



HAL
open science

Contributions à la conception de systèmes de raisonnement à partir de cas

Jean Lieber

► **To cite this version:**

Jean Lieber. Contributions à la conception de systèmes de raisonnement à partir de cas. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2008. tel-00608299

HAL Id: tel-00608299

<https://theses.hal.science/tel-00608299v1>

Submitted on 12 Jul 2011

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.

Contributions à la conception de systèmes de raisonnement à partir de cas

Mémoire

présenté et soutenu publiquement le 8 janvier 2008

pour l'obtention de

**l'habilitation à diriger les recherches de
l'université Henri Poincaré – Nancy 1**
(spécialité informatique)

par

Jean Lieber

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	M. Daniel Kayser, M. Ramon López de Mántaras, M. Henri Prade,	Professeur, Université Paris 13 <i>Profesor de Investigación</i> , CSIC, Barcelone Directeur de recherche CNRS, IRIT, Toulouse
<i>Examineurs :</i>	M. Pierre Bey, M. Jean-Paul Haton, M. Alain Mille, M. Amedeo Napoli,	Directeur de l'hôpital de l'Institut Curie, Paris Professeur, Université H. Poincaré Nancy 1 Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1 Directeur de recherche CNRS, LORIA, Nancy

Résumé

Ce mémoire présente un ensemble de recherches centrées sur la problématique de la conception d'un système de raisonnement à partir de cas (RÀPC), recherches privilégiant les étapes de remémoration d'un cas source similaire au problème cible et d'adaptation de ce cas pour résoudre ce problème. Dans un premier temps, une approche de la remémoration fondée sur une organisation hiérarchique des cas est décrite. Elle comporte trois procédures, les classifications dure, floue et élastique, et est correcte au sens où tout cas mémorisé peut être adapté pour résoudre le problème cible. Cette approche, pour être opérationnelle, s'appuie sur des connaissances pour l'adaptation. Ces connaissances sont étudiées sous trois angles : les approches générales de l'adaptation, l'acquisition de ces connaissances et les « catalogues d'adaptation » réutilisables d'une application du RÀPC à une autre. Enfin, un système de RÀPC étant un système à base de connaissances, sont décrits des travaux pour la gestion de ces connaissances, en particulier pour leur représentation. Ces travaux sont issus pour une grande partie de deux projets : TICCO dans le domaine de la planification de synthèse en chimie organique et KASIMIR dans le domaine de l'aide à la décision en cancérologie.

Mots-clés: raisonnement à partir de cas, adaptation, remémoration, raisonnement par analogie, classification hiérarchique, représentation pour le raisonnement à partir de cas

Abstract

This document presents some researches centered on the issue of the design of a case-based reasoning (CBR) system, particularly of the steps of retrieval of a source case similar to the target problem and of adaptation of this case to solve this problem. First, an approach of retrieval based on the hierarchical organization of cases is described. It is composed of three procedures, the strong, fuzzy and smooth hierarchical classifications, and is correct in the sense that any retrieved case can be adapted to solve the target problem. This approach, in order to be applied, requires some adaptation knowledge. This kind of knowledge is studied under three viewpoints: general approaches of adaptation, adaptation knowledge acquisition and "adaptation catalogs" that are intended to be reusable from a CBR application to another. Finally, since a CBR system is a knowledge-based system, work on management of this kind of knowledge is described, in particular, for its representation. All this work comes for a big part from two projects: TICCO in the domain of synthesis planning in organic chemistry and KASIMIR in the domain of decision support in oncology.

Keywords: case-based reasoning, adaptation, case retrieval, analogical reasoning, hierarchical classification, representation for case-based reasoning

Remerciements

Merci à tous ceux que j'ai envie de remercier et dont la liste ci-dessous n'est qu'un extrait !

Merci à chacun des membres de mon jury pour m'avoir fait le très grand honneur d'y participer. Merci à JEAN-PAUL HATON de l'avoir présidé. Merci à DANIEL KAYSER, RAMON LÓPEZ DE MÁNTARAS et HENRI PRADE pour leurs rapports de présoutenance. Merci à eux, à PIERRE BEY et à ALAIN MILLE d'avoir fait le déplacement. Merci à AMEDEO NAPOLI pour tout !

Merci aux membres des équipes RFIA et Orpailleur de m'avoir supporté (dans le sens qu'il vous plaira d'accorder à ce participe passé) et donc re-merci à JEAN-PAUL et à AMEDEO. Merci en particulier à LAURENT BOUGRAIN, SYLVIE COSTE-MARQUIS, DOMINIQUE FOHR, NICOLAS JAY, YIFAN GONG, FLORENCE LE BER, PIERRE MARQUIS, ODILE MELLA, EMMANUEL NAUER, OLIVIER SIOHAN, LASZLO SZATHMARY et YANNICK TOUSSAINT.

La première étape de mes recherches a été ma thèse qui s'est déroulée dans le cadre du GDR TICCO dirigé par CLAUDE LAURENÇO. Merci Claude ! Et merci à tous ceux du GDR ! En particulier, merci à ANDREAS DIETZ, ROLAND DUCOURNAU, OLIVIER GIEN, PIERRE JAMBAUD, GILBERT LAVIELLE, JEAN-CHARLES RÉGIN et PHILIPPE VISMARA.

MATHIEU D'AQUIN (le chercheur précédemment connu sous le nom d'Øsgür-Gørflutch) fut mon premier étudiant en thèse et je suis très fier de ce qu'il a fait alors et depuis. J'ai également beaucoup de plaisir à travailler avec FADI BADRA et JULIEN COJAN qui sont actuellement en thèse sous ma direction. Je remercie aussi SÉBASTIEN BRACHAIS qui a été ingénieur associé durant deux ans dans Orpailleur et THOMAS MEILENDER qui l'est encore jusqu'à l'automne 2009. Merci également à BENOÎT BRESSON et SANDRINE LAFROGNE d'avoir passé un an (et plus) dans Orpailleur pour leurs séjours de fin d'étude du CNAM et ce qu'ils ont apporté par leur travail. J'ai encadré de nombreux stagiaires, de divers niveaux, et beaucoup ont permis d'avancer. En particulier, je pense à JEAN-CYRUS ANGBO, GRÉGOIRE BOUSSU, JÉRÔME HAQUIN et JULIEN LÉVÊQUE.

Le projet de recherches KASIMIR m'a permis de rencontrer des personnes inoubliables. Je n'oublierai donc pas PIERRE BEY, IVAN CRAKOWSKI, OLIVIER CROISSANT, PIERRE FALZON, HERVÉ GARIN, GILLES HÉRENGT, ISABELLE KLEIN, ANNE LESUR, VANINA MOLLO, FABIEN PALOMARÈS, MARIA RIOS, CATHERINE SAUVAGNAC et d'autres encore, mentionnées dans les paragraphes ci-dessus ou pas. J'espère continuer à travailler avec nombre d'entre vous pendant longtemps encore.

Le projet de recherches TAAABLE n'en est qu'à ses débuts. Néanmoins, je tiens à remercier tous ceux qui y participent activement (la plupart d'entre eux sont cités ailleurs dans cette page).

ALAIN MILLE m'a accueilli dans son équipe, SILEX, pour plusieurs séjours. Re-merci Alain, pas seulement pour ton accueil, mais aussi pour m'avoir consacré une partie de ton emploi du temps de ministre. Et merci à toute l'équipe SILEX pour son accueil. Un énorme merci va à AMÉLIE CORDIER. C'est avec elle que j'ai le plus travaillé lors de ces séjours ; j'apprécie beaucoup cette collaboration et j'espère qu'elle pourra durer longtemps.

Certaines personnes croisées ici ou là m'ont permis (parfois à leur insu ?) de passer des caps et d'avancer dans mes recherches. Pour ne citer que celles que je n'ai pas encore mentionnées ci-dessus et en oubliant, une fois de plus, plein de personnes, il y avait CHRISTIAN BRASSAC, PIERRE-ANTOINE CHAMPIN, SYLVIE DESPRÉS, DIDIER DUBOIS, JÉRÔME EUZENAT, SOPHIE LORIETTE, HERVÉ MIGNOT.

Merci également à mes collègues enseignants. Comme leur liste est trop longue, je ne l'écrirai pas ici.

Je remercie aussi ma famille et mes amis. Si jamais ils tombent sur ce document, ils se reconnaîtront, mais je citerai en particulier les amis suivants : BENOÎT ET CHRISTINE, CHRISTOPHE ET PERRINE, JEAN-CHRISTIAN ET CÉCILE (dont la charmante hospitalité m'a permis, notamment, de rédiger la majeure partie de ce mémoire), JOSÉ-LUIS, LULU ET MAI AN, VINCENT ET ANNIE.

Plein d'enseignants m'ont marqué et je n'ai pas la place pour les citer tous. Je citerai néanmoins MONSIEUR CLÉMENT, MONSIEUR MERCIER, MONSIEUR BENDEL, MONSIEUR HAFFNER, MADAME BARBERO, MONSIEUR MISTLER, MONSIEUR MORANDO et MONSIEUR LHERMITTE.

J'ai évidemment oublié plein de personnes dans ces remerciements. Huit d'entre elles ont été oubliées intentionnellement, afin de ne pas heurter leurs légendaires modesties respectives. Si votre nom n'apparaît pas ci-dessus, c'est sans doute que vous êtes l'une d'entre elles (merci en tout cas de le penser).

Enfin, merci à IRINA d'avoir donné la vie à Clara et à CLARA qui est si pleine de vie et de joie de vivre communicative. Puisse-tu grandir en restant aussi lumineuse.

Table des matières

Avant-propos	1
I Dossier de présentation	3
1 Curriculum vitæ	5
2 Activités scientifiques	7
2.1 Le raisonnement à partir de cas	7
2.2 Recherches dans le cadre du GDR TICCO	7
2.3 Le projet KASIMIR	11
2.4 Travaux théoriques sur le RÀPC	15
2.5 Publications	16
3 Autres activités	23
3.1 Animation de la recherche	23
3.1.1 Encadrements	23
3.1.2 Autres activités d'animation	24
3.2 Responsabilités administratives	24
3.3 Enseignements	25
II Synthèse des recherches	27
4 Introduction	29
5 Le raisonnement à partir de cas : généralités	31
5.1 Le RÀPC : notions de base et notations	31
5.1.1 Objets de base du RÀPC	31
5.1.2 Étapes du RÀPC	32
5.1.3 Connaissances utilisées pour le RÀPC	33

5.2	Le RÀPC dans deux projets : TICCO et KASIMIR	33
5.2.1	TICCO : traitement informatique des connaissances en chimie organique	33
5.2.2	KASIMIR : gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie	34
5.3	Des questions sur le RÀPC	35
5.3.1	Pourquoi implanter un système de RÀPC ?	35
5.3.2	Qu'est-ce qu'un cas ?	36
6	Raisonnement à partir de cas en milieu hiérarchique	39
6.1	La classification dure	39
6.1.1	La relation de généralité entre problèmes	39
6.1.2	Un algorithme de classification dure	41
6.1.3	Cas généralisés et indexation	43
6.2	La classification floue	43
6.2.1	Fuzzification de \sqsupseteq par une mesure de similarité F_{\sqsupseteq}	43
6.2.2	Un algorithme de classification floue	44
6.2.3	Classification floue et α -coupes	45
6.3	La classification élastique	46
6.3.1	Reformulations et chemins de similarité	46
6.3.2	Spécification de la classification élastique	47
6.3.3	Un algorithme de classification élastique	48
6.4	Implantation des classifications dure et élastique dans RÉSYN/RÀPC	48
6.4.1	Représentation et indexation des cas de RÉSYN/RÀPC	49
6.4.2	Reformulations, chemins de similarité et appariement dans RÉSYN/RÀPC	51
7	Travaux sur l'adaptation	53
7.1	Démarches unificatrices de l'adaptation	53
7.1.1	Adaptation et raisonnement par analogie	53
7.1.2	Décompositions de l'adaptation	55
7.1.2.1	Décomposition horizontale et chemins de similarité	55
7.1.2.2	Décompositions verticales	56
7.1.3	Utilisation de cas d'adaptation	58
7.1.4	Autres modèles de l'adaptation	60
7.1.5	L'adaptation conservatrice	62
7.2	L'acquisition de connaissances d'adaptation (ACA)	62
7.2.1	L'ACA auprès d'experts	62
7.2.2	L'ACA semi-automatique : CABAMAKA	64
7.2.3	Vers une ACA mixte	68

7.3	Un catalogue de connaissances d'adaptation	68
7.3.1	Généralisations et spécialisations	69
7.3.2	Connaissances d'adaptation pour la planification à partir de cas	69
7.3.3	Connaissances d'adaptation pour l'aide à la décision à partir de cas	70
7.4	Perspectives	74
8	Gestion des connaissances du système KASIMIR	75
8.1	Acquisition des connaissances	75
8.2	Représentation des connaissances	75
8.2.1	Représentations par objets et logiques de descriptions	76
8.2.2	Représentation floue	79
8.2.3	Intégration du RÀPC dans KASIMIR 4	81
8.2.4	Représentation multi-points de vue et RÀPC	82
8.3	Interrogation des référentiels	85
8.4	Édition et maintenance des connaissances	85
8.5	Diffusion des connaissances	87
8.6	Évolution des connaissances	87
9	Conclusion et perspectives	89
9.1	Conclusion	89
9.2	Perspectives	89
9.2.1	Extraction de connaissances et Web sémantique	90
9.2.2	Représentation des variations à l'intérieur d'une base de connaissances et entre bases de connaissances	90
9.2.3	Raisonnement à partir de cas et aide à la décision	92
9.2.4	Raisonnement à partir de cas et théorie de la révision	92
	Bibliographie	93

Table des figures

6.1	Une hiérarchie de problèmes \mathcal{H}_{pb} .	42
6.2	Illustration de la classification dure.	42
6.3	Un algorithme de classification hiérarchique floue.	44
6.4	Illustration de la classification floue.	46
6.5	Un plan de synthèse.	49
6.6	Spécialisation d'un plan de synthèse	49
6.7	Indexation d'un plan de synthèse.	50
6.8	Recherche d'un chemin de similarité.	51
6.9	Un chemin de similarité de RÉSYN/RÀPC et le chemin de modification correspondant.	52
7.1	Exemple d'adaptation d'un algorithme.	59
7.2	Reformulation (cs, \mathcal{A}_{cs}) (« changement de sexe »).	60
7.3	Un patron d'adaptation.	64
7.4	Un patron pour l'adaptation d'une décision inapplicable.	71
7.5	Un patron pour l'adaptation d'une décision ayant des conséquences néfastes trop importantes.	73
8.1	Un référentiel représenté par un arbre de décision	77
8.2	Une base de connaissances représentant le référentiel de la figure 8.1.	78
8.3	Visualisations de hiérarchies de concepts.	87

Avant-propos

Ce mémoire est constitué de deux parties indépendantes : il est inutile de lire la première pour aborder la seconde.

La première partie est un dossier de présentation de mes activités : elle contient un bref *curriculum vitae* (chapitre 1), un résumé de mes activités de recherches et des activités de recherches que j'ai encadrées associé à une liste de publications (chapitre 2) et une description de mes activités professionnelles (chapitre 3).

La deuxième partie est une synthèse de mes travaux et des travaux que j'ai encadrés, dans le cadre du raisonnement à partir de cas. Elle est constituée de 6 chapitres dont une introduction qui décrit leur articulation.

Première partie

Dossier de présentation

Chapitre 1

Curriculum vitæ

État civil

Jean Lieber
né le 29 février 1968 à Saint-Avold (Moselle)

nationalité française

situation professionnelle maître de conférences (classe normale)
de l'Université Henri Poincaré Nancy 1
en délégation à l'INRIA depuis septembre 2006

adresse professionnelle LORIA, bâtiment B, équipe Orpailleur,
BP 239
54 506 Vandœuvre-lès-Nancy
téléphone (33) 3 83 59 20 86

Formation

1997 doctorat en informatique de l'Université Henri Poincaré Nancy 1 (mention très honorable avec les félicitations du jury)

titre : Raisonnement à partir de cas et classification hiérarchique.
Application à la planification de synthèse en chimie organique

jury :

Claude Laurenço	directeur de recherche au CNRS	(président)
Henri Prade	directeur de recherche au CNRS	(rapporteur)
Manuela Veloso	professeur à CMU, Pittsburgh	(rapporteur)
Adam Cichon	professeur de l'Université H. Poincaré Nancy 1	(rapporteur interne)
Jean-Paul Haton	professeur de l'Université H. Poincaré Nancy 1	(examineur)
Gilbert Lavielle	ingénieur à l'Institut de Recherches Servier	(examineur)
Amedeo Napoli	chargé de recherche au CNRS	(examineur)

1992 DEA d'informatique de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, mention bien

1992 Diplôme d'ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité (Supélec)

1986 Baccalauréat C, mention assez bien

Divers

Anglais lu, écrit et parlé

Chapitre 2

Activités scientifiques

Le domaine central de mes recherches est le raisonnement à partir de cas (RÀPC). Un bref rappel de ce qu'est ce mode de raisonnement est présenté à la section 2.1. Dans le cadre de ma thèse, j'ai participé au projet TICCO, et ai conçu et réalisé un système de planification à partir de cas pour la synthèse en chimie organique (section 2.2). Puis, j'ai piloté, et pilote encore, les recherches et les développements en informatique du projet de recherches KASIMIR dont le domaine d'étude est la gestion des connaissances décisionnelles, avec une application en cancérologie (section 2.3). Ces travaux ont mené à des résultats théoriques sur le RÀPC. D'autres recherches théoriques ont été réalisées en parallèle qui ne sont pas directement issues de ces deux projets. Ils sont résumés à la section 2.4. La section 2.5 reprend la liste de mes publications (mais les références de ce chapitre, comme celles des autres chapitres, renvoient à la bibliographie située en fin du mémoire).

2.1 Le raisonnement à partir de cas

Raisonnement à partir de cas, c'est résoudre un problème, appelé problème cible, noté *cible*, en faisant appel à une base de cas, un cas étant un problème déjà résolu, accompagné de sa solution. Un cas source (*srce*, $Sol(srce)$) est un élément de la base de cas. De façon classique, ce raisonnement est composé d'une *remémoration* (sélection d'un cas source (*srce*, $Sol(srce)$) tel que *srce* et *cible* sont *similaires*) et d'une *adaptation* du cas remémoré dans l'optique de la résolution de *cible*. Mes travaux se situent plus précisément dans ce qui porte le nom anglais de *knowledge-intensive CBR*, à savoir le RÀPC s'appuyant sur des connaissances autres que les cas et sur des raisonnements manipulant ces connaissances. De ce fait, mes travaux ont exploité, et parfois étendu, des travaux sur les systèmes à base de connaissances en-dehors du seul RÀPC.

2.2 Recherches dans le cadre du GDR TICCO

Le groupement de recherche CNRS « Traitement Informatique de la connaissance en chimie organique », créé pour la période 1992-1996 puis pour la période 1997-2000, a été dirigé par Claude Laurenço (directeur de recherche au CNRS, section chimie) et a réuni des chercheurs en chimie et en informatique, et des acteurs de l'industrie pharmaceutique. Il a fait suite à des travaux antérieurs dans le domaine, notamment sur la représentation des structures chimiques dans un cadre de représentation des connaissances par objets [Napoli *et al.*, 1994] qui ont mené au développement du système RÉSYN [Vismara *et al.*, 1992].

C'est dans le cadre du GDR TICCO et dans l'équipe RFIA dirigée par Jean-Paul Haton (au Loria) que j'ai effectué ma thèse [Lieber, 1997], qui était encadrée par Amedeo Napoli et Claude Laurenço. Son

but était de modéliser le raisonnement par analogie effectué par l'expert lors de la synthèse ; en effet, le RÀPC est considéré comme une modélisation informatique du raisonnement par analogie qui est un mode de raisonnement réputé pour être fréquemment utilisé par les experts de la synthèse organique. L'application RÉSYN/RÀPC qui résulte de ce modèle a été implantée à partir de RÉSYN. Pour décrire l'objectif de cette application, nous allons brièvement expliquer ce que sont un problème et une solution dans le cadre de la synthèse organique.

Un problème de synthèse pb s'énonce sous la forme « Comment synthétiser chimiquement M », M étant une molécule donnée. La donnée d'un problème de synthèse pb équivaut donc à la donnée d'une molécule M , laquelle est représentée par un graphe non orienté. Une solution d'un tel problème est un *plan de synthèse* $\text{Sol}(\text{pb})$ de la molécule M , c'est-à-dire un ensemble de réactions chimiques destinées à synthétiser M en partant de produits chimiques disponibles dans le commerce.

La résolution des problèmes de synthèse soulève plusieurs difficultés. La principale est la suivante : il n'est pas possible en pratique, sans passer par l'expérimentation chimique, de déterminer si une réaction — et, *a fortiori*, un plan de synthèse — est chimiquement réalisable. C'est pourquoi RÉSYN/RÀPC se contente de proposer des suggestions de plans de synthèse destinées à l'expert chimiste. Le principe est le suivant : étant donné un problème de synthèse cible, RÉSYN/RÀPC cherche un cas (srce , $\text{Sol}(\text{srce})$) dans la base de cas, où srce est un problème *similaire* à cible et $\text{Sol}(\text{srce})$ un plan de synthèse validé expérimentalement (les cas de la base sont extraits de publications en chimie organique). Puis, RÉSYN/RÀPC adapte la solution $\text{Sol}(\text{srce})$ en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible en prenant en compte les ressemblances et différences entre srce et cible. L'idée est que plus srce et cible se ressemblent, plus la solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible a des chances d'être valide ou, du moins, de constituer une suggestion exploitable pour l'utilisateur.

Une première approche dans un cadre simplifié a été développée durant mon DEA [Lieber, 1992]. Dans [Napoli et Lieber, 1993b] et [Napoli et Lieber, 1993a] sont décrites cette approche et son articulation avec les travaux antérieurs sur la représentation par objets appliquée à la chimie organique.

Mon travail de thèse s'est déroulé en trois temps. Dans un premier temps, le problème a été analysé et les connaissances à utiliser ont été mises en évidence à partir de discussions avec des chimistes et à partir d'une étude bibliographique sur la synthèse organique. Cela a permis notamment de mettre en évidence les connaissances qui interviennent dans la notion complexe de similarité entre problèmes de synthèse. Dans un deuxième temps, RÉSYN/RÀPC a été implanté. Puis, l'approche a été généralisée et c'est l'approche générale que nous allons résumer à présent.

