] Riccardo Rosati. On the decidability and complexity of integrating ontologies and rules. *J. Web Sem.*, 3(1) :61–73, 2005.
- [172] Riccardo Rosati. Integrating ontologies and rules : Semantic and computational issues. In *Reasoning Web*, pages 128–151, 2006.
- [173] Cornelius Rosse and Jr. José L. V. Mejino. A reference ontology for biomedical informatics : the foundational model of anatomy. *J. of Biomedical Informatics*, 36(6) :478–500, 2003.
- [174] Cornelius Rosse, Linda Shapiro, and James F Brinkley. The Digital Anatomist Foundational Model : Principles for defining and structuring its concept domain. In *American Medical Informatics Association Fall Symposium*, pages 820–824, 1998.
- [175] D. Rubin, P. Mongkolwat, V. Kleper, K. Supekar, and D. Channin. Medical imaging on the semantic web : Annotation and image markup. In *AAAI Spring Symposium Series, Semantic Scientific Knowledge Integration*, 2008.
- [176] D.L. Rubin, C. Rodriguez, P. Shah, and C. Beaulieu. ipad : Semantic annotation and markup of radiological images. *AMIA*, pages 626–630, 2008.
- [177] A. Ruttenberg, T. Clark, W. Bug, M. Samwald, O. Bodenreider, H. Chen, D. Doherty, K. Forsberg, Y. Gao, V. Kashyap, J. Kinoshita, J. Luciano, M.S. Marshall, C. Ogbuji, J. Rees, S. Stephens, G.T. Wong, E. Wu, D. Zaccagnini, T. Hongsermeier, E. Neumann, I. Herman, and K.H. Cheung. Advancing translational research with the Semantic Web. *BMC Bioinformatics*, 8(Suppl 3) :S2, 2007.
- [178] C. Saathoff. Constraint reasoning for region-based image labelling. *Visual Information Engineering, 2006. VIE 2006. IET International Conference on*, pages 138–143, Sept. 2006.
- [179] G. Schaltenbrand and W. Wahren. *Atlas for stereotaxy of the human brain*. Thieme, Stuttgart, 1977.
- [180] J. Schlaier, P. Schoedel, M. Lange, J. Winkler, J. Warnat, U. Dorenbeck, and A. Brawanski. Reliability of atlas-derived coordinates in deep brain stimulation. *Acta Neurochir (Wien)*, 147(11) :1175–80, 2005.
- [181] Schmidt-Schaub and G. Smolka. Attributive Concept Descriptions with Complements. In *Artificial Intelligence Journal*, pages 1–26, 1991.
- [182] S. Schulz. Bidirectional mereological reasoning in anatomical knowledge bases. *AMIA Symp*, pages 607–611, 2001.
- [183] Stefan Schulz and Udo Hahn. Part-whole representation and reasoning in formal biomedical ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*, 34(3) :179–200, 2005.

- [184] Stefan Schulz, Anand Kumar, and Thomas Bittner. Biomedical ontologies : what part-of is and isn't. *J. of Biomedical Informatics*, 39(3) :350–361, 2006.
- [185] M. Shin, J. P. Lefaucheur, M. F. Penholate, P. Brugières, J. M. Gurruchaga, and J. P. Nguyen. Subthalamic nucleus stimulation in parkinson's disease : Postoperative ct-mri fusion images confirm accuracy of electrode placement using intraoperative multi-unit recording. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 37(6) :457–466, 2007.
- [186] C. Shiuh-Yung, L. Wei-Chung, and C. Chin-Tu. An expert vision system for medical image segmentation. In *In Proc SPIE Medical Imaging III : Image Processing*, 1989.
- [187] Evren Sirin and Bijan Parsia. Sparql-dl : Sparql query for owl-dl. In Christine Golbreich, Aditya Kalyanpur, and Bijan Parsia, editors, *OWLED*, volume 258 of *CEUR Workshop Proceedings*. CEUR-WS.org, 2007.
- [188] A.W.M. Smeulders, M. Worring, S. Santini, A. Gupta, and R. Jain. Content-based image retrieval at the end of the early years. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(12) :1349–1380, Dec 2000.
- [189] B. Smith, W. Ceusters, B. Klagges, J. Köhler, A. Kumar, J. Lomax, C. Mungall, F. Neuhaus, A. L. Rector, and C. Rosse. Relations in biomedical ontologies. *Genome Biol*, 6(5), 2005.
- [190] B. Smith and C. Rosse. The role of foundational relations in the alignment of biomedical ontologies. *Stud Health Technol Inform*, 107 :444–8, 2004.
- [191] Barry Smith. *Blackwell Guid to Philosophy of Computing and Information*., chapter Ontology, pages 155–166. Oxford :Blackwell, 2003.
- [192] Barry Smith, Michael Ashburner, Cornelius Rosse, Jonathan Bard, William Bug, Werner Ceusters, Louis J. Goldberg, Karen Eilbeck, Amelia Ireland, Christopher J. Mungall, Neocles Leontis, Philippe Rocca-Serra, Alan Ruttenberg, Susanna-Assunta Sansone, Richard H. Scheuermann, Nigam Shah, Patricia L. Whetzel, and Suzanna Lewis. The obo foundry : coordinated evolution of ontologies to support biomedical data integration. *Nat Biotech*, 25(11) :1251–1255, November 2007.
- [193] M. Sonka, S.K. Tadikonda, and S.M. Collins. Knowledge-based interpretation of mr brain images. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 15(4) :443–452, Aug 1996.
- [194] Giorgos Stoilos and Giorgos B. Stamou. Extending fuzzy description logics for the semantic web. In *OWLED*, 2007.
- [195] Giorgos Stoilos, Giorgos B. Stamou, and Jeff Z. Pan. Classifying fuzzy subsumption in fuzzy-el+. In *Description Logics*, 2008.
- [196] Giorgos Stoilos, Giorgos B. Stamou, Jeff Z. Pan, Nikos Simou, and Vassilis Tzouvaras. Reasoning with the fuzzy description logic f- : Theory, practice and applications. In *URSW (LNCS Vol.)*, pages 262–281, 2008.