L'approche qui s'est dégagée de l'application RÉSYN/RÀPC se fonde sur deux grands principes : la réification de la similarité (notion de *chemin de similarité*) et l'utilisation de la classification hiérarchique pour la remémoration.

Réification de la similarité. La remémoration a pour objectif de fournir un cas (srce , $\text{Sol}(\text{srce})$) tel que srce est *similaire* à cible, le problème cible. Ce cas est remémoré dans le but d'être adapté. Par conséquent, la notion de similarité est intrinsèquement liée à la capacité du module d'adaptation à fournir une solution à partir du cas source. Notre définition de la similarité entre problèmes découle de ces considérations :

srce est *similaire* à cible — noté $\text{srce} \simeq \text{cible}$ — si toute solution $\text{Sol}(\text{srce})$ de srce peut être *adaptée* en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible.

La relation \simeq dépend donc de la procédure d'adaptation, par conséquent, pour étudier plus en détail la notion de similarité, nous allons détailler cette procédure. L'adaptation est considérée généralement comme une procédure complexe à implanter. Pour cette raison, nous avons décomposé la tâche d'adaptation en tâches simples qu'il ne nous restait plus qu'à composer. Plus précisément, nous avons supposé de façon générale que nous disposions de relations binaires r entre problèmes telles que si $\text{srce} r \text{ cible}$,

alors l'adaptation d'une solution $\text{Sol}(\text{srce})$ de srce se faisait par une *fonction d'adaptation spécifique* \mathcal{A}_r :

$$\mathcal{A}_r(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}) = \text{Sol}(\text{cible}) \quad (2.1)$$

Ainsi, si on arrive à relier le problème srce et le problème cible par une séquence de relations de ce type :

$$\text{srce} = \text{pb}_0 \ r_1 \ \text{pb}_1 \ r_2 \ \text{pb}_2 \ \dots \ \text{pb}_{q-1} \ r_q \ \text{pb}_q = \text{cible} \quad (2.2)$$

alors il est possible d'adapter toute solution $\text{Sol}(\text{srce}) = \text{Sol}(\text{pb}_0)$ de $\text{srce} = \text{pb}_0$ en une solution $\text{Sol}(\text{pb}_q) = \text{Sol}(\text{cible})$ de $\text{pb}_q = \text{cible}$ en appliquant successivement les fonctions d'adaptation spécifiques $\mathcal{A}_{r_1}, \mathcal{A}_{r_2}, \dots, \mathcal{A}_{r_q}$. Le terme (2.2) ci-dessus s'appelle *chemin de similarité* de srce à cible . Un chemin de similarité de srce à cible représente explicitement la similarité des problèmes srce et cible puisque, d'une part, son existence garantit l'adaptabilité de $\text{Sol}(\text{srce})$ en $\text{Sol}(\text{cible})$ et, d'autre part, il indique comment $\text{Sol}(\text{srce})$ doit être adapté pour résoudre cible . Un couple (r, \mathcal{A}_r) est appelé *reformulation* (terme emprunté à [Melis, 1995]). Les reformulations constituent des connaissances d'adaptation.

Afin que le cas remémoré $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ soit tel que $\text{srce} \simeq \text{cible}$, la remémoration consiste à la fois à choisir un cas de la base de cas et à construire un chemin de similarité. Deux algorithmes de remémoration qui se fondent sur ce principe ont été conçus et implantés : la classification dure et la classification élastique.

Remémoration et classification. L'approche de la remémoration présentée ici se fonde sur l'utilisation d'une relation d'ordre \sqsupseteq entre problèmes appelée *relation de généralité entre problèmes* et qui vérifie la propriété suivante :

Si $\text{pb}_1 \sqsupseteq \text{pb}_2$ alors toute solution de pb_1 est une solution de pb_2 .

Dans ces conditions, l'expression

$$\text{srce} \sqsupseteq \text{cible} \quad (2.3)$$

est un chemin de similarité de srce à cible : l'adaptation de $\text{Sol}(\text{srce})$ en $\text{Sol}(\text{cible})$ se fait en posant $\text{Sol}(\text{cible}) = \text{Sol}(\text{srce})$. En pratique, il faut effectuer une *spécialisation* de $\text{Sol}(\text{srce})$ pour obtenir $\text{Sol}(\text{cible})$. La spécialisation est une fonction d'adaptation spécifique notée $\mathcal{A}_{\sqsupseteq}$.

Malheureusement, les cas sources sont souvent issus d'expériences réelles correspondant à un faible niveau de généralité : la relation $\text{srce} \sqsupseteq \text{cible}$ n'est alors que rarement réalisée. Pour pallier cette difficulté, nous introduisons la notion d'index. L'*index* $\text{idx}(\text{srce})$ d'un cas $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ est un problème plus général que srce — $\text{srce} \sqsubseteq \text{idx}(\text{srce})$ — tel que la solution $\text{Sol}(\text{srce})$ de srce est *généralisable* en une solution $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ de $\text{idx}(\text{srce})$. Si, pour un problème cible donné, on trouve un index de cas source $\text{idx}(\text{srce})$ tel que $\text{idx}(\text{srce}) \sqsupseteq \text{cible}$, alors on peut adapter $\text{Sol}(\text{srce})$ en $\text{Sol}(\text{cible})$ en « passant » par la solution $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ de $\text{idx}(\text{srce})$, ce qui correspond au chemin de similarité suivant :

$$\text{srce} \sqsubseteq \text{idx}(\text{srce}) \sqsupseteq \text{cible} \quad (2.4)$$

Plus précisément, l'adaptation se fait par *généralisation* de $\text{Sol}(\text{srce})$ en $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ par $\mathcal{A}_{\sqsubseteq}$ et par *spécialisation* de $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ en $\text{Sol}(\text{cible})$ par $\mathcal{A}_{\sqsupseteq}$. La recherche d'un cas $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ tel que $\text{idx}(\text{srce}) \sqsupseteq \text{cible}$ peut se faire à l'aide d'une hiérarchie pour la relation d'ordre partiel \sqsupseteq , contenant tous les index des cas sources de la base de cas ordonnés par \sqsupseteq . C'est ce processus de remémoration que nous appelons la *classification dure*.

Malheureusement, il peut arriver qu'aucun cas $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ de la base de cas ne vérifie $\text{idx}(\text{srce}) \sqsupseteq \text{cible}$. L'idée est alors de chercher à avoir une approximation de cette relation. C'est ce que nous appelons la *classification élastique*. Plus précisément, cela consiste à chercher un cas source

($\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce})$) et deux *fonctions de déformations* φ et ψ telles que $\varphi(\text{idx}(\text{srce})) \sqsupseteq \psi(\text{cible})$. Ces fonctions de déformations doivent vérifier les deux propriétés suivantes :

- (i) Toute solution $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ de $\text{idx}(\text{srce})$ peut être adaptée en une solution $\text{Sol}(\varphi(\text{idx}(\text{srce})))$ de $\varphi(\text{idx}(\text{srce}))$. On dispose pour cela d'une fonction d'adaptation \mathcal{A}_{φ} .
- (ii) Toute solution $\text{Sol}(\psi(\text{cible}))$ de $\psi(\text{cible})$ peut être adaptée en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible . On dispose pour cela d'une fonction d'adaptation \mathcal{A}_{ψ} .

Dans ces conditions, on a le chemin de similarité suivant qui est caractéristique de la classification élastique :

$$\text{srce} \sqsubseteq \text{idx}(\text{srce}) \xrightarrow{\varphi} \varphi(\text{idx}(\text{srce})) \sqsupseteq \psi(\text{cible}) \xleftarrow{\psi} \text{cible} \quad (2.5)$$

L'adaptation résulte de l'utilisation successive des fonctions d'adaptation $\mathcal{A}_{\sqsubseteq}$, \mathcal{A}_{φ} , $\mathcal{A}_{\sqsupseteq}$ et \mathcal{A}_{ψ} . Les fonctions de déformations φ et ψ sont mises en évidence en utilisant des règles et une recherche dans un espace d'états. Un état de cette recherche est donné par un couple (A, B) de problèmes. L'état initial est $(A, B) = (\text{idx}(\text{srce}), \text{cible})$. À partir d'un état (A, B) sont générés des états de la forme (A', B) et de la forme (A, B') , où A' (resp. B') est obtenu par application d'une règle sur A (resp. sur B). Un état final (A, B) est tel que $A \sqsupseteq B$. Dès qu'un état final (A, B) est mis en évidence, on pose $\varphi(\text{idx}(\text{srce})) = A$ et $\psi(\text{cible}) = B$. Ainsi, on obtient bien la relation $\varphi(\text{idx}(\text{srce})) \sqsupseteq \psi(\text{cible})$ recherchée.

Les articles [Lieber et Napoli, 1996b], [Lieber, 1995] et [Lieber et Napoli, 1996a] présentent RÉSYN/RÀPC, le premier sous l'angle de la classification et les deux autres sous l'angle de l'adaptation. [Lieber et Napoli, 2000] est une version traduite et revue de [Lieber et Napoli, 1996b]. Dans [Lieber et Napoli, 1998a], l'approche du RÀPC de RÉSYN/RÀPC est généralisée sous l'angle des liens forts entre les phases de remémoration et d'adaptation (ce que nous avons appelé les propriétés de correction et de complétude de la remémoration vis-à-vis de l'adaptation). Les articles [Lieber, 1999b] et [Lieber, 2000] présentent l'apport du modèle des chemins de similarité en terme de décomposition d'une adaptation complexe en adaptations « simples ». L'article [Lieber et Napoli, 1999] décrit les apports de la représentation des connaissances par objets pour le RÀPC et, en particulier, pour la planification à partir de cas, suivant l'approche qui s'est dégagée de RÉSYN/RÀPC. L'article [Lieber et Napoli, 1998b] peut être vu comme une version courte de [Lieber et Napoli, 1999]. Les articles [Napoli *et al.*, 1996] et [Curien *et al.*, 1996] présentent une synthèse entre l'approche de RÉSYN/RÀPC et celle de [Koehler, 1994], qui exploite une logique de descriptions pour la remémoration d'un système de planification à partir de cas. Erica Melis, dans ses travaux sur la preuve de théorèmes par analogie, a mis en évidence des notions (notamment, celle de reformulation) similaires à celles introduites pour RÉSYN/RÀPC. Nous avons alors travaillé à une synthèse qui a donné lieu à une publication [Melis *et al.*, 1998]. RÉSYN/RÀPC a été développé dans le langage de programmation et de représentation des connaissances par objets Yafool [Ducournau, 1991]. Plusieurs autres travaux de l'équipe RFIA ont utilisé ce langage. L'article [Chouvet *et al.*, 1996] synthétise l'apport de ce langage à ces travaux.

Applicabilité de l'approche. La classification dure est applicable dès lors qu'il existe une relation \sqsupseteq entre les problèmes du domaine d'application considéré qui vérifie les propriétés énoncées plus haut et qu'il est possible d'associer à un cas $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ un index $\text{idx}(\text{srce})$ qui est un problème plus général que srce pour lequel la solution $\text{Sol}(\text{srce})$ puisse être généralisée en une solution $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ de $\text{idx}(\text{srce})$. Les systèmes classificatoires [Ducournau, 1996], qui comprennent les systèmes de représentation des connaissances par objets [Napoli *et al.*, 1994] et les logiques de descriptions [Baader *et al.*, 2003], forment un cadre bien adapté à cette approche.

La classification élastique est applicable si la classification dure l'est et s'il est possible de mettre en évidence des fonctions de déformations φ et ψ auxquelles sont associées des fonctions d'adaptation spécifiques \mathcal{A}_{φ} et \mathcal{A}_{ψ} .

En résumé : le travail que j'ai réalisé dans le cadre de TICCO a permis de proposer un modèle du RÀPC introduisant les notions de chemin de similarité et de reformulation, pouvant s'appuyer sur une représentation des connaissances « en milieu hiérarchique ».

L'appliquer à d'autres domaines suppose qu'on dispose de connaissances d'adaptation et qu'on est capable de représenter les cas et ces connaissances. Ces problèmes n'ont pas été étudiés de façon générale dans ce projet : la représentation des cas s'appuyait sur un existant et les connaissances d'adaptation utilisées ont été relativement faciles à mettre en évidence pour le système RÉSYN/RÀPC. En revanche, ces problèmes se sont posés dans le cadre du projet KASIMIR.

2.3 Le projet KASIMIR

Le projet de recherches KASIMIR a débuté fin 1997 et se poursuit actuellement. Pour le résumer en quelques mots, il concerne la gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie. Il réunit à l'heure actuelle cinq groupes de partenaires :

- Des chercheurs en informatique de l'équipe Orpailleur du LORIA, à laquelle j'appartiens ;
- Des experts en cancérologie du centre Alexis Vautrin (Vandœuvre-lès-Nancy) ;
- Le bureau et des membres de l'association Oncolor, réseau de santé en cancérologie de la région Lorraine ;
- Des ingénieurs et membres de l'association Hermès, dont l'objet est de coordonner et mutualiser les systèmes d'information des réseaux de santé et de soin lorrains et
- Des chercheurs du laboratoire d'ergonomie du CNAM (Paris).

Je pilote les recherches en informatique de KASIMIR et me suis également beaucoup investi dans l'encadrement des développements informatiques du projet, non seulement de membres d'Orpailleur, mais aussi de stagiaires et d'ingénieur engagés par Oncolor ou Hermès.

Objectifs du projet KASIMIR. En Lorraine, les décisions médicales en cancérologie (diagnostiques, thérapeutiques, de surveillance, etc.), s'appuient sur des *référentiels* et des RCP. Un *référentiel* permet d'associer à un cas médical une recommandation. Il s'appuie sur des documents issus de recherches cliniques. Par exemple, le référentiel du traitement du cancer du sein permet, étant donné un ensemble de conditions sur un patient atteint de ce cancer, de faire une recommandation thérapeutique. Ce référentiel prend en compte la majorité des cas médicaux (60 à 70%, voire moins, d'après les cancérologues impliqués dans KASIMIR), les autres cas étant traités par une RCP (réunion de concertation pluridisciplinaire), qui réunit des experts des disciplines médicales liées à la pathologie (chimiothérapie, chirurgie, radiothérapie, etc.). Ces autres cas concernent des contre-indications thérapeutiques, des problèmes médicaux en plus du cancer (dont les problèmes psychologiques), la proximité à un seuil de décision d'une caractéristique (p. ex., l'âge), le cas des femmes enceintes, le cas des hommes atteints du cancer du sein, etc.

Catherine Sauvagnac a montré que, lors de RCP, des *adaptations* du référentiel étaient effectuées [Sauvagnac, 2000]. Elle a également montré que ces adaptations permettaient de proposer des évolutions du référentiel : à force de prendre en compte un même type de cas particulier, ce cas se généralise et peut être intégré au référentiel, sous réserve de validation de la part d'experts.

Cette recherche en psycho-ergonomie a donné naissance au projet de recherches KASIMIR (à partir de fin 1997) : l'objectif était de voir comment les modèles informatiques pouvaient rendre compte des adaptations et évolutions du référentiel. Cet objectif théorique s'est rapidement doublé d'un objectif pratique : le développement d'outils informatiques permettant d'assister ces prises de décision et, de façon plus large, la gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie, ces connaissances étant constituées à la fois des référentiels et des connaissances pour l'adaptation des référentiels. Le système

KASIMIR rassemble ces outils. Les articles [Lieber *et al.*, 2002], [d'Aquin *et al.*, 2004a] et [d'Aquin *et al.*, 2004b] sont des synthèses sur les développements de ce projet et de ce système, à différents stades de leurs évolutions.

Les problèmes de KASIMIR sont des problèmes de décision : ils représentent des situations pour lesquelles des décisions sont requises. Pour le traitement du cancer du sein, par exemple, un problème décrit une classe de patients atteints de cette pathologie et une solution est une décision thérapeutique. Un référentiel peut être assimilé à une base de cas. En effet, il peut être vu comme un ensemble de règles $situation \rightarrow décision$ correspondant à un problème de décision $srce = situation$ et à une solution de $srce$, $Sol(srce) = décision$. La problématique d'adaptation du référentiel à une situation cible correspond à la remémoration d'un cas $(srce, Sol(srce))$ de la base de cas, suivie de l'adaptation de ce cas en vue de la résolution de cible. Ces cas sources, qui ont le niveau de généralité de règles, sont appelés *ossified cases* dans [Riesbeck et Schank, 1989]. Cela conduit au fait que les cas sources n'ont pas besoin d'être généralisés en index, autrement dit : $idx(srce) = srce$.

Les points suivants ne correspondent pas exactement à un ordre chronologique : bien souvent, les travaux se sont déroulés en parallèle.

Acquisition et représentation des référentiels. Les référentiels sont disponibles sous la forme de documents mêlant textes et organigrammes. Leur acquisition sous forme de bases de connaissances consiste à formaliser les connaissances d'un tel document et à lever, à l'aide d'un expert, certains implicites. Le premier système KASIMIR s'est appuyé sur un système de représentation de connaissances par objets construit pour l'occasion et a intégré le référentiel du traitement du cancer du sein [Bresson et Lieber, 1999; Bresson, 2000]. Au sein de ce système, les problèmes sont représentés par des *concepts* (ou classes) et la relation de généralité entre problèmes correspond à la relation de *subsumption* entre classes. Il a été étendu en KASIMIR 2 (stockage des référentiels dans un format XML) et le référentiel pour le diagnostic et le traitement du cancer de la prostate a été développé [Boisson, 2000].

Puis, KASIMIR 3 a été développé en reprenant la conception du code, pour aller vers plus de généralité et de modularité, et pour avoir une interface utilisateur plus conviviale que celle de KASIMIR 2 (interface auto-générée et personnalisable à partir d'un référentiel).

Il devenait fastidieux d'éditer les référentiels par l'édition de fichiers XML. L'adaptation du système Protégé [Noy *et al.*, 2000] à KASIMIR 3 a permis d'éditer les référentiels grâce à son interface graphique conçue dans ce but. Dans l'infrastructure de Protégé ont été développés des outils de maintenance des connaissances : des outils de tests de cohérence (grâce à un interfaçage avec le moteur d'inférences de KASIMIR 3), des modules de visualisation de hiérarchies et un module pour comparer visuellement deux versions d'un même référentiel [d'Aquin *et al.*, 2004a; d'Aquin *et al.*, 2005a].

Acquisition de connaissances d'adaptation (ACA). Le RÀPC dans KASIMIR a d'abord été étudié de façon globale. L'idée était de voir comment l'approche de RÉSYN/RÀPC pouvait être réutilisée pour KASIMIR [Bresson et Lieber, 2000; Lieber et Bresson, 2000]. Puis, l'ACA a pris progressivement de l'importance dans le projet.

L'ACA est une problématique de recherche encore peu explorée dans la littérature du RÀPC. Dans [Lieber *et al.*, 2004], une étude bibliographique des quelques travaux que nous avons trouvés qui relèvent de l'ACA est présentée. On peut distinguer trois types d'approches : l'ACA auprès d'experts, l'ACA semi-automatique et l'ACA mixte.

L'ACA auprès d'experts consiste à modéliser un processus d'adaptation particulier qui a été effectué par des experts. Ces derniers doivent valider le modèle en question. De ce modèle sont extraits des « patrons d'adaptation » qui ont l'avantage d'être intelligibles — des explications y sont rattachées — et l'inconvénient d'être difficilement opérationnalisables. Plusieurs ACA auprès d'experts ont été menées

dans le cadre du projet KASIMIR [Lieber *et al.*, 2001; Lieber *et al.*, 2003; Mollo, 2004b] et ont conduit à de tels patrons [d'Aquin *et al.*, 2006b]. Elles ont conduit à proposer des éléments méthodologiques pour l'ACA auprès d'experts s'appuyant notamment sur la notion de chemin de similarité. Elles ont permis de mettre en évidence un problème lié aux seuils de décision (voir plus loin, paragraphe sur le flou). Elles ont aussi permis de mettre en évidence l'utilisation d'une stratégie de décision, le critère pessimiste de Wald, en cas d'informations manquantes sur le problème de décision cible [d'Aquin *et al.*, 2005c]. L'article [Lieber *et al.*, 2007] met en évidence les problèmes de représentation des connaissances soulevés par cette ACA auprès d'experts ainsi que l'ensemble des travaux que nous avons menés pour répondre à ces besoins.

L'ACA semi-automatique étudiée dans le cadre du projet KASIMIR s'appuie sur des principes d'extraction de connaissances dans des bases de données (ECBD) et de fouille de données [Han et Kamber, 2001]. L'idée générale est de considérer les variations à l'intérieur d'un même référentiel et de généraliser ces variations en règles d'adaptation. Dans [d'Aquin *et al.*, 2004d] est présentée une proposition d'approche pour l'ACA semi-automatique s'appuyant sur l'extraction de motifs fermés fréquents, qui est une technique de fouille de données. Le système CABAMAKA (*Case base mining for adaptation knowledge acquisition*) a été développé [Haquin, 2004; Lafrogne, 2006; d'Aquin *et al.*, 2007a; Badra et Lieber, 2007a] et est utilisé et amélioré par Fadi Badra, en thèse depuis octobre 2005. Les règles d'adaptation extraites constituent des connaissances d'adaptation opérationnalisables au sein du système KASIMIR, mais elles ont le défaut d'être difficilement intelligibles, ce qui les rend en pratique peu exploitables : une adaptation qui n'est pas assortie d'une explication est rarement convaincante.

L'ACA mixte est une perspective de recherches pour KASIMIR. Elle aura pour objectif d'allier ACA auprès d'experts et ACA semi-automatique afin d'obtenir des connaissances d'adaptation à la fois opérationnelles et intelligibles. Pour ce faire, on peut penser à représenter des patrons d'adaptation issus de l'ACA auprès d'experts et à s'en servir à la fois comme filtres des règles d'adaptation et comme un moyen de leur associer des explications. Cela doit être effectué en interaction avec des experts du domaine, ce qui aura le double mérite de valider les résultats et de les généraliser. Cela supposera donc la mise en place d'un dispositif pour faciliter cette interactivité.

Avec les psycho-ergonomes du CNAM et les experts du centre Alexis Vautrin, partenaires de KASIMIR, nous menons cette recherche sur l'ACA dans le cadre d'un projet du programme interdisciplinaire TCAN du CNRS [TCAN (Traitement des connaissances, apprentissage et NTIC), 2005].

Représentation du flou. Les classes de patients du référentiel sont souvent définies à partir de seuils numériques (pour l'âge, la taille de la tumeur, etc.). Il y a discontinuité de la décision au niveau de ces seuils, ce qui peut poser problème. Par exemple, pour un seuil de 70 ans et une patiente de 71 ans en bonne forme physique (mis à part son cancer), vaut-il mieux recommander la décision thérapeutique $d_{c>70}$ associée à la condition $\text{âge} > 70$ ou la décision thérapeutique $d_{c\leq 70}$ associée à la condition $\text{âge} \leq 70$? La solution implantée dans KASIMIR a consisté à introduire des seuils flous : la condition $\text{âge} \leq 70$ a été remplacée par une condition floue (de valeurs de vérité 1 pour $\text{âge} \leq 65$, 0 pour $\text{âge} \geq 75$ et $(75 - \text{âge})/10$ sinon), la condition $\text{âge} > 70$ a été remplacée par la négation de la condition floue précédente (pour l'opérateur de négation $n : v \mapsto 1 - v$). Ainsi, pour la patiente de 71 ans, les deux décisions $d_{c>70}$ et $d_{c\leq 70}$ sont proposées, avec une préférence pour la première (correspondant à un degré de vérité plus élevé).

Ce travail a été implanté dans l'architecture de KASIMIR 3 [Lévêque, 2001], ce qui a nécessité une extension de la représentation des concepts intégrant des conditions floues aux valeurs seuils (« concepts flous », s'interprétant comme des ensembles flous), une définition du degré de subsomption entre concepts flous et un algorithme de classification hiérarchique floue. C'est ce dernier qui a été publié en premier, dans un article présentant les classifications hiérarchiques dure, floue et élastique [Lieber, 2002b] (tra-

duit en français dans [Lieber, 2003]). Dans [d'Aquin *et al.*, 2004a], le formalisme des concepts flous a été décrit. Ce formalisme a été comparé à des formalismes de logiques de descriptions flous et à des formalismes apparentés dans [d'Aquin *et al.*, 2004e].

Un portail sémantique pour KASIMIR. La thèse de Mathieu d'Aquin [d'Aquin, 2005] se situe dans le cadre du projet KASIMIR et concerne plus particulièrement la construction d'un portail sémantique pour la gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie. Un portail sémantique est un portail du Web sémantique destiné à la diffusion de connaissances et de services pour une communauté particulière [Fensel *et al.*, 2003]. Il a pour but de fournir un accès intelligent aux connaissances décisionnelles en cancérologie pour des médecins géographiquement distribués.

Un des intérêts de ce travail est que les techniques et les outils développés au sein de la communauté du Web sémantique fournissent un cadre intérateur pour le système KASIMIR. Inclure le système KASIMIR au sein d'une architecture de portail sémantique fournit en effet un environnement à la fois distribué et standardisé — ce qui facilite son interopérabilité avec d'autres systèmes — pour la gestion de connaissances en cancérologie [d'Aquin *et al.*, 2005a].

Un premier travail a consisté à construire l'équivalent de KASIMIR 3 selon les technologies du Web sémantique [Brachais *et al.*, 2003; d'Aquin *et al.*, 2004c]. Le formalisme sur lequel s'appuie le portail sémantique KASIMIR 4 est OWL DL, la partie de la recommandation OWL du *Word Wide Web Consortium* dont l'expressivité est celle d'une logique de descriptions de type *SHOIN(D)* [Bechhofer *et al.*, 2007]. L'accès aux connaissances est réalisé au travers de services Web jouant le rôle de serveurs de connaissances et implantant les mécanismes de raisonnement associés à OWL DL (subsumption, classification, etc.). EDHIBOU, un éditeur d'instances OWL s'appuyant sur ces services, a été développé pour remplacer l'interface de KASIMIR 3.

Dans un deuxième temps, Mathieu d'Aquin a intégré le modèle des reformulations au sein du formalisme OWL [d'Aquin, 2003], ce qui constitue une amélioration par rapport aux fonctionnalités de KASIMIR 3 : KASIMIR 4 permet d'effectuer des raisonnements à partir de cas. Cela permet au RÀPC de profiter de l'infrastructure du Web sémantique qui se trouve de ce fait enrichi par ce mode de raisonnement.

Lors de son DEA, Mathieu d'Aquin a mené une étude sur la représentation multi-points de vue pour le RÀPC [d'Aquin, 2002; d'Aquin *et al.*, 2002]. Cette étude a été reprise dans un cadre de représentation des connaissances par objets [d'Aquin *et al.*, 2004f; d'Aquin *et al.*, 2007b]. Elle est à présent implantée dans le portail sémantique [d'Aquin *et al.*, 2005b] et s'appuie sur C-OWL, une extension d'OWL destinée à la représentation des « ontologies contextualisées » [Bouquet *et al.*, 2004].

Enfin, le problème de l'intégration des seuils de décision flous dans le portail sémantique KASIMIR 4 (comme c'est le cas pour KASIMIR 3) s'est posé. Une façon relativement simple de réaliser cette intégration est proposée dans [d'Aquin *et al.*, 2006c; d'Aquin *et al.*, 2006a].

Perspectives de recherche pour KASIMIR. Les travaux présentés ci-dessus se poursuivent actuellement. En particulier, les deux premières perspectives sont l'intégration de nouveaux services dans le portail sémantique KASIMIR 4 et l'étude de l'ACA mixte. Ces deux perspectives doivent converger vers une intégration au sein de la même infrastructure logicielle. À terme, l'objectif est d'avoir un seul système (avec des services distribués) permettant la manipulation de connaissances (ontologies, cas, etc.) à travers des services de raisonnements, et la manipulation de données, notamment à travers des services de fouille et d'ECBD. La place, au sein d'un tel système, des opérateurs humains, informaticiens et experts, considérés plus comme des pilotes que comme des utilisateurs passifs, doit être soigneusement étudiée.

Une autre perspective est l'étude de l'aide à la décision à partir de cas (ADÀPC), ou « Comment tirer profit des travaux en théorie de la décision pour l'ADÀPC ? » En effet, il est apparu lors de travaux

récents dans le cadre du projet KASIMIR (cf. [d'Aquin *et al.*, 2005c]), que les résultats en théorie de la décision doivent être profitables au RÀPC dans KASIMIR.

Une (provisoirement) dernière perspective, est l'étude de la représentation des variations entre connaissances. Cela peut servir pour les variations au sein d'une même base de connaissances (par exemple, une base de cas), ou entre deux bases de connaissances. Ce travail doit tirer profit des travaux en RÀPC : l'appariement entre problèmes et l'adaptation des solutions constituent deux types de variations. Il peut avoir des retombées pour l'ACA semi-automatique (pour exprimer une variation de façon plus fine que ce qui existe actuellement dans CABAMAKA), pour exprimer la différence entre deux versions d'une base de connaissances et enfin, pour exprimer le résultat d'un alignement d'ontologies.

En résumé : le travail sur le RÀPC dans le cadre de KASIMIR s'appuie sur l'acquis de RÉSYN/RÀPC et le complète par l'étude des problématiques de l'acquisition et de la représentation des connaissances pour le RÀPC, en lien avec d'autres domaines des systèmes à base de connaissances (représentation floue, gestion de connaissances, Web sémantique).

Une différence entre ces deux projets, de mon point de vue, était ma situation : dans KASIMIR, j'ai un rôle d'encadrement et d'animation (liens entre les partenaires, organisation, etc.) que je n'avais pas dans le cadre de TICCO.

2.4 Travaux théoriques sur le RÀPC

Mon travail de DEA avait pour objectif l'étude du RÀPC, de façon générale et a constitué une étude bibliographique de ce domaine de recherche [Lieber, 1992].

L'article [Lieber, 1994] décrit un travail théorique proposant un critère de comparaison de deux bases de cas. Ce critère peut être utilisé par exemple, étant donné une base de cas, pour choisir quel nouveau cas y intégrer.

Un travail avec Pierre Marquis (alors, maître de conférences à l'Université Nancy 2) a permis de proposer une relation de similarité entre problèmes pour le RÀPC, relation qui est paramétrée à la fois par une théorie du domaine et par un « thème d'intérêt » qui correspond à l'angle sous lequel la similarité entre deux problèmes doit être considérée. Cette relation est définie dans un formalisme de logique propositionnelle [Lieber et Marquis, 1996].

Des modèles ont été proposés parallèlement dans Orpailleur et dans l'équipe dirigée par Alain Mille (professeur des Universités, au LIRIS à l'Université Claude Bernard Lyon 1). Une collaboration s'est engagée avec Alain Mille et Béatrice Fuchs (maître de conférences à l'Université Lyon 3, LIRIS), pour confronter ces modèles de l'adaptation et les enrichir par nos expériences respectives [Fuchs *et al.*, 1999a; Fuchs *et al.*, 1999b]. Ce travail a conduit à un premier modèle qui s'appuie sur deux idées principales. La première est le fait de considérer un cas comme un chemin dans un espace de recherches, ce qui permet de bénéficier des recherches en planification à partir de cas. La deuxième est de décomposer la relation entre le problème à résoudre et le problème dont on connaît une solution, de façon à décomposer la tâche complexe de l'adaptation en sous-tâches plus simples. Dans la continuité de ces recherches, une stratégie d'adaptation a été proposée dans [Fuchs *et al.*, 2000], article traduit en français dans [Fuchs *et al.*, 2001]. Elle s'appuie sur les notions d'appariement entre problèmes et de dépendances entre un problème et la solution qui lui est associée. Bien que cette stratégie repose sur une représentation très simple des problèmes et des solutions (par des n -uplets de réels), elle peut se généraliser à des représentations plus complexes. L'étude de telles généralisations dans une double optique théorique et applicative constitue une perspective de cette collaboration.

Nous avons proposé récemment une autre approche de l'adaptation, appelée l'*adaptation conservatrice* [Lieber, 2006; Lieber, 2007c]. Cette approche de l'adaptation rend compte des adaptations qui

consistent à garder le maximum du cas source tout en étant cohérent à la fois avec le contexte du problème cible et les connaissances du domaine. Cela recouvre par exemple, dans le cadre de KASIMIR, une partie au moins des adaptations en cas de contre-indications.

Des travaux théoriques en cours avec Amélie Cordier (doctorante au LIRIS), Béatrice Fuchs et Alain Mille ont pour objet l'acquisition interactive des connaissances d'un système de RÀPC (connaissances du domaine, connaissances d'adaptation et cas). Deux prototypes ont été développés qui s'appuient sur des échecs de l'adaptation :

- FRAKAS, pour l'acquisition des connaissances du domaine, suite à un échec d'une adaptation conservatrice [Cordier *et al.*, 2007a; Cordier *et al.*, 2007c; Cordier *et al.*, 2007e];
- KAYAK, pour l'acquisition de connaissances d'adaptation et de cas [Cordier *et al.*, 2007b; Cordier *et al.*, 2007d].

Enfin, les ateliers francophones sur le RÀPC sont souvent pour moi l'occasion d'aborder certains points théoriques en lien avec le domaine [Lieber *et al.*, 2004; Lieber, 2002a; Lieber, 2001; Lieber, 1999a; Lieber et Napoli, 1998c].

2.5 Publications

Remarque. Le *European Workshop on Case-Based Reasoning* — EWCBR — est davantage un colloque qu'un atelier. Il a d'ailleurs été renommé, depuis 2002, *European Conference on Case-Based Reasoning* — ECCBR. C'est pourquoi mes publications à EWBCR sont référencées dans la catégorie « Colloques internationaux avec actes et comité de sélection ».

Thèse

- [1] Lieber (J.). – *Raisonnement à partir de cas et classification hiérarchique. Application à la planification de synthèse en chimie organique.* – Nancy, Thèse d'université, Université Henri Poincaré Nancy 1, 1997. (Soutenue le 10 octobre 1997).

Revue internationale avec comité de sélection

- [1] Lieber (J.), d'Aquin (M.), Badra (F.) et Napoli (A.). – Modeling adaptation of breast cancer treatment decision protocols in the KASIMIR project. *Applied Intelligence (an International Journal)*, 24 pages, devrait paraître en 2007.
- [2] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Adaptation Knowledge Acquisition : a Case Study for Case-Based Decision Support in Oncology. *Computational Intelligence (an International Journal)*, vol. 22, n3/4, 2006, pp. 161–176.
- [3] d'Aquin (M.), Bouthier (C.), Brachais (S.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Knowledge Edition and Maintenance Tools for a Semantic Portal in Oncology. *International Journal of Human Computer Studies*, vol. 62, n5, 2005, pp. 619–638.

Revue nationale avec comité de sélection

- [1] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – La représentation de points de vue dans le système d'aide à la décision en cancérologie KASIMIR. *l'Objet*, vol. 13, n2-3, 2007, pp. 143–175.
- [2] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Raisonnement à partir de cas et résolution de problèmes dans une représentation par objets. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 13, 1999, pp. 9–35.

Chapitres de livres

- [1] Lieber (J.). – Introduction. In : *Raisonnement à partir de cas : volume 1 – conception et configuration de produits, volume 2 – surveillance, diagnostic et maintenance* (éditeurs scientifiques : J. Renaud, B. Chebel-Morello, B. Fuchs et J. Lieber), pp. 23–29. – Hermès, Lavoisier, collection IC2 (Information, Commande et Communication), 2007.
- [2] Le Ber (F.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Systèmes à base de connaissances. In : *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information*, éd. par Akoka (J.) et Comyn-Wattiau (I.), pp. 1197–1208. – Vuibert, 2007.
- [3] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Towards a Semantic Portal for Oncology using a Description Logic with Fuzzy Concrete Domains. In : *Fuzzy Logic and the Semantic Web*, éd. par Sanchez (Elie), chap. 19, pp. 379–393. – Elsevier, 2006.
- [4] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Planification à partir de cas et classification. In : *Ingénierie des connaissances – Évolutions récentes et nouveaux défis*, éd. par Charlet (Jean), Zacklad (Manuel), Kassel (Gilles) et Bourigault (Didier), pp. 357–369. – Eyrolles, 2000. Le livre dans lequel est paru cet article est un recueil d'articles paru dans les actes des conférences IC (ingénierie des connaissances). En particulier, cet article est également paru dans les actes de la conférence IC-97.

Colloques internationaux avec actes et comité de sélection

- [1] Lieber (J.). – Application of the Revision Theory to Adaptation in Case-Based Reasoning : the Conservative Adaptation. In : *Proceedings of the 7th International Conference on Case-Based Reasoning* (à paraître). – Belfast, Springer, août, 2007.
- [2] Cordier (A.), Fuchs (B.), Lieber (J.) et Mille (A.). – Failure Analysis for Domain Knowledge Acquisition in a Knowledge-Intensive CBR System. In : *Proceedings of the 7th International Conference on Case-Based Reasoning*. – Belfast, août, 15 pages, 2007.
- [3] d'Aquin (M.), Badra (F.), Lafrogne (S.), Lieber (J.), Napoli (A.) et Szathmary (L.). – Case Base Mining for Adaptation Knowledge Acquisition. In : *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)*, éd. par Veloso (M. M.). pp. 750–755. – Morgan Kaufmann, Inc., 2007.
- [4] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Case-Based Reasoning within Semantic Web Technologies. In : *Twelfth International Conference on Artificial Intelligence : Methodology, Systems, Applications (AIMSA-06)*. pp. 190–200. – Springer, 2006.
- [5] d'Aquin (M.), Badra (F.), Lafrogne (S.), Lieber (J.), Napoli (A.) et Szathmary (L.). – Adaptation Knowledge Discovery from a Case Base. In : *Proceedings of the 17th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-06), Trento*, éd. par Brewka (G.). pp. 795–796. – IOS Press, 2006.
- [6] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Decentralized Case-Based Reasoning for the Semantic Web. In : *Proceedings of the 4th International Semantic Web Conference (ISWC 2005)*, éd. par Gil (Yolanda) et Motta (Enrico). pp. 142–155. – Springer, November 2005.
- [7] d'Aquin (M.), Brachais (S.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Decision Support and Knowledge Management in Oncology using Hierarchical Classification. In : *Proceedings of the Symposium on Computerized Guidelines and Protocols (CGP-2004)*, éd. par Kaiser (K.), Miksch (S.) et Tu (S. W.). pp. 16–30. – IOS Press, 2004.
- [8] Lieber (J.), d'Aquin (M.), Bey (P.), Napoli (A.), Rios (M.) et Sauvagnac (C.). – Acquisition of Adaptation Knowledge for Breast Cancer Treatment Decision Support. In : *9th Conference on Artificial Intelligence in Medicine in Europe 2003 - AIME 2003, Protaras, Chypre*, éd. par Dojat (M.), Keravnou (E.) et Barahona (P.), pp. 304–313. – Oct 2003.

- [9] Lieber (J.). – Strong, Fuzzy and Smooth Hierarchical Classification for Case-Based Problem Solving. *In : Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-02), Lyon, France*, éd. par van Harmelen (F.). pp. 81–85. – IOS Press, Amsterdam, 2002.
- [10] Fuchs (B.), Lieber (J.), Mille (A.) et Napoli (A.). – An Algorithm for Adaptation in Case-Based Reasoning. *In : Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000), Berlin, Germany*, pp. 45–49. – 2000.
- [11] Lieber (J.) et Bresson (B.). – Case-Based Reasoning for Breast Cancer Treatment Decision Helping. *In : Advances in Case-Based Reasoning — Proceedings of the fifth European Workshop on Case-Based Reasoning (EWCBR-2k)*, éd. par Blanzieri (E.) et Portinale (L.), pp. 173–185. – Springer, 2000.
- [12] Fuchs (B.), Lieber (J.), Mille (A.) et Napoli (A.). – Towards a Unified Theory of Adaptation in Case-Based Reasoning. *In : Case-Based Reasoning Research and Development — Third International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR-99)*, éd. par Althoff (K.-D.), Bergmann (R.) et Branting (L. K.). pp. 104–117. – Springer, Berlin, 1999.
- [13] Melis (E.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Reformulation in Case-Based Reasoning. *In : Fourth European Workshop on Case-Based Reasoning, EWCBR-98*, éd. par Smyth (B.) et Cunningham (P.). pp. 172–183. – Springer, 1998.
- [14] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Correct and Complete Retrieval for Case-Based Problem-Solving. *In : Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-98), Brighton, United Kingdom*, éd. par Prade (Henri), pp. 68–72. – 1998.
- [15] Napoli (A.), Lieber (J.) et Curien (R.). – Classification-Based Problem-Solving in Case-Based Reasoning. *In : Advances in Case-Based Reasoning – Third European Workshop, EWCBR'96*, éd. par Smith (I.) et Faltings (B.). pp. 295–308. – Springer, Berlin, 1996.
- [16] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Using Classification in Case-Based Planning. *In : Proceedings of the 12th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'96), Budapest, Hungary*, éd. par Wahlster (W.). pp. 132–136. – John Wiley & Sons, Ltd., 1996.
- [17] Lieber (J.) et Marquis (P.). – Domain-Independent Similarity Relations for Case-Based Reasoning in a Logical Framework. *In : Proceedings of the Poster Session of the Ninth International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems (ISMIS'96), Zakopane (Poland), 9-13 June*. pp. 230–241. – Oak Ridge National Laboratory, 1996.
- [18] Lieber (J.). – A Criterion of Comparison between Two Case Bases. *In : Advances in Case-Based Reasoning – Second European Workshop, EWCBR'94*, éd. par Haton (J.-P.), Keane (M.) et Manago (M.). pp. 87–100. – Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [19] Napoli (A.) et Lieber (J.). – A First Study on Case-Based Planning in Organic Synthesis. *In : Topics in Case-Based Reasoning – First European Workshop (EWCBR'93), Kaiserslautern*, éd. par Wess (S.), Althoff (K.-D.) et Richter (M.M.), pp. 458–469. – Springer Verlag, Berlin, 1994.

Colloques nationaux avec actes et comité de sélection

- [1] Lieber (J.). – Application de la théorie de la révision à l'adaptation en raisonnement à partir de cas : l'adaptation conservatrice. *In : Actes des quatrième journées francophones sur les modèles formels de l'interaction*, pp. 201–213. – 2007.
- [2] Badra (F.) et Lieber (J.). – Extraction de connaissances d'adaptation par l'analyse de la base de cas. *In : Extraction et gestion des connaissances (EGC'2007), Actes des septième journées Extraction et Gestion des Connaissances, Namur, Belgique, 23-26 janvier 2007, 2 Volumes*, pp. 751–760. – 2007.