- [197] Giorgos Stoilos, Giorgos B. Stamou, Jeff Z. Pan, Vassilis Tzouvaras, and Ian Horrocks. Reasoning with very expressive fuzzy description logics. *J. Artif. Intell. Res. (JAIR)*, 30 :273–320, 2007.
- [198] Rudi Studer, V. Richard Benjamins, and Dieter Fensel. Knowledge engineering : Principles and methods. *Data Knowl. Eng.*, 25(1-2) :161–197, 1998.
- [199] J. Talairach and P. Tournoux. *Co-Planar Stereotactic Atlas of the Human Brain*. Georg Thieme Verlag, 1988.
- [200] J. Talairach and P. Tournoux. *Referentially Oriented Cerebral MRI Anatomy*. Georg Thieme Verlag, 1993.
- [201] J. C. Tamraz and Y. Comair. *Atlas of Regional Anatomy of the Brain Using MRI : With Functional Correlations*. Springer, December 2005.
- [202] L. Temal. *Ontologie de partage de données et d’outils de traitement dans le domaine de la neuroimagerie*. 2008.
- [203] L. Temal, M. Dojat, G. Kassel, , and B. Gibaud. Towards an ontology for sharing medical images and regions of interest in neuroimaging. *Journal of Biomedical Informatics*, Volume 41, Issue 5 :766–778, 2008.
- [204] P. Thompson, R. Woods, M. Mega, and A. Toga. Mathematical/computational challenges in creating deformable and probabilistic atlases of the human brain. *Human Brain Mapping*, 9 :81–92, 2000.
- [205] P.M. Thompson, C. Schwartz, R.T. Lin, A.A. Khan, and A.W. Toga. Three-dimensional statistical analysis of sulcal variability in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 16 :4261–4274, 1996.
- [206] Alan Tucholka, Bertrand Thirion, Matthieu Perrot, Philippe Pinel, Jean-Francois Mangin, and Jean-Baptiste Poline. Probabilistic anatomo-functional parcellation of the cortex : How many regions ? In *MICCAI (2)*, pages 399–406, 2008.
- [207] N. Tzourio-Mazoyer, P. Y. Herve, and B. Mazoyer. Neuroanatomy : Tool for functional localization, key to brain organization. *NeuroImage*, 37(4) :1059–1060, October 2007.
- [208] N. Tzourio-Mazoyer, B. Landeau, D. Papathanassiou, F. Crivello, O. Etard, N. Delcroix, B. Mazoyer, and M. Joliot. Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI Single-Subject brain. *Neuroimage*, 15(1)(273-289), 2002.
- [209] J. D. Ullman. *Principles of Database and Knowledge-Base Systems : Volume II : The New Technologies*. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1990.
- [210] Mike Uschold and Michael Grüninger. Ontologies : principles, methods, and applications. *Knowledge Engineering Review*, 11(2) :93–155, 1996.