- [3] d'Aquin (M.), Cojan (J.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Vers l'implantation d'un moteur d'inférences pour une logique de descriptions avec domaine concret flou. *In : Actes des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA-06)*, pp. 129–135. – 2006.
- [4] d'Aquin (M.), Brachais (S.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Kasimir : gestion de connaissances décisionnelles en cancérologie. *In : Modélisation et pilotage des systèmes de Connaissances et de Compétences dans les Entreprises Industrielles - C2EI'04, Nancy, France*, éd. par Caillaud (Emmanuel), Lombard (Muriel) et Renaud (Jean). – Dec 2004.
- [5] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Étude de quelques logiques de descriptions floues et de formalismes apparentés. *In : Actes des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA-04)*, éd. par Montmain (Jacky). pp. 255–262. – CEPADUES-Éditions, Toulouse, 2004.
- [6] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Représentation de points de vue pour le raisonnement à partir de cas. *In : Langages et Modèles à Objets - LMO'04, Lille, France, volume 10 de la Revue des Sciences et Technologies de l'Information, RSTI - série L'Objet*, pp. 245–258. – Mars 2004.
- [7] Lieber (J.). – Raisonnement à partir de cas s'appuyant sur les classifications dure, floue et élastique dans une hiérarchie de problèmes. *In : Actes des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA-03)*, éd. par Frélicot (Carl). pp. 99–106. – CEPADUES-Éditions, Toulouse, 2003.
- [8] Lieber (J.), Bey (P.), Boisson (F.), Bresson (B.), Falzon (P.), Lesur (A.), Napoli (A.), Rios (M.) et Sauvagnac (C.). – Acquisition et modélisation de connaissances d'adaptation, une étude pour le traitement du cancer du sein. *In : Actes des journées ingénierie des connaissances (IC-2001)*, pp. 409–426. – Grenoble, 2001.
- [9] Bresson (B.) et Lieber (J.). – Raisonnement à partir de cas pour l'aide au traitement du cancer du sein. *In : Actes des journées ingénierie des connaissances (IC-2000)*, éd. par Aussenac-Gilles (Nathalie), pp. 189–196. – Toulouse, 2000.
- [10] Bresson (B.) et Lieber (J.). – Classification pour l'aide au traitement du cancer du sein. *In : Septième journées de la Société Francophone de Classification, SFC'99*, éd. par Le Ber (F.), Mari (J.-F.), Napoli (A.) et Simon (A.). pp. 53–59. – Nancy, septembre 1999.
- [11] Fuchs (B.), Lieber (J.), Mille (A.) et Napoli (A.). – Vers une théorie unifiée de l'adaptation en raisonnement à partir de cas. *In : Actes des journées ingénierie des connaissances*, pp. 199–207. – 1999.
- [12] Simon (A.), Napoli (A.), Lieber (J.) et Ketterlin (A.). – Aspects de la classification dans un système de représentation des connaissances par objets. *In : Actes des sixièmes rencontres de la Société Francophone de Classification (SFC'98), Montpellier*, éd. par Gascuel (O.) et Caraux (G.). pp. 205–209. – Agro Montpellier, 1998.
- [13] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Représentations par objets et classification pour le raisonnement à partir de cas. *In : 11^{ème} congrès reconnaissance des formes et intelligence artificielle (RFIA'98)*, pp. 345–354. – 1998.
- [14] Chouvet (M.-P.), Le Ber (F.), Lieber (J.), Mangelinck (L.), Napoli (A.) et Simon (A.). – Analyse des besoins en représentation et raisonnement dans une représentation à objets — L'exemple de Y3. *In : Actes du colloque " Langages et Modèles à Objets " (LMO'96), Leysin, Suisse*, éd. par Dennebouy (Y.), pp. 150–169. – 1996.

Articles d'ateliers et de workshops

-
- [1] Cordier (A.), Fuchs (B.), Lieber (J.) et Mille (A.). – On-Line Domain Knowledge Management for Case-Based Medical Recommendation. *In : Proceedings of the 5th workshop on CBR in the Health Sciences.* – Workshop of the seventh International Conference on Case-Based Reasoning Workshop, 2007.
- [2] Badra (F.) et Lieber (J.). – Une approche pour représenter les variations entre cas — Vers une application à l'extraction de connaissances d'adaptation. *In : Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, éd. par Cordier (A.) et Fuchs (B.). pp. 47–56. – Grenoble, 2007.
- [3] Cordier (A.), Fuchs (B.), Lieber (J.) et Mille (A.). – Acquisition de connaissances du domaine d'un système de RÀPC : une approche fondée sur l'analyse interactive des échecs d'adaptation — le système FRAKAS. *In : Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, éd. par Cordier (A.) et Fuchs (B.). pp. 57–70. – Grenoble, 2007.
- [4] Cordier (A.), Fuchs (B.), Lieber (J.) et Mille (A.). – Acquisition interactive des connaissances d'adaptation intégrée aux sessions de raisonnement à partir de cas — Principes, architecture IAKA et prototype KAYAK. *In : Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, éd. par Cordier (A.) et Fuchs (B.). pp. 71–84. – Grenoble, 2007.
- [5] Lieber (J.). – Application de la révision et de la fusion des connaissances à l'adaptation et à la combinaison de cas. *In : Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, éd. par Cordier (A.) et Fuchs (B.). pp. 119–129. – Grenoble, 2007.
- [6] Fuchs (B.), Lieber (J.), Mille (A.) et Napoli (A.). – Une première formalisation de la phase d'élaboration du raisonnement à partir de cas. *In : Actes du quatorzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'06*, éd. par Chebel-Morello (Brigitte). – Besançon, 2006.
- [7] Fuchs (B.), Lieber (J.), Mille (A.) et Napoli (A.). – Réflexions sur la place du RàPC dans trois domaines de recherche actuels. *In : Actes du quatorzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'06*, éd. par Chebel-Morello (Brigitte). – Besançon, 2006.
- [8] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Vers une utilisation du critère pessimiste de Wald pour l'aide à la décision à partir de cas. *In : actes du treizième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'05, plate-forme AFIA.* – 2005.
- [9] d'Aquin (M.), Brachais (S.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Vers une acquisition automatique de connaissances d'adaptation par examen de la base de cas — une approche fondée sur des techniques d'extraction de connaissances dans des bases de données. *In : Actes du douzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'04*, éd. par Kanawati (R.), Salotti (S.) et Zehraoui (F.), pp. 41–52. – 2004.
- [10] Lieber (J.), d'Aquin (M.), Brachais (S.) et Napoli (A.). – Une étude comparative de quelques travaux sur l'acquisition des connaissances d'adaptation pour le raisonnement à partir de cas. *In : Actes du douzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'04*, éd. par Kanawati (R.), Salotti (S.) et Zehraoui (F.), pp. 53–60. – 2004.
- [11] d'Aquin (M.), Brachais (S.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Kasimir : portail sémantique pour la gestion des connaissances en cancérologie. *In : Deuxième séminaire francophone du Web Sémantique Médical — WSM 2004.* – Rouen, France, Mars 2004. www.chu-rouen.fr/l@stics/wsm2004/.
- [12] Brachais (S.), d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Vers un Web sémantique en cancérologie. *In : Première journée Web sémantique médical - WSM'2003, Rennes, France.* Laboratoire d'informatique médicale de Rennes. – mars 2003. [http://videostream.univ-rennes1.fr/sim\(srce,cible\)wsm/](http://videostream.univ-rennes1.fr/sim(srce,cible)wsm/).
- [13] d'Aquin (M.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Représentation multi-points de vue des connaissances pour l'adaptation. *In : actes du X^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Jaulent (Marie-Christine), Le Bozec (Christel) et Zapletal (Éric), pp. 23–31. – 2002.

- [14] Lieber (J.), d'Aquin (M.), Bey (P.), Bresson (B.), Croissant (O.), Falzon (P.), Lesur (A.), Lévêque (J.), Mollo (V.), Napoli (A.), Rios (M.) et Sauvagnac (C.). – The Kasimir Project : Knowledge Management in Cancerology. In : *Proceedings of the 4th International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry (HealthComm 2002)*, pp. 125–127. – 2002.
- [15] Lieber (J.). – Recopier c'est déjà adapter : six types d'adaptation par copie. In : *actes du X^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Jaulent (Marie-Christine), Le Bozec (Christel) et Zapletal (Éric), pp. 11–21. – 2002.
- [16] Lieber (J.). – Des règles, des cas, des généralités, des spécificités, des applications, des adaptations, des chaînes, des combinaisons et des tartes. In : *Actes du IX^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Fuchs (B.) et Mille (A.). – 2001.
- [17] Fuchs (B.), Lieber (J.), Mille (A.) et Napoli (A.). – Un algorithme pour la phase d'adaptation du raisonnement à partir de cas. In : *Actes des journées nationales sur les modèles de raisonnement (JNMR'01)*, Arras, éd. par Herzig (A.), pp. 79–92. – 2001.
- [18] Lieber (J.). – Composition et décomposition de l'adaptation dans le cadre du raisonnement à partir de cas. In : *Acte de la journée sur l'adaptation, INRA de Champenoux*, éd. par Le Ber (F.) et Lieber (J.), pp. 31–36. – 2000.
- [19] Lieber (J.). – La méthode d'Euler vue comme une application du raisonnement à partir de cas. In : *Actes du VII^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Mille (A.) et Trousse (B.). – 1999.
- [20] Lieber (J.). – Reformulations and Adaptation Decomposition. In : *Formalisation of Adaptation in Case-Based Reasoning*, éd. par Lieber (J.), Melis (E.), Mille (A.) et Napoli (A.). – Third International Conference on Case-Based Reasoning Workshop, ICCBR-99 Workshop number 3, S. Schmitt and I. Vollrath (volume editor), LSA, University of Kaiserslautern, 1999.
- [21] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Vers une proposition de définitions des notions d'abstraction et de généralisation dans le cadre du raisonnement à partir de cas appliqué à la résolution de problèmes. In : *Actes du VI^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Malek (M.). – 1998.
- [22] Lieber (J.) et Napoli (A.). – Adaptation of Synthesis Plans in Organic Chemistry. In : *Proceedings of the ECAI'96 Workshop : Adaptation in Case-Based Reasoning*, éd. par Voß, pp. 18–21. – 1996.
- [23] Curien (R.), Lieber (J.) et Napoli (A.). – Une première analyse formelle du raisonnement à partir de cas. In : *Actes du V^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Mille (A.), pp. 6–18. – Lyon, campus de la Doua, avril 1996.
- [24] Lieber (J.). – Une approche de la remémoration guidée par l'adaptabilité pour une application du raisonnement à partir de cas à la synthèse en chimie organique. In : *Actes du IV^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, éd. par Bichindaritz (I.), pp. 79–90. – Université René Descartes (Paris V), 1995.
- [25] Lieber (J.). – *Étude du raisonnement par cas*. – Rapport de Recherche n93-R-043, Centre de Recherche en Informatique de Nancy, 1993.
- [26] Napoli (A.) et Lieber (J.). – Classifying Knowledge for Reusability – An Application to Organic Synthesis Planning. In : *Proceedings of the IJCAI'93 Workshop "Reuse of designs : an interdisciplinary cognitive approach"*, Chambéry, pp. 116–127. – 1993.

Rapports

- [1] Lieber (J.). – *A Definition and a Formalization of Conservative Adaptation for Knowledge-Intensive Case-Based Reasoning – Application to Decision Support in Oncology (A Preliminary Report)*. – Rapport de recherche, LORIA, 2006.
- [2] Lieber (J.). – *Étude du raisonnement par cas*. – Mémoire de DEA d’informatique, Université de Nancy I, 1992.

Actes dont je suis éditeur ou co-éditeur scientifique

- [1] Renaud (J.), Chebel-Morello (B.), Fuchs (B.) et Lieber (J.) (édité par). – *Raisonnement à partir de cas : volume 1 – conception et configuration de produits, volume 2 – surveillance, diagnostic et maintenance*. – Hermès, Lavoisier, collection IC2 (Information, Commande et Communication), 2007.
- [2] Lieber (J.) (édité par). – *Actes de l’atelier « Raisonnement à partir de cas » de la plate-forme AFIA (président : G. Bisson)*. – Laval, 2003.
- [3] Le Ber (F.) et Lieber (J.) (édité par). – *Acte de la journée sur l’adaptation, INRA de Champenoux*. – 2000.
- [4] Lieber (J.), Melis (E.), Mille (A.) et Napoli (A.) (édité par). – *Formalisation of Adaptation in Case-Based Reasoning*. – Third International Conference on Case-Based Reasoning Workshop, ICCBR-99 Workshop number 3, S. Schmitt and I. Vollrath (volume editor), LSA, University of Kaiserslautern, 1999.

Chapitre 3

Autres activités

3.1 Animation de la recherche

3.1.1 Encadrements

Thèses. J'ai encadré avec Amedeo Napoli la thèse de *Mathieu d'Aquin* qui a été soutenue en décembre 2005. Son sujet était la gestion d'un portail sémantique en cancérologie, à savoir un portail développé selon les principes du Web sémantique, dans le cadre du projet KASIMIR. Ce travail de thèse a permis d'allier, au sein du portail sémantique, le RÀPC, la représentation multi-points de vue et la représentation de types de données flous (ce dernier point a été étudié théoriquement mais pas implanté).

J'encadre depuis septembre 2005 la thèse de *Fadi Badra* sur le sujet « Extraction de connaissances à destination du Web sémantique ». Le portail sémantique développé par Mathieu d'Aquin est opérationnel. Pour qu'il vive, il faut l'alimenter en connaissances (en particulier, connaissances de décision ou d'adaptation). Pour cela, on peut travailler avec les experts, mais on peut de façon complémentaire utiliser des outils d'extraction de connaissances supervisés. La mise en place de tels outils constitue le sujet de cette thèse. Fadi Badra travaille à la fois sur le portail KASIMIR et sur CABAMA, outil d'acquisition de connaissances d'adaptation par fouille de la base de cas.

J'encadrerai la thèse de *Julien Cojan*, qui doit commencer en octobre 2007, sur l'application de la théorie de la révision au RÀPC, dans le cadre du projet KASIMIR. Une des difficultés de son travail sera la définition et l'implantation efficace (dans la mesure du possible) d'opérateurs de révision (voire de fusion) dans le cadre formel des logiques de descriptions.

Ingénieur associé de l'INRIA. *Sébastien Brachais* a, d'octobre 2002 à septembre 2004, travaillé sous ma direction, dans le cadre du projet KASIMIR. L'objectif de son travail a été la mise en place d'un éditeur de connaissances pour KASIMIR, s'appuyant sur le système Protégé. Il a aussi mis en place, dans la même infrastructure, des outils pour la maintenance de connaissances (comparaison de deux versions d'un même référentiel, outils de visualisation de hiérarchie, outils de test de cohérence).

« **Mémoires CNAM** ». *Benoît Bresson*, lors de son mémoire CNAM¹ soutenu en février 2001, a développé la première version du système KASIMIR [Bresson, 2000]. Ce travail incluait la modélisation et la représentation du référentiel pour le traitement du cancer du sein.

Sandrine Lafrogne, lors de son mémoire CNAM soutenu en février 2006, a travaillé sur CABAMA (amélioration de l'outil existant, ajout de fonctionnalités).

¹Les mémoires CNAM sont l'équivalent d'un stage d'ingénieur d'une durée de douze mois.

Stages de DEA et de M2R. Le stage de DEA de *Grégoire Boussu* [Boussu, 1998], co-encadré avec Amedeo Napoli, concernait l'*Apprentissage à partir d'échecs*, ou « Comment faire évoluer les connaissances d'un système confronté à un échec ? » Ce travail constitue une des premières études sur KASIMIR : ce qui constitue un échec est l'application directe du référentiel pour les cas hors référentiels (cf. section 2.3).

Les stages de DEA d'*Évariste Kaboré* [Kaboré, 1999] et de *Jean-Luc Metzger* [Metzger, 2000] étaient co-encadrés avec Florence Le Ber et Amedeo Napoli. Tous deux travaillaient dans le cadre de la représentation de structures spatiales agricoles et ont abordé des problématiques de RÀPC dans ce cadre.

Le stage de DEA de *Mathieu d'Aquin* [d'Aquin, 2002] portait sur les problématiques de la représentation des connaissances (en particulier multi-points de vue) pour le raisonnement à partir de cas.

Le stage de M2R de *Matthieu Tixier* [Tixier, 2007] portait sur l'aide à l'interprétation suite à une extraction de connaissances d'adaptation. Plus spécifiquement, Matthieu a étudié une approche pour extraire de l'ensemble des règles d'adaptation candidates une famille génératrice pour la composition de ces règles.

Autres stages et encadrements. Divers stages et projets ont été encadrés, pour le projet KASIMIR. J'ai participé à la conception du sujet et à l'encadrement de deux stages de DESS qui se sont déroulés dans le cadre d'Oncolor : celui de Florian Boisson [Boisson, 2000] et celui de Julien Lévêque [Lévêque, 2001]. *Jérôme Haquin* a implanté la première version du système CABAMA [Haquin, 2004]. *Jean-Cyrus Angbo* a travaillé, pendant l'été 2005, sur l'ajout de domaines concrets dans le moteur d'inférences Pellet. *Julien Cojan* a travaillé sur une extension floue du moteur d'inférences Pellet [Cojan, 2006].

Les projets étaient principalement dans le cadre de projets du DESS informatique de l'Université Henri Poincaré Nancy 1 et d'un projet de deuxième année de l'ESIAL. Ces travaux visaient à des améliorations de différents modules de KASIMIR. En particulier, deux de ces projets (deux années successives) ont contribué au développement d'EDHIBOU, outil d'édition d'instances OWL pour le portail sémantique KASIMIR, dans le cadre de la thèse de Mathieu d'Aquin.

3.1.2 Autres activités d'animation

Lors de la conférence ICCBR de 1999, j'ai organisé, avec Alain Mille, Béatrice Fuchs et Erica Melis, l'atelier « *Formalisation of Adaptation in Case-Based Reasoning* ».

J'ai été membre du comité de programme de l'atelier *From Structured Cases to Unstructured Problem Solving Episodes For Experience-Based Assistance* d'ICCB-03 et de l'atelier *Workshop on CBR in the Health Sciences* d'ICCB-05.

L'atelier francophone sur le RÀPC a lieu annuellement depuis 1993 et réunit les acteurs de la communauté. Depuis 1999, et toutes les années impaires, l'atelier se déroule dans le cadre de la plateforme de l'AFIA. J'ai organisé les ateliers de 1994 et 2003 et ai participé au comité de programme de tous les ateliers RÀPC.

J'ai organisé, avec Marie-Christine Jaulent et Jean Charlet, la journée « Ingénierie des Connaissances et Santé », à Paris, en janvier 2002.

Avec Béatrice Fuchs et Sylvie Salotti, j'ai coordonné un dossier sur le RÀPC, paru dans le bulletin 59 de l'AFIA (juillet 2005).

3.2 Responsabilités administratives

Je suis membre élu de la commission de spécialiste 27^{ème} section de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, depuis septembre 2001 et ai été deuxième vice-président de cette commission de novembre

2004 à juin 2007.

J'ai été membre élu, collègue B, du conseil de l'UFR STMIA de la faculté des sciences et techniques de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, de décembre 2001 à novembre 2005.

3.3 Enseignements

J'ai enseigné dans les trois universités nancéiennes (Université Henri Poincaré Nancy 1, Université Nancy 2 et Institut National Polytechnique de Lorraine) des cours, travaux dirigés et travaux pratiques, dans différents cadres. J'ai fait des vacances de 1993 à 1996, puis deux ATER à mi-temps à l'Université Henri Poincaré. Depuis 1998, j'enseigne dans le cadre de mon poste de maître de conférences qui est à cheval sur deux sections : 27 et 31 (informatique et chimie). Les domaines des enseignements que j'ai effectués sont divers. Depuis 1998, le gros volume de mes enseignements correspond à des cours d'algorithmique et programmation dans les DESS MOIC (méthodes et outils informatiques de la chimie) et CCI (compétences complémentaires en informatique). Dans les deux cas, il s'agit d'enseigner les bases de la programmation à des étudiants niveau DESS ayant en général peu de connaissances préalables en informatique. Aux DESS MOIC, j'enseigne également les bases de données, avec une partie liée aux bases de données relationnelles et une partie sur les bases de données de structures chimiques (qui s'appuient sur des techniques très différentes : les données d'une telle base sont des graphes). Je donne aussi, à divers publics niveau DESS, quelques heures sur la fouille de données.

La réforme LMD est entrée en vigueur dans les universités lorraines en septembre 2005. J'ai dans ce cadre participé à la mise en place de maquettes de différents masters. En particulier, dans le master « Sciences de la cognition et applications » de l'Université Nancy 2 je suis responsables des unités d'enseignement « Représentation des connaissances et raisonnements » et « Web sémantique », en lien avec mes recherches.

Deuxième partie

Synthèse des recherches

Chapitre 4

Introduction

Le raisonnement à partir de cas (RÀPC) est un mode de raisonnement s'appuyant sur une base de cas, un cas étant la donnée d'un problème et d'une solution de ce problème. Les deux phases principales du RÀPC sont la remémoration et l'adaptation. La remémoration consiste à sélectionner un cas jugé similaire au problème à résoudre, ou problème cible. L'adaptation consiste à modifier le cas source en vue de la résolution du problème cible.

Ces quelques définitions informelles — ou leurs variantes — donnent une idée de ce que peut être un système de RÀPC. En revanche, elles sont insuffisamment précises pour spécifier formellement un tel système. Une partie importante des recherches de ce domaine consiste à implanter des systèmes s'appuyant sur les principes du RÀPC et à en dégager des principes généraux. Les recherches décrites dans cette partie suivent en général cette démarche pour apporter des éléments de réponse à la question

« Comment concevoir et développer un système de RÀPC ? »

Pour s'attaquer à cette question, il est utile d'appréhender plus précisément ce qu'est le RÀPC et ce que sont — ou peuvent être — les notions qui y sont liées. Le chapitre 5 propose quelques définitions allant dans ce sens. Il permet également d'introduire deux projets dans lesquels des études sur le RÀPC ont été menées : TICCO — dont l'objectif est l'assistance à la synthèse en chimie organique — et KASIMIR — dont l'objectif est la gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie.

Le chapitre 6 décrit une approche générale du RÀPC « en milieu hiérarchique », s'appuyant sur une organisation hiérarchique des problèmes. Cette approche a été mise au point dans le cadre des projets TICCO puis KASIMIR. Son principe est l'extension du raisonnement par classification effectué par la classification hiérarchique au sens habituel (appelée *classification dure*, dans ce mémoire). La première extension, la *classification hiérarchique floue*, permet de faire des inférences floues. La deuxième extension, la *classification élastique*, permet la prise en compte d'adaptations.

Pour implanter cette approche, il faut disposer de connaissances d'adaptation dont l'étude fait l'objet du chapitre 7. L'adaptation est à la fois la phase centrale d'un système de RÀPC et la moins étudiée : alors qu'il semble facile d'implanter la remémoration — en utilisant, par exemple, une mesure de similarité — l'adaptation paraît plus difficile à appréhender. Trois démarches complémentaires de recherche sur l'adaptation sont présentées dans ce chapitre. La première consiste à s'intéresser aux approches générales de l'adaptation. La deuxième étudie l'acquisition — automatique ou auprès d'experts — de connaissances d'adaptation. La troisième démarche conduit à établir des « catalogues » de connaissances d'adaptation susceptibles d'être réutilisées dans plusieurs domaines.

Ces connaissances induisent des besoins en gestion des connaissances (en particulier, en représentation des connaissances) qui sont étudiés au chapitre 8, avec des éléments de réponse à ces besoins, en lien avec le projet KASIMIR.

Enfin, la conclusion présente un bilan et des directions de recherches.

Dans cette partie, des encadrés introduiront le cadre des recherches et les collaborations, et présenteront l'historique de ces travaux.

Chapitre 5

Le raisonnement à partir de cas : généralités

Les recherches décrites dans ce mémoire s'appuient essentiellement sur des études applicatives dans deux domaines : la chimie organique et la cancérologie. Après un bref rappel sur le raisonnement à partir de cas (RÀPC), ces projets sont présentés successivement, avec un accent fort sur leurs composantes RÀPC. Puis, nous discuterons de deux questions générales sur ce mode de raisonnement.

5.1 Le RÀPC : notions de base et notations

Cette section présente brièvement les notions de base du RÀPC qui sont utiles à la compréhension du reste du mémoire, ainsi que les notations associées. Elles ne constituent en rien une étude générale censée décrire ce domaine de recherche dans son ensemble. Le RÀPC a été introduit par Roger Schank et Janet Kolodner dans les années 80, dans la continuité des travaux de Schank sur la modélisation de la mémoire humaine [Schank, 1982]. L'ouvrage [Riesbeck et Schank, 1989] nous semble une bonne introduction au RÀPC, qui a peu vieilli et qui est illustrée par des exemples détaillés. Le livre [Kolodner, 1993] est plus encyclopédique. Par ailleurs, les articles [Aamodt et Plaza, 1994] et [López de Mántaras et Plaza, 1997] sont des synthèses reconnues dans le domaine. Les travaux sur le raisonnement par analogie ont une grande importance pour le RÀPC. On pourra lire à ce sujet la synthèse [Coulon *et al.*, 1990].

5.1.1 Objets de base du RÀPC

Problèmes et solutions. Dans un domaine d'application donné, on considère deux ensembles : Problèmes l'*espace des problèmes* et Solutions, l'*espace des solutions*. Un problème est par définition un élément de Problèmes et une solution, un élément de Solutions. On suppose qu'il existe une relation binaire sur Problèmes \times Solutions signifiant « a pour solution ». *Résoudre* un problème pb, c'est trouver (ou construire) sol \in Solutions tel que pb a pour solution sol. On peut classer les systèmes de RÀPC en fonction du type de problèmes qu'ils cherchent à résoudre : problèmes de configuration, de décision, de diagnostic, de planification, etc.

Cas. Un cas est la représentation d'un *épisode de résolution de problème*. Soit pb \in Problèmes. Un cas associé à pb contient un ensemble d'informations en lien avec sa résolution. On considère généralement qu'un cas est donné par un couple (pb, Sol(pb)) où pb \in Problèmes, Sol(pb) \in Solutions et pb a

pour solution $\text{Sol}(\text{pb})$ ⁽²⁾. Souvent, des informations utiles à sa réutilisation sont associées à un cas. En particulier, les informations disponibles sur les liens entre pb et $\text{Sol}(\text{pb})$ sont appelées *dépendances*.

Une *base de cas* est un ensemble fini de cas, généralement muni d'une structure. On la dénote par BaseDeCas . Un *cas source* est un élément de BaseDeCas et est dénoté par $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$: srce est appelé *problème source*. Le problème cible, dénoté par cible , est le problème à résoudre.

5.1.2 Étapes du RÀPC

De façon générale, raisonner à partir de cas, c'est résoudre le problème cible en faisant appel à une base de cas :

$$\text{R}\grave{\text{a}}\text{P}\text{C} : (\text{cible}, \text{BaseDeCas}) \mapsto \text{Sol}(\text{cible}) \in \text{Solutions}$$

Un cas étant traité par un raisonnement, il constitue une unité de *connaissances*, et non pas une simple donnée. Le RÀPC peut être décomposé en un ensemble d'étapes constituant le cycle de RÀPC et ce, de plusieurs manières (voir en particulier [Riesbeck et Schank, 1989] et [Aamodt et Plaza, 1994]). Dans ce mémoire, nous nous concentrons essentiellement sur la remémoration et l'adaptation.

Remémoration. La *remémoration* a pour objectif de sélectionner un cas source $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ *similaire* au problème cible :

$$\text{Remémoration} : (\text{cible}, \text{BaseDeCas}) \mapsto (\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce})) \in \text{BaseDeCas}$$

La signification du terme « similaire » est variable. Souvent, la similarité est modélisée par une mesure de similarité $\mathcal{S} : \text{Problèmes} \times \text{Problèmes} \rightarrow [0; 1]$, ce qui permet d'exprimer :

- Que deux problèmes srce et cible sont similaires : $\mathcal{S}(\text{srce}, \text{cible}) \geq \mathcal{S}_{\min}$, où \mathcal{S}_{\min} est un seuil de similarité prédéfini ;
- Qu'un problème srce_1 est plus similaire à cible qu'un problème srce_2 : $\mathcal{S}(\text{srce}_1, \text{cible}) \geq \mathcal{S}(\text{srce}_2, \text{cible})$.

On utilise parfois une mesure de dissimilarité (ou une distance) $\text{diss} : \text{Problèmes} \times \text{Problèmes} \rightarrow [0; +\infty[$, sachant que si \mathcal{S} doit être maximisée, diss doit être minimisée. Une façon simple d'associer à une mesure de dissimilarité diss une mesure de similarité \mathcal{S} (et inversement) consiste à poser $\mathcal{S}(\text{srce}, \text{cible}) = 1/(1 + \text{diss}(\text{srce}, \text{cible}))$.

La remémoration peut s'appuyer sur une structuration de la base de cas sous la forme d'une hiérarchie d'*index*, sachant qu'un index associé à un cas source est un « résumé » de ce cas (parfois dans un formalisme simplifié). La remémoration se fait alors généralement en associant un index au problème cible et en classifiant hiérarchiquement cet index dans la hiérarchie des index de cas sources.

Adaptation. L'adaptation a pour objectif de résoudre cible en s'appuyant sur le cas remémoré $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$:

$$\text{Adaptation} : (\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}) \mapsto \text{Sol}(\text{cible}) \tag{5.1}$$

Un triplet $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible})$ s'appelle *problème d'adaptation*.

Les approches de l'adaptation sont nombreuses et il est difficile de les évoquer brièvement. Le chapitre 7 en présente un certain nombre.

²Remarque : la notation $\text{Sol}(\text{pb})$ s'est avérée pratique à l'usage mais elle ne signifie pas pour autant que la relation « a pour solution » est fonctionnelle.

Autres étapes du RÀPC. L'*élaboration* consiste à mettre en forme le problème cible en vue de la remémoration en complétant sa description à l'aide de connaissances du domaine [Mille, 1998; Fuchs *et al.*, 2006]. L'adaptation peut être suivie d'une étape de *test* du nouveau cas (*cible*, *Sol(cible)*) (*Sol(cible)* est-elle une solution de *cible*?) suivie d'une étape de *réparation* en cas de test négatif (les étapes de test et de réparation peuvent également être considérées comme une partie de l'étape d'adaptation). Enfin, l'étape de *mémorisation* consiste à évaluer l'opportunité de stocker le cas (*cible*, *Sol(cible)*) dans la base de cas et, si c'est opportun, à le stocker.

Par ailleurs, sont développés des outils destinés à la gestion des connaissances d'un système de RÀPC. En particulier, la problématique de la maintenance de bases de cas est un thème de recherches actif de la communauté RÀPC.

Variante : raisonnement à partir de plusieurs cas. Pour certains systèmes de RÀPC, plusieurs cas peuvent être remémorés afin de résoudre un seul problème cible. Cela peut se faire d'au moins deux façons. Soit, le module de remémoration sélectionne plusieurs cas sources puis, un module de *combinaison* de ces cas sources permet de construire une solution du problème cible. Soit, le module de remémoration sélectionne un seul cas source qui va donner une solution *partielle* au problème cible, puis, la remémoration sélectionne un nouveau cas source qui va contribuer à compléter la solution, et ainsi de suite, jusqu'à avoir une solution complète.

5.1.3 Connaissances utilisées pour le RÀPC

Pour effectuer un raisonnement à partir de cas, un système de RÀPC doit disposer d'une base de cas. Il peut aussi avoir besoin de connaissances pour les différentes étapes du raisonnement, en particulier, de la *similarité* (ou connaissance de remémoration, qui ne consiste pas nécessairement en une mesure de similarité), des *connaissances d'adaptation*, etc. De plus, les *connaissances du domaine* (i.e., l'ensemble des connaissances disponibles du domaine d'application) sont souvent utilisées dans le raisonnement.

5.2 Le RÀPC dans deux projets : TICCO et KASIMIR

5.2.1 TICCO : traitement informatique des connaissances en chimie organique

Le groupement de recherche CNRS « Traitement Informatique de la connaissance en chimie organique » a été créé pour la période 1992-1996 puis pour la période 1997-2000, a été dirigé par Claude Laurenço (directeur de recherche au CNRS, section chimie) et a réuni des chercheurs en chimie et en informatique, et des acteurs de l'industrie pharmaceutique. Il a fait suite à des travaux antérieurs dans le domaine, dont l'origine remonte aux années 1980 [Laurenço, 1985] notamment sur la représentation des structures chimiques dans un cadre de représentation des connaissances par objets [Laurenço *et al.*, 1990; Napoli, 1992a; Napoli *et al.*, 1994] qui ont mené au développement du système RÉSYN [Vismara *et al.*, 1992].

C'est dans le cadre du GDR TICCO et dans l'équipe RFIA dirigée par Jean-Paul Haton (au Loria) que j'ai effectué ma thèse, qui était encadrée par Amedeo Napoli et Claude Laurenço.

Étant donné la représentation d'une molécule par un graphe moléculaire *M*, comment synthétiser cette molécule ? À cette question très générale, le GDR TICCO a apporté des éléments de réponse sous différents angles : utilisation et développement de techniques de théorie des graphes et de représentation de connaissances par objets [Vismara *et al.*, 1992; Vismara, 1995], développement d'algorithmes adaptés à ces représentations [Régis, 1995], utilisation de principes des systèmes multi-agents et de représentation multi-points de vue [Jambaud, 1996], modélisation de la synthèse [Gien, 1998] et RÀPC [Lieber, 1997].

Une solution d'un tel problème est un plan de synthèse, i.e., un ensemble de réactions conduisant à la molécule représentée par M. Le système de RÀPC développé dans le cadre de cette thèse s'appelle RÉSYN/RÀPC et s'appuie sur le système RÉSYN [Vismara *et al.*, 1992]. La base de cas de RÉSYN/RÀPC est constituée d'un ensemble de plans de synthèse connus.

5.2.2 KASIMIR : gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie

Le projet de recherches KASIMIR a débuté fin 1997 et se poursuit actuellement. Il réunit à l'heure actuelle quatre groupes de partenaires :

- Des chercheurs en informatique de l'équipe Orpailleur du LORIA, à laquelle j'appartiens ;
- Des experts en cancérologie du centre Alexis Vautrin (Vandœuvre-lès-Nancy) ;
- Le bureau et des membres de l'association Oncolor, réseau de santé en cancérologie de la région Lorraine ;
- Des ingénieurs et membres de l'association Hermès, dont l'objet est de coordonner et mutualiser les systèmes d'information des réseaux de santé et de soin lorrains et
- Des chercheurs du laboratoire d'ergonomie du CNAM (Paris).

Je pilote les recherches en informatique de KASIMIR et me suis également beaucoup investi dans l'encadrement des développements informatiques du projet, non seulement de membres d'Orpailleur, mais aussi de stagiaires et d'ingénieurs engagés par Oncolor et Hermès.

En Lorraine, certains types de décisions médicales (diagnostiques, thérapeutiques, de surveillance, etc.) s'appuient sur des *référentiels*, qui sont des applications régionales de standards médicaux (compilations d'études cliniques, selon le principe de l'*evidence-based medicine* [Evidence-based medicine working-group, 1992]). Un référentiel peut être considéré comme un ensemble de règles de décision *situation* → *décision*. Par exemple, pour le référentiel du traitement du cancer du sein au stade locorégional (i.e., non métastatique), *situation* décrit une classe de patients atteints de cette pathologie (par des conditions sur le sexe, l'âge, la taille et la localisation de la tumeur, etc.) et *décision* est un ensemble de recommandations thérapeutiques (chimiothérapie, chirurgie, hormonothérapie et radiothérapie). C'est ce référentiel qui a été le plus étudié dans le cadre du projet KASIMIR et c'est de lui qu'il s'agira quand apparaîtra dans ce mémoire le terme « le référentiel », sans d'autres précisions.

Pour 60 à 70% des cas médicaux, le référentiel peut s'appliquer directement. Les autres cas, dits cas *hors référentiel* correspondent :

- À l'incomplétude du référentiel (par exemple, le référentiel ne recommande rien pour les patients de sexe masculin qui constituent environ 1% des cas de cancer [El Omari-Alaoui *et al.*, 2002]) ;
- À des contre-indications thérapeutiques (par exemple, le référentiel recommande une drogue contre-indiquée pour les personnes atteintes d'une pathologie du foie) ;
- À des facteurs psychologiques (réticences, qui peut être forte, à la perte d'un sein, etc.) ;
- Ou à d'autres raisons (informations manquantes, proximité à un seuil de décision d'une caractéristique, difficultés pratiques d'application d'un traitement, etc.).

Les cas hors référentiel sont examinés lors de RCP (réunions de concertations pluridisciplinaires) qui réunissent des experts des différentes disciplines liées à cette pathologie. Catherine Sauvagnac a montré, lors de sa thèse de psycho-ergonomie, que les recommandations des RCP n'étaient pas faites indépendamment du référentiel mais constituaient des *adaptations* de celui-ci [Sauvagnac, 2000]. De plus, elle a mis en évidence le fait que ces adaptations pouvaient conduire à des évolutions du référentiel. Une façon de reformuler ces idées est de considérer le référentiel comme une théorie, les cas hors référentiel comme correspondant à une pratique non couverte par la théorie et nécessitant une adaptation de celle-ci, ce qui, à terme, peut faire évoluer la théorie. C'est sur l'objectif de mise en œuvre d'outils pour assister les tâches des médecins en lien avec le référentiel que s'est construit le projet de recherches KASIMIR, sur trois « étages » : l'application, l'adaptation et l'évolution du référentiel.

Au premier étage, l'application du référentiel, a été mis en place un système pour représenter le référentiel et pour l'interroger. Ce système a connu différentes versions, s'est appuyé sur une représentation des connaissances par objets (versions 1, 2 et 3), puis sur une représentation dans la logique de descriptions OWL DL (version 4).

Le deuxième étage, l'adaptation du référentiel, s'appuie sur les principes du RÀPC. L'idée est que l'adaptation du référentiel est constituée de la sélection d'une règle $R = \text{situation} \longrightarrow \text{décision}$ et de l'adaptation de R au cas hors référentiel. En termes de RÀPC, la règle R constitue un cas ($\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce})$) avec $\text{srce} = \text{situation}$, $\text{Sol}(\text{srce}) = \text{décision}$, le référentiel est la base de cas et le cas hors référentiel constitue le problème cible.

Le troisième étage, l'évolution du référentiel, reste à concevoir du point de vue informatique.

Des travaux théoriques en cours avec Amélie Cordier, Béatrice Fuchs et Alain Mille pourraient s'appliquer à l'évolution des référentiels. Leur objet est l'acquisition interactive des connaissances d'un système de RÀPC (connaissances du domaine, connaissances d'adaptation et cas). Deux prototypes ont été développés qui s'appuient sur des échecs de l'adaptation :

- FRAKAS, pour l'acquisition des connaissances du domaine [Cordier *et al.*, 2007a; Cordier *et al.*, 2007c; Cordier *et al.*, 2007e];
- KAYAK, pour l'acquisition de connaissances d'adaptation et de cas [Cordier *et al.*, 2007b; Cordier *et al.*, 2007d].

5.3 Des questions sur le RÀPC

Plusieurs questions ont fait (ou font encore) débat dans la communauté du RÀPC. Cette section présente notre point de vue sur deux de ces questions qui donnera un éclairage sur certains choix présentés dans les chapitres suivants.

5.3.1 Pourquoi implanter un système de RÀPC ?

Ayant pour objectif de construire un système associant des solutions à des problèmes, pourquoi choisir une approche RÀPC ? Cette question a fait couler beaucoup d'encre dans la communauté RÀPC, à ses débuts (voir par exemple [Kolodner, 1993]). Le RÀPC était alors proposé comme une alternative au raisonnement utilisant des règles, coûteux en terme d'acquisition de connaissances. Notre expérience du RÀPC n'est pas exempte des mêmes difficultés d'acquisition de connaissances. Ce qui nous a fait opter pour le RÀPC dans les applications décrites à la section suivante, outre notre intérêt pour ce mode de raisonnement, est le fait que les experts étaient réputés résoudre certains de leurs problèmes selon une démarche RÀPC.

De façon plus générale, on peut noter une distinction entre deux motivations pour implanter un système de RÀPC, distinction issue de la communauté sur le raisonnement par analogie : l'analogie *heuristique* et l'analogie *recours* [Coulon *et al.*, 1990]. Cette distinction repose sur l'intérêt qu'on prête au raisonnement par analogie (ou à partir de cas). Si ce mode de raisonnement a été choisi pour son efficacité (en terme de temps de calcul, par exemple), on parlera d'analogie heuristique. En revanche, si on s'intéresse au résultat du raisonnement (la solution du problème cible), plutôt qu'à l'efficacité du raisonnement, on parle d'analogie recours. Les deux applications RÉSYN/RÀPC et KASIMIR relèvent de l'analogie recours. Le planificateur à partir de cas PRODIGY/ANALOGY [Veloso, 1994] relève de l'analogie heuristique : le RÀPC est utilisé pour trouver plus rapidement un plan qu'avec une méthode de planification directe.

5.3.2 Qu'est-ce qu'un cas ?

De quoi est constitué un cas ? Comme nous l'avons défini plus haut, un cas est la représentation d'un épisode de résolution d'un problème pb ; il est donc constitué au moins de pb et d'une solution $Sol(pb)$ de pb, et est parfois accompagné d'autres informations telles que les dépendances codant des liens entre pb et $Sol(pb)$. La notion de problème (ainsi que celle de solution) est relative aux applications particulières du RÀPC. Néanmoins, un problème peut généralement être considéré comme l'énoncé d'une situation et d'une question au sujet de cette situation. La question est souvent la même pour tous les cas d'un système de RÀPC donné et n'est alors pas nécessairement représentée. Ainsi, pour RÉSYN/RÀPC, la situation est donnée par un graphe moléculaire M et la question est « Comment synthétiser la structure moléculaire représentée par M ? » Pour le référentiel de KASIMIR, tel que nous l'avons présenté ci-dessus, la situation est la description d'une classe de patients CP et la question est « Quel traitement recommander pour les patients de la classe CP ? » En fait, il est possible de particulariser cette question en ne demandant, par exemple, que la chirurgie recommandée.

Cette présence (explicite ou pas) d'une question au sein d'un problème met en évidence la différence entre les notions de concept et de problème : un concept est la représentation d'un ensemble d'individus alors qu'un problème doit être appréhendé par sa question et donc par l'ensemble des solutions qui répondent à cette question. Cette différence entre concepts et problèmes est d'autant moins évidente que, souvent, une situation d'un problème (et donc, le problème en entier si la question est implicite) est représentée par un concept. Néanmoins, cette différence s'avère utile à la conception d'un système de RÀPC.

La remémoration guidée par l'adaptabilité. En particulier, estimer la similarité entre deux concepts se ramène à l'estimation de la similarité entre les ensembles d'individus qu'ils représentent. En revanche, nous considérerons que deux problèmes similaires sont par définition deux problèmes ayant des solutions similaires. L'affirmation « Si deux problèmes sont similaires alors leurs solutions sont similaires » découle donc immédiatement de cette définition. Ainsi, pour modéliser la similarité entre problèmes, il importe de modéliser la similarité entre solutions. Une telle similarité dépend de la structure de l'espace des solutions, qui indique comment « passer » d'une solution à une autre. Cette structure est liée à l'*adaptation* d'une solution d'un problème en une solution d'un autre problème : deux solutions sont similaires si les connaissances d'adaptation permettent de passer de l'une à l'autre. Une modélisation de la similarité entre problèmes s'appuyant sur cette idée permet d'implanter une remémoration guidée par l'adaptabilité (*adaptation-guided retrieval* [Smyth et Keane, 1996]). Plus précisément, nous définissons les propriétés de correction et de complétude de la similarité entre problèmes vis-à-vis de l'adaptation par :

correction si *srce* est similaire à *cible* alors $Sol(srce)$ est adaptable en une solution de *cible*

complétude si $Sol(srce)$ est adaptable en une solution de *cible* alors *srce* est similaire à *cible*

Une remémoration sera correcte (resp. complète) vis-à-vis de l'adaptation si elle s'appuie sur une relation de similarité entre problèmes correcte (resp. complète) vis-à-vis de l'adaptation [Lieber et Napoli, 1998a] (de façon parallèle, Ralph Bergmann et Wolfgang Wilke ont introduit des propriétés similaires [Bergmann et Wilke, 1998]).

Une procédure de remémoration correcte et complète vis-à-vis de l'adaptation est donc fortement dépendante des capacités de la procédure d'adaptation : si l'ajout de nouvelles connaissances permet de résoudre de nouveaux problèmes d'adaptation (*srce*, $Sol(srce)$, *cible*), alors le test « *srce* est similaire à *cible* » doit donner faux avant l'ajout de ces connaissances et vrai après.

À titre d'illustration, considérons l'espace des problèmes représentés par des n -uplets de booléens ($n > 0$ fixé). Si on ne précise rien concernant les questions et les solutions, une similarité modélisée

par la distance de Hamming d_H entre deux problèmes `srce` et `cible` semble naturelle³. Supposons à présent qu'un problème corresponde à une image en noir et blanc de $a \times b$ pixels (avec $n = ab$, noir = Vrai et blanc = Faux) accompagnée de la question «Quels sont les objets de cette image?». Soit alors $\text{Sol}(\text{srce}) = \{\text{chaise blanche, table grise}\}$ une solution d'un problème `srce`. Si `cible` est le négatif de `srce` ($x_i^c = \text{non } x_i^s$), alors $\text{Sol}(\text{cible}) = \{\text{chaise noire, table grise}\}$ résout `cible`. Si les connaissances d'adaptation permettent de réaliser ce raisonnement et que la similarité est complète vis-à-vis de l'adaptation, alors `srce` et `cible` sont similaires. Or ils sont, au sens de la distance de Hamming, très éloignés : $d_H(\text{srce}, \text{cible}) = \max_{\text{pb}, \text{pb}' \in \text{Problèmes}} d_H(\text{pb}, \text{pb}')$. La distance de Hamming, qui nous semble naturelle pour comparer deux n -uplets de booléens, est inadaptée pour la comparaison de deux problèmes de reconnaissance d'objets dans des images.