- [211] D.C. Van Essen and H.A. Drury. Structural and functional analyses of human cerebral cortex using a surface-based atlas. *Journal of Neuroscience*, pages 7079–7102, 1997.
- [212] Gerd Wagner, Adrian Giurca, and Sergey Lukichev. A usable interchange format for rich syntax rules integrating ocl, ruleml and swrl. In Pascal Hitzler, Holger Wache, and Thomas Eiter, editors, *RoW2006 Reasoning on the Web Workshop at WWW2006*, may 2006.
- [213] N. Wang and X. Xu. A method to build ontology. In *HPC '00 : Proceedings of the The Fourth International Conference on High-Performance Computing in the Asia-Pacific Region-Volume 2*, page 672, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [214] Wang Wei and Payam M. Barnaghi. Semantic support for medical image search and retrieval. In *BIEN '07 : Proceedings of the fifth IASTED International Conference*, pages 315–319, Anaheim, CA, USA, 2007. ACTA Press.
- [215] C. Xu and J.L. Prince. Snakes, shapes, and gradient vector flow. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(3) :359–369, 1998.
- [216] J. Yelnik, E. Bardinet, D. Dormont, G. Malandain, S. Ourselin, D. Tandé, C. Karachi, N. Ayache, P. Cornu, and Y. Agid. A three-dimensional, histological and deformable atlas of the human basal ganglia. i. atlas construction based on immunohistochemical and mri data. *NeuroImage*, 37 :618–638, 2007.
- [217] T.A. Yousry, U.D. Schmid, H. Alkadhi, D. Schmidt, A. Peraud, A. Buettner, and P. Winkler. Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. *Brain*, 120 :141–157, 1997.
- [218] Alexander C. Yu. Methods in biomedical ontology. *J. of Biomedical Informatics*, 39(3) :252–266, 2006.
- [219] H. H. Zachmann. Interpretation of cranial mr images using a digital atlas of the human head. In *CAR : Computer Assisted Radiology*, pages 283–288, 1991.
- [220] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3) :338–355, 1965.
- [221] Xiang Sean Zhou, Sonja Zillner, Manuel Moeller, Michael Sintek, Yiqiang Zhan, Arun Krishnan, and Alok Gupta. Semantics and cbir : a medical imaging perspective. In *CIVR '08 : Proceedings of the 2008 international conference on Content-based image and video retrieval*, pages 571–580, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [222] K. Zilles, A. Schleicher, and C et al. Langemann. Quantitative analysis of sulci in the human cerebral cortex : development, regional heterogeneity, gender difference, asymmetry, intersubject variability and cortical architecture. *Human Brain Mapping*, 5 :218–221, 1997.

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du Web Sémantique biomédical et aborde deux problèmes : le premier est relatif à la représentation et le partage de connaissances en neuroanatomie, et le second concerne l'interprétation et l'annotation sémantique des images IRM du cerveau humain. La thèse propose alors une ontologie de l'anatomie sulco-gyrale du cortex cérébral chez l'adulte, ainsi que son utilisation dans un système d'annotation sémantique des structures anatomiques correspondant aux parties de gyri et de sillons, extraites de régions d'intérêt sélectionnées par l'utilisateur sur des images IRM du cerveau.

La construction de l'ontologie s'appuie sur des travaux existants sur la modélisation de connaissances anatomiques du cerveau, ainsi que sur un atlas des sillons. L'ontologie est ensuite formalisée en utilisant les logiques de description, afin d'être réutilisable aussi bien par des êtres humains que par des programmes, et a été représentée en langage OWL afin de faciliter son partage à grande échelle. Certaines connaissances sont modélisées et représentées sous forme de règles SWRL, pour faciliter également leur partage.

La phase d'annotation combine différents types de connaissances et de raisonnements. Le raisonnement visant l'identification des parties de gyri est basé sur une modélisation sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes, qui utilise l'ontologie sulco-gyrale et un atlas des gyri. Celui visant l'identification des parties de sillons consiste en un raisonnement en logiques de description sur l'ontologie étendue avec les règles. Les annotations ainsi produites sont d'une part basées sur l'ontologie sulco-gyrale et d'autre part décrites selon une ontologie existante concernant le partage d'informations relatives aux régions d'intérêt en neuroimagerie. Ces annotations ont alors plusieurs utilités : elles servent comme repères anatomiques pour un neurochirurgien et facilitent la recherche d'images par leur contenu sémantique, leur intégration et leur partage sur le Web.

Mots clefs : ontologie, règles, anatomie, cortex cérébral, imagerie, Web Sémantique, annotation sémantique, logiques de description, raisonnement par contraintes, OWL, SWRL.

Abstract

In the context of the biomedical Semantic Web, this thesis addresses two problems : the first one concerns knowledge modeling and sharing in the neuroimaging domain, and the second one concerns the interpretation and the semantic annotation of human brain anatomical images. Hence, the thesis proposes an ontology of the human adult cerebral cortex, and its use in the semantic annotation of anatomical structures corresponding to parts of gyri and of sulci, extracted from regions of interest selected by the user on brain MRI images.

The ontology is built up on existing works on the knowledge modeling of brain anatomy and an atlas of the brain sulci. Then, it is formalized using description logics, in order to be used by humans as well as programs, and is represented in OWL to facilitate its sharing and its large diffusion. Some knowledge extending the ontology are modelled and represented in the form of SWRL rules, in order to be shared too.

The annotation phase combines different kinds of knowledge and different reasoning techniques. The identification of gyri parts is supported by a constraint satisfaction problem reasoning, which uses the sulco-gyral ontology and an atlas of the gyri. The identification of sulci parts is performed using a description logics reasoning over the ontology extended by rules. The resulting annotations are, from the one hand, based on the sulco-gyral ontology, and from the other hand described according to an existing ontology on information sharing related to regions of interest in neuroimaging. So, they have several utilities : they serve as landmarks for a neurosurgeon during a surgery, they facilitate content-based images retrieval, their integration and their sharing in the Web.

Keywords : ontology, rules, anatomy, cerebral cortex, imagery, Semantic Web, semantic annotation, description logics, constraint reasoning, OWL, SWRL.