Cas et règles. La littérature du RÀPC, comme nous l'avons mentionné à la section 5.3.1, a beaucoup opposé cas et règles. Cette opposition s'appuie sur l'idée qu'une règle est générale (au sens où elle permet de résoudre une classe de problèmes particuliers) alors qu'un cas est particulier (il associe à un problème particulier une solution). En fait, et nous adhérons à ce point de vue, [Riesbeck et Schank, 1989] intègrent la notion de règle dans la notion de cas : ils distinguent les *cas généraux* (*ossified cases*) des *histoires* (*stories*) : les premiers sont des règles et les seconds des cas particuliers. Si l'on ne considère pas comme cas les résolutions d'un problème général, on exclut du champ du RÀPC, par exemple, la démonstration automatique de théorème à partir de cas [Melis, 1993; Curien, 1995] : on voit mal comment les problèmes de ce domaine — énoncés de théorèmes — pourraient ne représenter que des situations particulières. Ainsi, nous ne contraignons pas la notion de cas à un niveau de généralité ; par exemple, les cas sources de RÉSYN/RÀPC sont des plans de synthèse particuliers alors que les cas sources de KASIMIR sont généraux (et coïncident avec les règles de décision du référentiel). La différence entre le raisonnement à partir de règles (RÀPR) et le RÀPC tient selon nous essentiellement au fait que le RÀPR *applique* les règles (application d'un cas général à un cas plus particulier, selon une règle d'inférence telle que le *modus ponens*) alors que le RÀPC *adapte* les cas. En considérant qu'une application est une adaptation particulière, on intègre le RÀPR dans le RÀPC : le RÀPC est une extension du RÀPR. On distingue alors règles et cas en fonction de leurs contextes d'utilisation : une règle (resp., un cas) est une unité de connaissances utilisée lors d'un RÀPR (resp., d'un RÀPC) et ne nécessitant pas (resp., nécessitant) d'adaptation. Dans [Lieber, 2001], une discussion plus complète sur cas et règles est présentée.

³Si $\text{srce} = (x_1^s, \dots, x_n^s)$ et $\text{cible} = (x_1^c, \dots, x_n^c)$, cette distance est le nombre de i tels que $x_i^s \neq x_i^c$. On peut également penser à utiliser la mesure de [Tversky, 1977], ce qui conduirait à une discussion semblable.

Chapitre 6

Raisonnement à partir de cas en milieu hiérarchique

Ce chapitre présente trois procédures de remémoration correctes vis-à-vis de l'adaptation. Dans 6.1, la *classification dure* est présentée. Elle s'appuie principalement sur des techniques de classification hiérarchique. Quand la classification dure échoue à trouver un cas source, deux autres approches de la remémoration peuvent être appliquées. La première, appelée *classification floue* et présentée en 6.2, s'appuie sur des approximations. La deuxième est appelée *classification élastique* et est présentée en 6.3 : un problème source *srce* n'est apparié à un problème cible que si les connaissances disponibles permettent d'adapter la solution de *srce* en une solution de *cible*. Enfin, la section 6.4 donne quelques détails sur l'implantation de RÉSYN/RÀPC.

Les classifications dure et élastique ont été définies dans le cadre de RÉSYN/RÀPC [Lieber, 1997]. La classification élastique s'appuie notamment sur la notion de reformulation, terme que nous avons pris à Erica Melis avec qui nous avons collaboré : l'approche de RÉSYN/RÀPC et celle qu'Erica a développé dans le cadre de la preuve de théorème par analogie [Melis, 1995] partageaient des idées, que nous avons formalisées dans [Melis *et al.*, 1998].

La classification floue a été introduite ultérieurement, pour le projet KASIMIR (ce chapitre ne respecte donc pas la chronologie de ces recherches). Julien Lévêque a implanté ce mécanisme [Lévêque, 2001].

Ce chapitre peut être vu comme une synthèse des articles [Lieber et Napoli, 1996b], [Lieber et Napoli, 1998a], [Lieber et Napoli, 1999] et [Lieber, 2002b].

6.1 La classification dure

6.1.1 La relation de généralité entre problèmes

Le moins qu'un système de RÀPC puisse faire quand le problème cible a déjà été résolu dans le passé est de réutiliser directement sa solution. Autrement dit, quand existe $(srce, Sol(srce)) \in BaseDeCas$ tel que $srce = cible$, alors $Sol(srce)$ est une solution de *cible*.

Une première extension consiste à remplacer l'égalité par l'équivalence étant donné la théorie du domaine Th : deux problèmes pb et pb' sont équivalents — $pb \equiv pb'$ — si, selon Th , ils sont deux représentations d'un même problème. Par exemple, considérons les deux problèmes suivants :

pb = Quelle est la somme des angles d'un polygone convexe à n côtés ?

pb' = Quelle est la somme des angles d'un polygone convexe à n angles ?

Si Th permet de prouver que les notions de « polygone à n côtés » et de « polygone à n angles » représentent les mêmes objets, alors $pb \equiv pb'$. Cette relation d'équivalence a les propriétés suivantes :

$$\text{si } srce \equiv cible \text{ alors } (sol \text{ est une solution de } srce \text{ ssi } sol \text{ est une solution de } cible) \quad (6.1)$$

Ainsi, si $srce \equiv cible$ alors $Sol(srce)$ résout $cible$.

Or, on peut remarquer que la propriété (6.1) est inutilement forte : savoir que si sol résout $cible$ alors sol résout $srce$ est inutile à notre objectif de résolution de problème. Pour casser cette symétrie non nécessaire, une extension non symétrique de \equiv , appelée la *relation de généralité entre problèmes* et dénotée par \sqsupseteq , est introduite par la définition (préliminaire) suivante :

Définition 1 Une relation de généralité entre problèmes est une relation binaire \sqsupseteq sur Problèmes ayant les propriétés suivantes :

$$\text{si } srce \sqsupseteq cible \text{ alors toute solution de } srce \text{ est une solution de } cible \quad (6.2)$$

$$\text{si } pb_1 \equiv pb_2 \text{ alors } pb_1 \sqsupseteq pb_2 \quad (6.3)$$

$$\text{si } pb_1 \sqsupseteq pb_2 \text{ et } pb_2 \sqsupseteq pb_1 \text{ alors } pb_1 \equiv pb_2 \quad (6.4)$$

$$\text{si } pb_1 \sqsupseteq pb_2 \text{ et } pb_2 \sqsupseteq pb_3 \text{ alors } pb_1 \sqsupseteq pb_3 \quad (6.5)$$

$$\sqsupseteq \text{ est calculable} \quad (6.6)$$

pour tout $srce, cible, pb_1, pb_2, pb_3 \in \text{Problèmes}$.

La propriété (6.2) est utilisée pour la résolution de problèmes. Les propriétés (6.3), (6.4) et (6.5) entraînent que \sqsupseteq est un ordre partiel modulo \equiv , i.e., si deux problèmes équivalents sont considérés comme égaux, alors \sqsupseteq est un ordre partiel sur Problèmes (elle est réflexive, antisymétrique et transitive).

Cette définition est trop restrictive dans certaines situations, comme le montre l'exemple ci-dessous :

pb = Quelle est la somme des angles d'un polygone convexe à n côtés ?

pb' = Quelle est la somme des angles d'un triangle ?

Intuitivement, il semble que pb soit plus général que pb' (un triangle étant un polygone convexe à 3 côtés). Néanmoins, la formule « $(n - 2)\pi$ » est une solution $Sol(pb)$ de pb mais n'est pas, en toute rigueur, une solution de pb' : pour avoir une solution de pb' , il suffit de substituer dans $Sol(pb)$ n par 3 (« $(3 - 2)\pi$ » est une solution de pb'). Une telle substitution allant du général au spécifique, guidée par une relation allant du général au spécifique entre entités de descriptions de deux problèmes sera appelée *spécialisation de solution*.

Plus généralement, on suppose que, dans un domaine d'application donné, existe un couple $(\sqsupseteq, \text{Spécialisation})$, où \sqsupseteq est un ordre partiel modulo \equiv et Spécialisation est une fonction partielle avec le profil suivant⁴ :

Spécialisation :

$$(srce, Sol(srce), cible) \in \text{BaseDeCas} \times \text{Problèmes} \mapsto Sol(cible) \in \text{Solutions} \quad (6.7)$$

et tel que si $srce \sqsupseteq cible$, alors Spécialisation($srce, Sol(srce), cible$) est définie et résout $cible$. Sur la base de ces notions, la propriété (6.2) peut être remplacée par :

$$\text{si } srce \sqsupseteq cible \text{ alors toute solution de } srce \text{ peut être spécialisée en une solution de } cible \quad (6.2')$$

À présent, une définition moins restrictive de \sqsupseteq que la définition 1 peut être donnée :

⁴Pour ne pas alourdir davantage les notations, le couple $((srce, Sol(srce)), cible)$ sera noté par le triplet $(srce, Sol(srce), cible)$.

Définition 2 Soit *Spécialisation* une fonction ayant le profil de (6.7). Une relation de généralité entre problèmes est une relation binaire \sqsupseteq sur Problèmes ayant les propriétés (6.2'), (6.3), (6.4), (6.5) et (6.6), et telle que *Spécialisation*(*srce*, *Sol*(*srce*), *cible*) est définie pour *srce* \sqsupseteq *cible*.

Une relation \sqsupseteq au sens de la définition 1 respecte également la définition 2 si la fonction *Spécialisation* effectue simplement une copie, i.e. :

$$\text{Spécialisation}(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}) = \text{Sol}(\text{srce})$$

Spécialisation a le même profil que *Adaptation* (comparer (5.1) et (6.7)) et, en fait, est une fonction d'adaptation définie pour *srce* \sqsupseteq *cible*. En pratique, *Spécialisation* peut être une simple copie, une substitution d'une variable par une valeur, une substitution d'un concept par un concept plus spécifique, etc. Pour l'exemple du polygone convexe à n côtés et du triangle, la spécialisation s'appuie sur la substitution de la variable n par le terme 3 à la fois dans *srce* et *Sol*(*srce*).

Enfin, pour être cohérent avec la transitivité de \sqsupseteq (propriété (6.5)), on suppose que si une solution *sol*₁ d'un problème *pb*₁ peut être spécialisée en une solution *sol*₂ d'un problème *pb*₂ laquelle peut être spécialisée en une solution *sol*₃ de *pb*₃, alors, *sol*₁ peut être spécialisée (directement) en une solution *sol*₃ de *pb*₃ :

$$\begin{aligned} \text{si } \text{sol}_2 &= \text{Spécialisation}(\text{pb}_1, \text{sol}_1, \text{pb}_2) \text{ et } \text{sol}_3 = \text{Spécialisation}(\text{pb}_2, \text{sol}_2, \text{pb}_3) \\ \text{alors } \text{sol}_3 &= \text{Spécialisation}(\text{pb}_1, \text{sol}_1, \text{pb}_3) \end{aligned} \quad (6.8)$$

Une fois un cas source (*srce*, *Sol*(*srce*)) tel que *srce* \sqsupseteq *cible* est trouvé, *cible* peut être résolu grâce à la propriété (6.2'). Cela peut être résumé par la règle d'inférence suivante :

$$\frac{\text{srce } \sqsupseteq \text{ cible} \quad \text{Sol}(\text{srce}) \text{ est une solution de } \text{srce}}{\text{Spécialisation}(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}) \text{ est une solution de } \text{cible}} \quad (6.9)$$

6.1.2 Un algorithme de classification dure

La classification dure est une procédure de remémoration dont le but est de trouver les cas sources (*srce*, *Sol*(*srce*)) tels que *srce* \sqsupseteq *cible*. Elle s'appuie sur la classification hiérarchique qui est une technique permettant d'effectuer cette recherche de façon efficace, détaillée ci-dessous. On suppose qu'il existe un maximum \top_{pb} pour cet ordre : pour tout *pb* \in Problèmes, $\top_{pb} \sqsupseteq \text{pb}$. Tout ensemble fini H de problèmes contenant $\top_{pb} \text{ --- } H = \{\top_{pb}, \text{pb}_1, \text{pb}_2, \dots, \text{pb}_n\}$ peut être organisé en une hiérarchie \mathcal{H}_{pb} . Une telle hiérarchie est un graphe orienté dont les sommets sont les *pb* $\in H$, ayant une racine, \top_{pb} , pas de circuit et telle que, pour tout *pb*, *pb'* $\in H$, *pb* \sqsubseteq *pb'* ssi il y a un chemin de *pb* à *pb'* dans \mathcal{H}_{pb} . De plus, \mathcal{H}_{pb} ne contient pas d'arc de transitivité : si (*pb*, *pb'*) est un arc de \mathcal{H} , alors, il n'y a pas de chemin de longueur $L \geq 2$ de *pb* à *pb'*. Les problèmes sources sont supposés appartenir à \mathcal{H}_{pb} . Ces problèmes *srce* sont associés à leurs solutions *Sol*(*srce*) par des pointeurs. Les autres problèmes de \mathcal{H}_{pb} sont des problèmes *abstrait*s : aucune solution ne leur est associée et leur rôle est de structurer au mieux la hiérarchie (au sens où un bon choix de ces problèmes abstraits améliore l'efficacité des parcours de \mathcal{H}_{pb}). La figure 6.1 illustre ces notions.

Le processus de classification dure dans une hiérarchie \mathcal{H}_{pb} consiste à rechercher les problèmes *srce* qui sont plus généraux que *cible* : *srce* \sqsupseteq *cible*. S'il existe plusieurs tels problèmes sources, le processus de remémoration applique des critères de préférence (dont le plus courant consiste à choisir les problèmes sources les plus spécifiques pour \sqsubseteq) et retourne un cas (*srce*, *Sol*(*srce*)). L'adaptation suivant la classification dure consiste en une simple copie de *Sol*(*srce*) en une solution *Sol*(*cible*) de *cible*, selon la règle d'inférence (6.9).

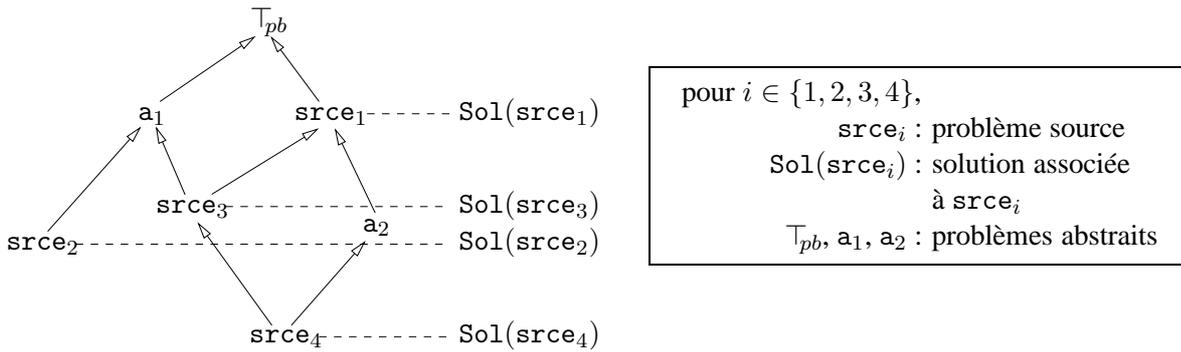


FIG. 6.1 – Une hiérarchie de problèmes \mathcal{H}_{pb} .

D'un point de vue algorithmique, la classification dure s'appuie sur la classification dans une hiérarchie de concepts (voir [Baader *et al.*, 1992] pour des algorithmes efficaces). Elle peut être effectuée par une recherche en profondeur dans \mathcal{H}_{pb} exploitant la propriété d'élagage suivante : si $pb \not\sqsupseteq cible$, alors aucun problème de \mathcal{H}_{pb} plus spécifique que pb ne peut être plus général que $cible$ (cf. transitivité de \sqsupseteq). Par conséquent, si le test « $pb \sqsupseteq cible$, » échoue dans \mathcal{H}_{pb} , alors la sous-hiérarchie de racine pb peut être élaguée. La construction de la hiérarchie \mathcal{H}_{pb} s'appuie aussi sur le processus de classification : partant d'une hiérarchie ayant juste un nœud T_{pb} , chaque problème $pb_i \in \mathcal{H}_{pb}$ est ajouté incrémentalement à \mathcal{H}_{pb} après y avoir été classifié.

La figure 6.2 illustre la classification dure ; elle montre que la hiérarchie des problèmes se divise en deux parties : la partie dans laquelle les problèmes pb sont plus généraux que $cible$ et l'autre partie.

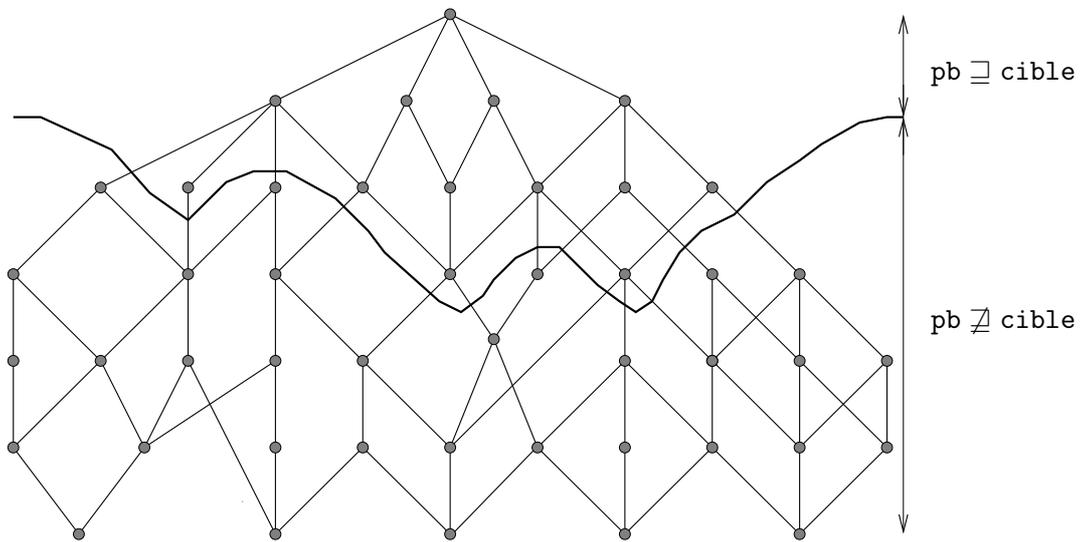


FIG. 6.2 – Illustration de la classification dure.

Correction de la classification dure. La classification dure ne retourne que les cas sources ($srce, Sol(srce)$) tels que $srce \sqsupseteq cible$. Donc, d'après (6.2'), ces cas sources peuvent être adaptés pour résoudre $cible$ grâce à la fonction de Spécialisation. Par conséquent, la classification dure est

correcte vis-à-vis de l'adaptation.

6.1.3 Cas généralisés et indexation

Comme nous l'avons mentionné à la section 5.3.2, le livre [Riesbeck et Schank, 1989] distingue les cas spécifiques des cas généraux, lesquels peuvent être assimilés à des règles. Dans KASIMIR, les cas sources sont généraux. En revanche, les cas sources de RÉSYN/RÀPC sont spécifiques et décrivent (la plupart du temps) des synthèses particulières. Par conséquent, les situations pour lesquelles $srce \sqsubseteq cible$ sont rares, ce qui rend à l'inverse fréquents les cas d'échecs de la classification dure. C'est pour cette raison que les cas sources ($srce, Sol(srce)$) de RÉSYN/RÀPC sont *indexés*. Cela signifie que, pour la remémoration, un problème $srce$ est substitué dans \mathcal{H}_{pb} par un problème $idx(srce)$ qui est une généralisation de $srce$ — $srce \sqsubseteq idx(srce)$ — et tel que la solution $Sol(srce)$ de $srce$ puisse être généralisée en une solution $Sol(idx(srce))$ de $idx(srce)$. Cela peut s'interpréter par le fait que le cas spécifique ($srce, Sol(srce)$) a été généralisé en un cas ($idx(srce), Sol(idx(srce))$). Le processus d'indexation de RÉSYN/RÀPC est présenté à la section 6.4.1.

Il peut arriver, même après indexation, qu'aucun problème source ne soit plus général que le problème cible. L'idée est alors de relâcher la condition $srce \sqsubseteq cible$. Une première façon de faire cela est de fuzzifier la relation \sqsubseteq , ce qui requiert un autre algorithme de remémoration.

6.2 La classification floue

La classification dure et l'adaptation par spécialisation s'appuient sur un processus de déduction classique, i.e. dans une logique ayant deux valeurs de vérité : 0 (ou *faux*) et 1 (ou *vrai*). Fuzzifier consiste à étendre des notions définies en logique classique (p. ex., les notions d'ensemble, de relation ou de connecteurs logiques) grâce à des valeurs de vérité floues, i.e., des valeurs de l'intervalle $[0; 1]$ (voir, p. ex., [Dubois et Prade, 2000]). Cette section présente une façon de fuzzifier la classification dure.

6.2.1 Fuzzification de \sqsubseteq par une mesure de similarité F_{\sqsubseteq}

La classification dure s'appuie sur le lien «est une solution de» entre problèmes et solutions (cf. (6.9)). Ce lien est booléen : soit une solution $Sol(pb)$ résout le problème pb , soit elle ne le résout pas. Ce lien peut être fuzzifié : $Sol(pb)$ résout pb avec une valeur de vérité floue $v \in [0; 1]$. Cela signifie que $Sol(pb)$ est une solution approchée de pb , le niveau de précision étant mesuré par v sur l'échelle $[0; 1]$. $Sol(pb)$ est une *s-solution* de pb si $v \geq s$, avec v , la valeur de vérité floue de « $Sol(pb)$ résout pb ». Une 1-solution est appelée *solution exacte*, alors qu'une *s-solution*, avec $0 < s < 1$, est appelée *solution approchée*. Pour tout $(srce, Sol(srce)) \in BaseDeCas$, $Sol(srce)$ est supposé être une solution exacte de $srce$. La fuzzification de \sqsubseteq est définie ci-dessous :

Définition 3 Une relation de généralité floue entre problèmes est une relation binaire floue F_{\sqsubseteq} sur Problèmes, i.e., une fonction $F_{\sqsubseteq} : Problèmes \times Problèmes \rightarrow [0; 1]$, telle que :

$$si F_{\sqsubseteq}(srce, cible) = s$$

$$alors toute solution de srce peut être spécialisée en une s-solution de cible \tag{6.10}$$

$$F_{\sqsubseteq}(pb_1, pb_2) = 1 \iff pb_1 \sqsubseteq pb_2 \tag{6.11}$$

$$pb_1 \sqsubseteq pb_2 \implies F_{\sqsubseteq}(pb_1, pb) \geq F_{\sqsubseteq}(pb_2, pb) \tag{6.12}$$

$$F_{\sqsubseteq} \text{ est calculable} \tag{6.13}$$

pour tout $srce, cible, pb_1, pb_2, pb_3 \in Problèmes$.

(6.10) est une fuzzification de (6.2') qui formalise le lien flou entre problèmes et solutions. (6.11) traduit le fait que F_{\sqsupseteq} est une fuzzification de \sqsupseteq . (6.12) est une propriété plus faible que la max-min transitivité qui est généralement supposée pour les relations d'ordre floues⁵. Il peut être noté que (6.11) implique que F_{\sqsupseteq} est réflexive modulo \equiv : si $pb \equiv pb'$ alors $F_{\sqsupseteq}(pb, pb') = 1$.

Principe de la classification floue. La règle d'inférence ci-dessous est proposée, comme traduction de (6.10) :

$$\frac{F_{\sqsupseteq}(srce, cible) = s \quad Sol(srce) \text{ est une solution de } srce}{Spécialisation(srce, Sol(srce), cible) \text{ est une } s\text{-solution de } cible} \quad (6.14)$$

Elle indique dans quelle mesure les cas sources peuvent donner des solutions approchées de cible. De plus, les valeurs s permettent de ranger les cas mémorisés par valeur $F_{\sqsupseteq}(srce, cible)$ décroissante. Le processus d'adaptation est une spécialisation.

6.2.2 Un algorithme de classification floue

classification hiérarchique floue

Entrée : • un problème cible $cible$.

- une hiérarchie de problème \mathcal{H}_{pb} , de racine \top_{pb} , organisée selon la relation de généralité entre problèmes (\sqsupseteq).

Sortie : le problème source le plus similaire à $cible$ selon F_{\sqsupseteq}
(ou échec, si aucun problème source n'est similaire à $cible$).

début (algorithme)

1. $EP \leftarrow \{\top_{pb}\}$ */* EP : un ensemble de problèmes de \mathcal{H}_{pb} */*
2. $pb \leftarrow \top_{pb}$ */* pb : le problème courant */*
3. **tant que** pb n'est pas un problème source **et** $EP \neq \emptyset$
4. $EP \leftarrow (EP - \{pb\}) \cup desc$, où $desc$ est l'ensemble des descendants directs de pb dans \mathcal{H}_{pb} .
5. Enlever de EP les éléments non maximaux pour \sqsupseteq .⁶
6. $pb \leftarrow$ le problème de EP maximisant $F_{\sqsupseteq}(pb, cible)$
7. **fin** (tant que)
8. **si** pb est un problème source
9. **alors retourner** pb
10. **sinon retourner** échec
11. **fin** (si)

fin (algorithme)

FIG. 6.3 – Un algorithme de classification hiérarchique floue.

L'algorithme de classification floue dans la hiérarchie \mathcal{H}_{pb} (cf. figure 6.3) consiste à parcourir les problèmes pb de la hiérarchie par similarité $F_{\sqsupseteq}(pb, cible)$ décroissante avec le problème $cible$. Cet

⁵La max-min transitivité dit que $F_{\sqsupseteq}(pb_1, pb) \geq \min(F_{\sqsupseteq}(pb_1, pb_2), F_{\sqsupseteq}(pb_2, pb))$. La conjonction de cette propriété et de (6.11) entraîne (6.12).

⁶Si $pb_1, pb_2 \in EP$ sont tels que $pb_1 \sqsupseteq pb_2$ et $pb_1 \neq pb_2$, alors pb_2 doit être enlevé de EP . Dans le cas où \mathcal{H}_{pb} est un arbre, cette situation ne peut arriver et cette ligne de l'algorithme est inutile.

algorithme retourne un seul problème source : celui qui est le plus similaire au problème cible, i.e., celui qui maximise $F_{\sqsupseteq}(\text{srce}, \text{cible})$. Il peut être modifié pour retourner la liste des problèmes sources similaires à cible, ordonnée par similarité décroissante avec le problème cible.

Remarque. La classification floue parcourt la hiérarchie par similarité décroissante à cible. En effet, si pb_1 est considéré avant pb_2 durant le processus, alors $F_{\sqsupseteq}(\text{pb}_1, \text{cible}) \geq F_{\sqsupseteq}(\text{pb}_2, \text{cible})$. Donc, si pb est le problème courant alors tout problème pb' de la hiérarchie qui n'a pas encore été considéré est moins similaire à cible que pb. Par conséquent, si $F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible})$ devient trop petit — ce qu'on modélise par $F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible}) < \sigma_{\sqsupseteq}$ où $\sigma_{\sqsupseteq} \in [0; 1]$ est un seuil prédéfini — il est inutile de poursuivre le processus de classification floue.

Cette propriété est une conséquence du fait que la similarité au problème cible décroît quand pb devient plus spécifique. En effet, par application de (6.12), on a :

$$\begin{aligned} & \text{pour pb et pb', deux problèmes de } \mathcal{H}_{pb}, \\ & \text{pb } \sqsupseteq \text{ pb}' \quad \Rightarrow \quad F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible}) \geq F_{\sqsupseteq}(\text{pb}', \text{cible}) \end{aligned}$$

Cette propriété implique que le temps de calcul de la classification floue n'est pas très sensible aux cas sources les moins similaires au problème cible. Plus précisément, dans l'ensemble des problèmes pb de la hiérarchie tels que $F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible}) < \sigma_{\sqsupseteq}$, seuls les éléments maximaux pour \sqsupseteq seront parcourus. Si la hiérarchie est bien structurée grâce à des problèmes abstraits, cela diminue le nombre de ces éléments maximaux et donc le temps de calcul.

Correction de la classification floue. Si toute s -solution d'un problème est supposée le résoudre pour $s > 0$, alors la classification floue est correcte vis-à-vis de l'adaptation.

6.2.3 Classification floue et α -coupes

La classification floue dans une hiérarchie de problèmes peut également être comprise grâce à la notion d' α -coupes. Pour une valeur de vérité floue $\alpha \in [0; 1]$, soit \sqsupseteq_{α} la relation binaire sur Problèmes définie par :

$$\text{pb } \sqsupseteq_{\alpha} \text{ pb}' \quad \text{si} \quad F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{pb}') \geq \alpha$$

On peut noter que $\sqsupseteq_1 = \sqsupseteq$ (cf. (6.11)), que $\sqsupseteq_0 = \text{Problèmes} \times \text{Problèmes}$ (pour tout $\text{pb}, \text{pb}' \in \text{Problèmes}$, $\text{pb } \sqsupseteq_0 \text{ pb}'$) et que $\alpha \geq \beta$ implique que \sqsupseteq_{α} est une sous-relation de \sqsupseteq_{β} (i.e., $\text{pb } \sqsupseteq_{\alpha} \text{ pb}'$ entraîne $\text{pb } \sqsupseteq_{\beta} \text{ pb}'$). Par conséquent, à partir de F_{\sqsupseteq} peut être définie une famille emboîtée de relations binaires sur Problèmes, $(\sqsupseteq_{\alpha})_{\alpha \in [0; 1]}$ correspondant à une famille de processus de raisonnement : $\sqsupseteq_1 = \sqsupseteq$ correspond à la classification dure, sans approximation, \sqsupseteq_{α} correspond à une approximation contrôlée par la valeur de vérité floue α . Soit $\sigma_{\sqsupseteq} \in [0; 1]$ un seuil défini par l'utilisateur interprété comme étant la plus petite valeur de vérité donnant une approximation acceptable.

La figure 6.4 illustre la classification floue : elle montre que la hiérarchie des problèmes est séparée en trois parties :

- La partie pour laquelle les problèmes pb sont plus généraux que cible ($\text{pb } \sqsupseteq \text{ cible}$ ou $F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible}) = 1$);
- La partie pour laquelle les problèmes pb sont approximativement plus généraux que cible ($\sigma_{\sqsupseteq} \leq F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible}) < 1$);
- La partie pour laquelle les problèmes pb ne sont pas plus généraux que cible à un degré suffisant ($F_{\sqsupseteq}(\text{pb}, \text{cible}) < \sigma_{\sqsupseteq}$).

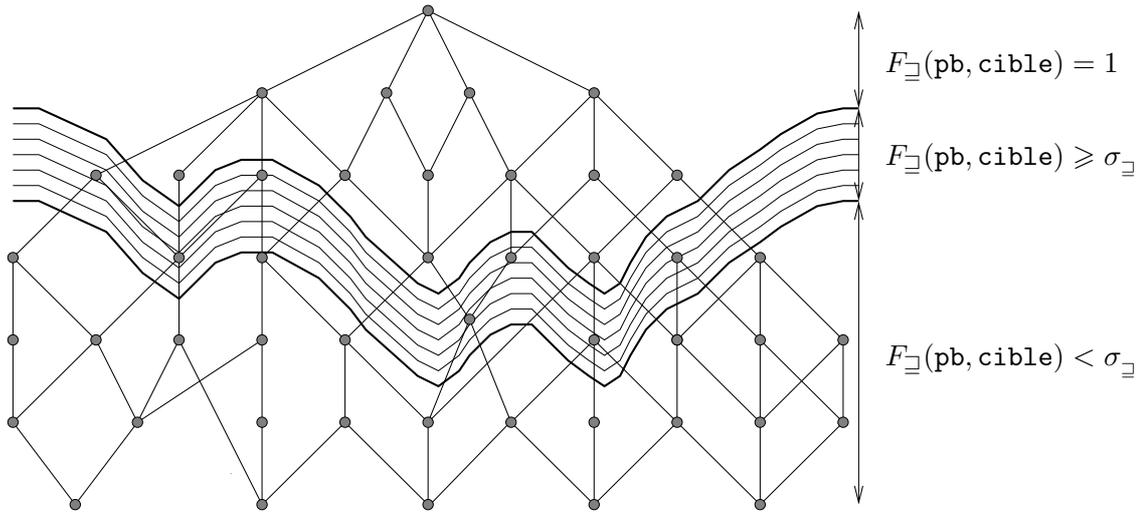


FIG. 6.4 – Illustration de la classification floue.

Soit $\alpha = F_{\sqsupseteq}(\text{srce}, \text{cible})$. Quand α est inférieur au seuil σ_{\sqsupseteq} , p. ex. quand $\alpha = 0$, l'approximation n'est plus acceptable. Dans ce cas, la simple application d'une spécialisation de solution ne suffit plus et la solution $\text{Sol}(\text{srce})$ doit être adaptée d'une autre façon. Cela requiert une autre connaissance d'adaptation que la spécialisation et un autre algorithme pour la remémoration.

6.3 La classification élastique

6.3.1 Reformulations et chemins de similarité

Dans les sections précédentes, le RÀPC s'appuie sur une adaptation par spécialisation de la solution. Un système de RÀPC peut exploiter des processus d'adaptation plus sophistiqués. Pour une remémoration correcte vis-à-vis de l'adaptation, srce et cible sont similaires s'il existe des connaissances d'adaptation permettant d'inférer une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible à partir d'une solution $\text{Sol}(\text{srce})$ de srce . Cette connaissance est définie dans notre modèle par un ensemble de *reformulations* [Melis *et al.*, 1998] :

Définition 4 Une reformulation est un couple (r, \mathcal{A}_r) , r étant une relation binaire entre problèmes et \mathcal{A}_r étant une fonction partielle ayant le même profil que *Adaptation* (cf. (5.1)), qui est calculable et telle que :

si srce et cible sont liés par $r(\text{srce} \text{ r } \text{cible})$

alors toute solution $\text{Sol}(\text{srce})$ de srce peut être adaptée en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible

$$\text{par } \mathcal{A}_r, \text{ i.e. } \mathcal{A}_r(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}) = \text{Sol}(\text{cible}) \quad (6.15)$$

Par exemple, $(\sqsupseteq, \text{Spécialisation})$ est une reformulation s'appuyant sur la propriété (6.2') : $\mathcal{A}_{\sqsupseteq} = \text{Spécialisation}$.

La classification élastique s'appuie également sur la notion de chemin de similarité, qui est une représentation explicite de la façon d'adapter une solution d'un problème srce pour résoudre un problème cible . Un tel chemin de similarité $\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})$ est une séquence

$$\text{srce} = \text{pb}_0 \text{ r}_1 \text{ pb}_1 \text{ r}_2 \text{ pb}_2 \dots \text{pb}_{q-1} \text{ r}_q \text{ pb}_q = \text{cible}$$

telle que tout (r_i, \mathcal{A}_{r_i}) est une reformulation. L'adaptation peut alors être effectuée en une séquence de q étapes, appelée *chemin de modification* :

- 1°/ adaptation de $\text{Sol}(\text{srce}) = \text{Sol}(\text{pb}_0)$ en une solution $\text{Sol}(\text{pb}_1)$ de pb_1 , grâce à \mathcal{A}_{r_1} ,
- 2°/ adaptation de $\text{Sol}(\text{pb}_1)$ en une solution $\text{Sol}(\text{pb}_2)$ de pb_2 , grâce à \mathcal{A}_{r_2} ,
- ...
- q° / adaptation de $\text{Sol}(\text{pb}_{q-1})$ en une solution $\text{Sol}(\text{pb}_q) = \text{Sol}(\text{cible})$ de $\text{pb}_q = \text{cible}$, grâce à \mathcal{A}_{r_q} .

La fonction qui réalise ce chemin de modification est dénotée par $\mathcal{A}_{r_q \circ \dots \circ r_2 \circ r_1}$, $r_q \circ \dots \circ r_2 \circ r_1$ étant la composition des r_i .

6.3.2 Spécification de la classification élastique

La classification élastique est un processus de remémoration qui prend en entrée un problème *cible* et retourne non seulement un cas source $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ mais aussi, un chemin de similarité liant *srce* à *cible* et qui représente la façon d'adapter $\text{Sol}(\text{srce})$ afin de résoudre *cible*.

Étant donné $\text{srce}, \text{cible} \in \text{Problèmes}$, il peut y avoir 0, 1 ou plusieurs chemins de similarité liant ces deux problèmes. Dans le dernier cas, il est nécessaire d'ordonner ces chemins de similarité selon un certain critère de préférence. De façon idéale, dans un ensemble de chemins de similarité, celui qui doit être préféré est celui qui donnera la *meilleure adaptation* i.e., celui qui donnera la solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de meilleure qualité (dans un sens qui est supposé dépendant de l'application particulière du RÀPC et qui peut être lié, par exemple, à la précision ou à l'incertitude de cette solution vis-à-vis du problème). Avec l'idée selon laquelle chaque étape de l'adaptation peut dégrader cette qualité, nous supposons que plus court est le chemin de similarité, meilleure est l'adaptation. Pour tenir compte du fait que certaines étapes du chemin de modification peuvent entraîner plus de dégradation de la qualité que d'autres, la longueur de ce chemin est pondérée : à chaque reformulation (r, \mathcal{A}_r) , une valeur $P_r \geq 0$ est associée et, pour un chemin de similarité $\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})$ s'appuyant sur les relations r_1, r_2, \dots, r_q , la longueur de $\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})$ est définie par :

$$\text{longueur}(\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})) = \sum_{i=1}^q P_{r_i}$$

Si la spécialisation de solution *Spécialisation* est supposée ne pas entraîner de baisse de qualité, alors $P_{\square} = 0$ (voir (6.2')).

Soit *diss* la mesure de dissimilarité sur *Problèmes* définie par

$$\text{diss}(\text{srce}, \text{cible}) = \inf\{\text{longueur}(\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})) \mid \text{sim}(\text{srce}, \text{cible}) : \text{chemin de similarité liant srce à cible}\} \quad (6.16)$$

avec la convention $\inf \emptyset = +\infty$: $\text{diss}(\text{srce}, \text{cible}) = +\infty$ ssi il n'existe pas de chemin de similarité liant *srce* à *cible*. À présent, la spécification de la classification élastique peut être précisée. Étant donné $\text{cible} \in \text{Problèmes}$, l'objectif de la classification élastique est de trouver $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce})) \in \text{BaseDeCas}$ et un chemin de similarité $\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})$ reliant *srce* à *cible* tel que :

$$\text{longueur}(\text{sim}(\text{srce}, \text{cible})) = \text{diss}(\text{srce}, \text{cible}) = \min_{(\text{srce}', \text{Sol}(\text{srce}')) \in \text{BaseDeCas}} \text{diss}(\text{srce}', \text{cible})$$

Soit \mathcal{S} la mesure de similarité définie par $\mathcal{S}(\text{srce}, \text{cible}) = 1/(1 + \text{diss}(\text{srce}, \text{cible})) \in [0; 1]$. Maximiser $\mathcal{S}(\text{srce}, \text{cible})$ est équivalent à minimiser $\text{diss}(\text{srce}, \text{cible})$. Comme c'était le cas pour la classification floue, $s = \mathcal{S}(\text{srce}, \text{cible})$ est une mesure de la qualité de la solution adaptée vis-à-vis

du problème cible : on dira que $\text{Sol}(\text{cible})$ est une s -solution de cible . La règle d'inférence suivante résume la classification élastique et l'adaptation qui la suit :

$$\frac{\mathcal{S}(\text{srce}, \text{cible}) = s \quad \text{srce } r_q \circ \dots \circ r_2 \circ r_1 \text{ cible} \quad \text{Sol}(\text{srce}) \text{ est une solution de srce}}{\mathcal{A}_{r_q \circ \dots \circ r_2 \circ r_1}(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}) \text{ est une } s\text{-solution de cible}} \quad (6.17)$$

6.3.3 Un algorithme de classification élastique

Les règles d'inférences pour les classifications floue et élastique ont été écrites de façon à mettre en évidence leur ressemblance. En effet, en substituant dans la règle d'inférence (6.14) F_{\sqsubseteq} par \mathcal{S} et Spécialisation par $\mathcal{A}_{r_q \circ \dots \circ r_2 \circ r_1}$, et en ajoutant le chemin de similarité reliant srce à cible , la règle d'inférence (6.17) est obtenue. De façon similaire, la fonction principale de la classification élastique peut être obtenue à partir de l'algorithme de la classification floue (figure 6.3) par les transformations suivantes :

- (a) F_{\sqsubseteq} est substitué par \mathcal{S} (ligne 6).
- (b) Le calcul de $\mathcal{S}(\text{pb}, \text{cible})$ et du chemin de similarité optimal $\text{sim}(\text{pb}, \text{cible})$ est effectué dans un seul processus, appelé *appariement*, qui retourne ces deux valeurs (ligne 6).
- (c) À la place de pb , le couple $(\text{pb}, \text{sim}(\text{pb}, \text{cible}))$ est retourné (ligne 9).

L'algorithme s'appuie donc sur une fonction d'appariement qui, étant donné deux problèmes, retourne le chemin de similarité optimal les liant (et la longueur de ce chemin). Un chemin de similarité est un chemin dans l'espace $(\text{Problèmes}, \mathcal{R})$, où \mathcal{R} est l'ensemble des r telles que (r, \mathcal{A}_r) est une reformulation disponible (i.e., un élément de l'ensemble des reformulations qui constitue la connaissance d'adaptation disponible). Il y a beaucoup de techniques pour trouver un tel chemin optimal et leur choix dépend de la structure de l'espace. L'exemple de l'appariement de RÉSYN/RÀPC est présenté à la section 6.4.2.

Si la propriété (6.12) est valide pour $F_{\sqsubseteq} = \mathcal{S}$, les problèmes de \mathcal{H}_{pb} sont toujours considérés avec une similarité à cible décroissante. C'est le cas pour RÉSYN/RÀPC, en particulier grâce à l'utilisation de la reformulation $(\sqsubseteq, \text{Spécialisation})$. Cela entraîne que plus le problème courant devient spécifique dans la hiérarchie \mathcal{H}_{pb} , plus le chemin de similarité sera long et moins bonne la solution finale sera. Autrement dit, les cas sources qui donneront les meilleures solutions de cible seront découverts en premier.

Correction de la classification élastique. La classification élastique est correcte vis-à-vis de l'adaptation. En effet, elle garantit que le cas remémoré est adaptable en une solution du problème cible en rendant explicite le « mode d'emploi » de cette adaptation, à savoir, le chemin de similarité.

Combinaison des classifications floue et élastique. Les classifications floue et élastique sont deux extensions différentes de la classification dure. On peut envisager de les combiner. Une façon de faire serait de tenir compte, dans le modèle de la classification élastique, des reformulations $(\sqsubseteq_{\alpha}, \text{Spécialisation})$, pour $\alpha \in [\sigma_{\sqsubseteq}; 1]$. Plus α est grand, plus le poids $P_{\sqsubseteq_{\alpha}}$ sera faible et, en particulier, $P_{\sqsubseteq_1} = P_{\sqsubseteq} = 0$.

6.4 Implantation des classifications dure et élastique dans RÉSYN/RÀPC

Pour la mise en œuvre des algorithmes présentés ci-dessus, quelques problèmes d'implantation doivent être étudiés. Ceux relatifs à KASIMIR sont présentés au chapitre 8. Nous allons rapidement évoquer ceux de RÉSYN/RÀPC dans cette section à travers la représentation et l'indexation des cas (section 6.4.1) et l'appariement de deux problèmes par un chemin de similarité (section 6.4.2).

6.4.1 Représentation et indexation des cas de RÉSYN/RÀPC

Le problème de la représentation des graphes moléculaires et de la relation de subsumption qui permet de les comparer ne s'est pas posé pour RÉSYN/RÀPC : en fait, j'ai bénéficié de travaux de recherches qui étaient préliminaires au projet TICCO, en particulier de [Napoli, 1992b] et de [Vismara *et al.*, 1992].

RÉSYN/RÀPC et KASIMIR ont bénéficié d'études sur les représentations de connaissances par objets (RCO [Napoli *et al.*, 1994]) et les logiques de descriptions (LD [Baader *et al.*, 2003]). En effet, pour les deux applications, les cas sont représentés à l'aide de *concepts*. Un concept C est une formule d'un langage de représentation qui s'interprète comme un ensemble. Plus précisément, pour une interprétation \mathcal{I} , C s'interprète comme un sous-ensemble $C^{\mathcal{I}}$ du domaine d'interprétation associé à \mathcal{I} , $\Delta_{\mathcal{I}}$. Étant donné deux concepts C et D , on dira que C *subsume* D si $C^{\mathcal{I}} \supseteq D^{\mathcal{I}}$, pour tout \mathcal{I} .

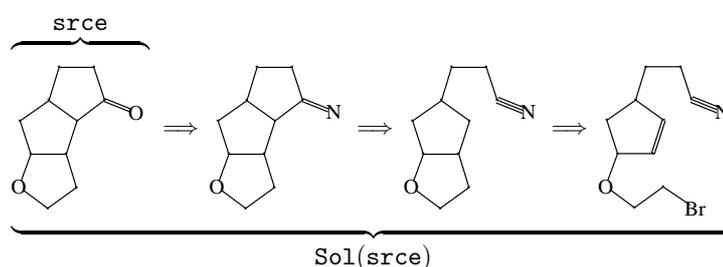


FIG. 6.5 – Un plan de synthèse, formant un cas ($srce$, $Sol(srce)$). Les graphes moléculaires sont étiquetés sur les sommets par des types d'atomes (O pour oxygène, N pour azote, Br pour brome, etc., les sommets non étiquetés étant des carbones) et sur les arêtes par des types de liaisons (simple, double et triple, représentés par des lignes simples, doubles et triples). Étant donné deux graphes S_i et S_{i+1} de $Sol(srce)$, $S_i \Rightarrow S_{i+1}$ signifie que S_i peut être obtenu à partir de S_{i+1} par une réaction chimique (l'expression $S_i \Rightarrow S_{i+1}$ s'appelle une transformation dans la théorie de la rétrosynthèse [Corey et Cheng, 1989; Laurenço, 1985]).

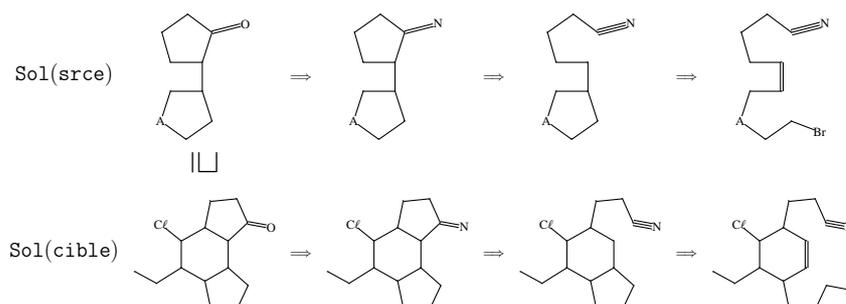


FIG. 6.6 – Une spécialisation d'un plan de synthèse. Le graphe S_0 associé à $srce$ est une sous-structure du graphe C_0 associé à $cible$ (A étant le symbole de l'atome générique). La spécialisation consiste intuitivement à ajouter, à chaque graphe S_i de $Sol(srce)$, les informations qui font la différence entre S_0 et C_0 , afin de construire un graphe C_i , composant du plan $Sol(cible)$.

Dans RÉSYN/RÀPC, étant donné un cas (pb , $Sol(pb)$), pb est représenté par un concept C dans le formalisme des graphes moléculaires (qui peut être rapproché du formalisme des graphes conceptuels [Sowa, 1984]) : un tel graphe est non orienté et ses sommets (resp., ses arêtes) représentent des

atomes (resp., des liaisons) et sont étiquetés par des types d'atomes (resp., par des types de liaison). Les types d'atomes et de liaisons sont organisés hiérarchiquement selon leur généralité ; par exemple, la hiérarchie des types d'atomes indique que le type « atome générique », de symbole A et correspondant à n'importe quel atome, est plus général que le type « carbone ». Soit \mathcal{I} une interprétation. Pour RÉSYN/RÀPC, $\Delta_{\mathcal{I}}$ est un ensemble de graphes moléculaires G . Soit C un concept (i.e., un graphe moléculaire). $C^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta_{\mathcal{I}}$ est l'ensemble des graphes $G \in \Delta_{\mathcal{I}}$ tels que C est une *sous-structure* de G ; plus formellement, G est tel qu'il existe un isomorphisme de sous-graphe partiel φ de C dans G tel que pour tout sommet a (resp., pour toute arête ℓ) de C , le type de $\varphi(a)$ (resp., de $\varphi(\ell)$) est plus spécifique ou égal au type de a (resp., de ℓ) selon la hiérarchie des types d'atomes (resp., de liaisons). C subsume D si $C^{\mathcal{I}} \supseteq D^{\mathcal{I}}$ pour tout \mathcal{I} , et on peut montrer que c'est équivalent au fait que C soit une sous-structure de D .

pb représente le problème « Comment la structure moléculaire C peut-elle être construite ? » $\text{Sol}(\text{pb})$ est un plan de synthèse pour C , i.e., un ensemble de réactions chimiques représentant comment la structure du graphe C peut être construite, en accord avec les lois de la chimie. La figure 6.5 montre un exemple de cas de RÉSYN/RÀPC. Soit srce et cible deux problèmes de RÉSYN/RÀPC représentés par deux graphes C et D . La relation \sqsubseteq est définie par $\text{srce} \sqsubseteq \text{cible}$ si C subsume D . Cela est cohérent avec (6.2'), si la spécialisation de $\text{Sol}(\text{srce})$ en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible consiste à appliquer, à chaque étape du plan $\text{Sol}(\text{srce})$, les modifications structurelles de la réaction chimique sur cible . La figure 6.6 montre un exemple d'une telle spécialisation.

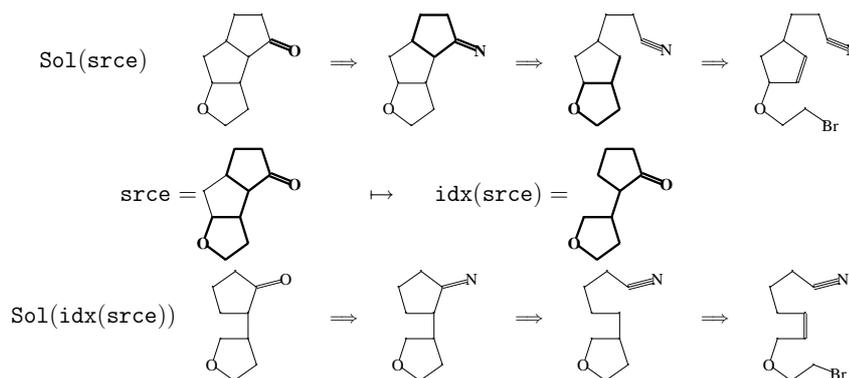


FIG. 6.7 – Indexation d'un plan de synthèse $\text{Sol}(\text{srce})$. Pour chaque transformation $S_i \implies S_{i+1}$ de $\text{Sol}(\text{srce})$, la partie de S_i dessinée en gras indique quelles structures chimiques (liaisons, cycles, etc.) ont été construits. Puis, ces parties en gras sont reportées sur le graphe S_0 représentant srce (deuxième ligne). $\text{idx}(\text{srce})$ est représenté par le graphe I_0 obtenu en gardant dans S_0 la part en gras. La troisième ligne montre le plan généralisé $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$.

Comme cela a été mentionné à la section 6.1, les cas sources de RÉSYN/RÀPC (srce , $\text{Sol}(\text{srce})$) sont indexés par des problèmes $\text{idx}(\text{srce})$ plus généraux que srce : $\text{srce} \sqsubseteq \text{idx}(\text{srce})$. Ce processus de généralisation dans l'espace des problèmes, l'indexation, est contraint par le fait que $\text{Sol}(\text{srce})$ doit être généralisée en une solution $\text{Sol}(\text{idx}(\text{srce}))$ de $\text{idx}(\text{srce})$ dans l'espace des solutions. Cela signifie intuitivement que, avec S_0 et I_0 les graphes moléculaires représentant srce et $\text{idx}(\text{srce})$, I_0 contient la structure de S_0 qui est effectivement construite par le plan de synthèse $\text{Sol}(\text{srce})$. La figure 6.7 illustre cette indexation. Cette façon d'indexer des cas sources peut être rapprochée de l'opération qui calcule les « empreintes » (*footprints*) d'un état initial pour le planificateur à partir de cas PRODIGY/ANALOGY [Velooso, 1994] : dans cette application, étant donné un plan source et la description de l'état initial init de ce plan, une empreinte est construite en ne retenant de init que les conditions qui sont nécessaires à l'exécution de chaque opérateur du plan.

6.4.2 Reformulations, chemins de similarité et appariement dans RÉSYN/RÀPC

Les reformulations de RÉSYN/RÀPC entrent dans un cadre plus vaste et seront décrites aux sections 7.3.1 et 7.3.2 du chapitre suivant. Nous nous contenterons ici de la présentation simplifiée de deux d'entre elles : $(\rightarrow_g, \mathcal{A}_{\rightarrow_g})$ et $(\leftarrow_{apt}, \mathcal{A}_{\leftarrow_{apt}})$. \rightarrow_g est une relation s'appuyant sur la règle de généralisation $g : \text{srce} \rightarrow_g \text{cible}$ entraîne $\text{srce} \sqsubseteq \text{cible}$ et le fait que $\text{Sol}(\text{srce})$ soit généralisable en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de cible . \leftarrow_{apt} a la propriété suivante : si $\text{C}' \leftarrow_{apt} \text{C}$, où C et C' sont deux graphes moléculaires, alors la transformation $\text{C} \Rightarrow \text{C}'$ est chimiquement réalisable, à un coût raisonnable (cette relation s'appuie sur des connaissances générales concernant les transformations [Sparfel, 1992]). Par conséquent, si $\text{srce} \rightarrow_g \text{cible}$, alors le plan de synthèse $\text{Sol}(\text{srce})$ peut être adapté en un plan de synthèse $\text{Sol}(\text{cible})$ obtenu en ajoutant à $\text{Sol}(\text{srce})$ la transformation $\text{cible} \Rightarrow \text{srce}$.

Par conséquent, dans RÉSYN/RÀPC, un chemin de similarité est construit sur la base des reformulations $(\sqsubseteq, \mathcal{A}_{\sqsubseteq})$ (pour l'indexation), $(\rightarrow_g, \mathcal{A}_{\rightarrow_g})$ (pour chaque règle de généralisation g), $(\sqsupseteq, \mathcal{A}_{\sqsupseteq})$ et $(\leftarrow_{apt}, \mathcal{A}_{\leftarrow_{apt}})$. Soit \mathcal{R} l'ensemble des relations r de ces reformulations (r, \mathcal{A}_r) . Théoriquement, un chemin de similarité peut être une composition de n'importe quelles relations de \mathcal{R} . Cependant, le processus d'appariement implanté dans RÉSYN/RÀPC ne construit que des chemins de similarité de la forme :

$$\text{srce} \sqsubseteq \text{idx}(\text{srce}) = \text{I}^0 \xrightarrow{g_1} \text{I}^1 \xrightarrow{g_2} \text{I}^2 \dots \xrightarrow{g_m} \text{I}^m \sqsupseteq \text{C}^n \leftarrow_{apt} \dots \text{C}^2 \leftarrow_{apt} \text{C}^1 \leftarrow_{apt} \text{C}^0 = \text{cible}$$

où g_i est une règle de généralisation (pour $1 \leq i \leq m$) (6.18)

Sous l'hypothèse selon laquelle la composition de ces relations $r \in \mathcal{R}$ est commutative (i.e., pour tout $r, s \in \mathcal{R}$, $r \circ s = s \circ r$), cette restriction ne modifie pas la propriété d'adaptabilité de chaque cas $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$ pour un problème cible : l'existence d'un chemin de similarité de srce à cible entraîne l'existence d'un chemin de similarité de srce à cible qui ait la forme (6.18).

L'appariement qui a été implanté pour RÉSYN/RÀPC et qui construit des chemins de similarité de la forme (6.18) s'appuie sur une recherche A^* [Pearl, 1984]. Pour une telle recherche,

- Un état est un couple de problèmes (I, C) ;
- L'état initial est $(\text{I}^0, \text{C}^0) = (\text{idx}(\text{srce}), \text{cible})$;
- Un état final est un état (I^f, C^f) tel que $\text{I}^f \sqsupseteq \text{C}^f$;
- Les successeurs d'un état (I, C) sont les états (I', C) et les états (I, C') avec I' (resp. C') tel que $\text{I} \rightarrow_g \text{I}'$ pour $\rightarrow_g \in \mathcal{R}$ (resp. $\text{C}' \leftarrow_{apt} \text{C}$).
- L'heuristique qui évalue le nombre de transitions de l'état courant à un état but n'est pas discutée ici.

La figure 6.8 illustre cette recherche. Une fois un état final (I^f, C^f) trouvé, un chemin de similarité peut être construit par concaténation de « $\text{srce} \sqsubseteq \text{idx}(\text{srce})$ », de l'application des g de gauche à droite, de « $\text{I}^f \sqsupseteq \text{C}^f$ » et de l'application de \leftarrow_{apt} de droite à gauche.

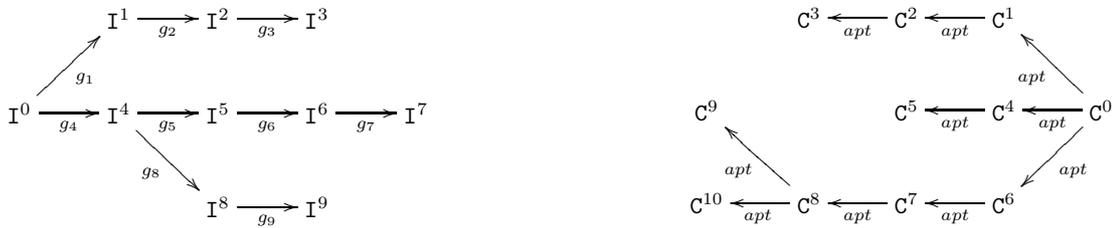


FIG. 6.8 – Recherche d'un chemin de similarité.

La figure 6.9 montre le résultat de l'appariement de RÉSYN/RÀPC (i.e., un chemin de similarité) et le processus d'adaptation (i.e., chemin de modification) qui lui est associé.

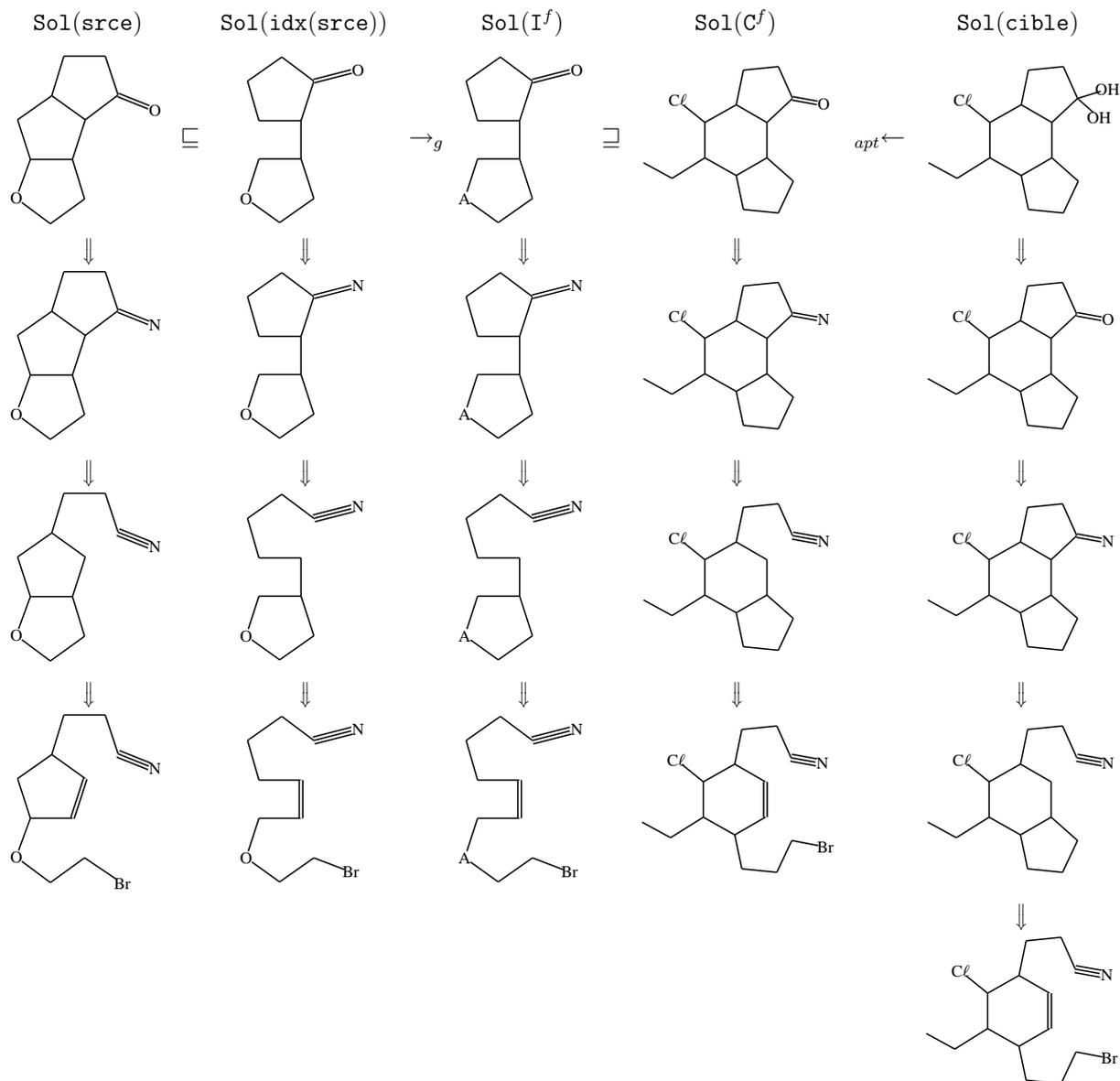


FIG. 6.9 – Un chemin de similarité de RÉSYN/RÀPC et le chemin de modification correspondant. Le chemin de similarité reliant *srce* à *cible* est sur la première ligne. Les plans de synthèse solutions sont affichés verticalement (la première colonne représente $Sol(srce)$). $Sol(srce)$ est généralisé successivement en $Sol(idx(srce))$ puis en $Sol(I^f)$, qui est spécialisé en $Sol(C^f)$. Enfin, $Sol(cible)$ est obtenu par rajout d'une transformation en tête du plan $Sol(C^f)$.

Chapitre 7

Travaux sur l'adaptation

L'objectif de l'adaptation est simple à comprendre : on modifie le cas remémoré afin de résoudre le problème cible. En revanche, l'implantation d'une fonction d'adaptation ou, simplement, sa spécification, sont plus difficiles. Nous présentons dans ce chapitre trois directions pour appréhender l'adaptation. Les démarches unificatrices visent à proposer des modèles généraux de l'adaptation sous différents angles (principes, algorithmes, etc.) et peuvent aider un concepteur de système de RÀPC à mieux appréhender l'adaptation dans sa globalité (section 7.1). Les démarches d'acquisition de connaissances d'adaptation considèrent l'adaptation dans le cadre d'un domaine d'application donné et visent à mettre en évidence des principes généraux destinés non à l'adaptation elle-même, mais aux moyens de l'explicitier dans le domaine d'application considéré (section 7.2). Enfin, certains travaux visent à mettre en évidence des catalogues de stratégies d'adaptation qui sont susceptibles de s'appliquer à plusieurs domaines (section 7.3).

Ce chapitre ne fait pas un tour d'horizon des recherches sur l'adaptation en RÀPC mais met en évidence des idées, principes et méthodes que nous avons étudiées et qui, nous l'espérons, pourront éclairer de futurs concepteurs de systèmes de RÀPC.

Ce chapitre présente une synthèse de différents travaux que nous avons effectués dans divers cadres.
--

Précaution d'emploi. Ce chapitre et le suivant contiennent plusieurs exemples en lien avec la cancérologie. Ces exemples sont parfois simplificateurs et/ou obsolètes et ne sauraient être considérés comme médicalement corrects et à jour.

7.1 Démarches unificatrices de l'adaptation

7.1.1 Adaptation et raisonnement par analogie

Les notions présentées dans cette section sont issues de travaux sur le raisonnement par analogie qui ont leur utilité pour l'adaptation en RÀPC.

Adaptation et analogie intra-domaine. L'adaptation est considérée comme un raisonnement par analogie *intra-domaine*, par opposition à un raisonnement par analogie *inter-domaines* [Coulon *et al.*, 1990]. Cela signifie que, pour un système de RÀPC donné, il existe un domaine bien déterminé auquel appartiennent tous les cas. Par opposition, un exemple classique d'analogie inter-domaines met en correspondance la gravitation universelle et l'attraction électrostatique : par exemple, des propriétés du système Terre-Lune peuvent être *transférées* au système de l'atome d'hydrogène du modèle de Rutherford. On peut objecter à cet exemple qu'il existe bien un domaine englobant les deux situations : celui des systèmes physiques à forces en $1/r^2$. Si on se « place » d'emblée dans ce domaine englobant, l'analogie

sera intra-domaine, sinon elle sera inter-domaines. Dans ces travaux sur l'analogie, l'accent est mis sur le *transfert analogique* qui consiste à reproduire le plus fidèlement possible dans la cible les relations existant dans la source [Forbus et Gentner, 1986].

Adaptation et carré d'analogie. Un problème d'adaptation est donné par un triplet $(srce, Sol(srce), cible)$ — où $(srce, Sol(srce))$ est le cas à adapter (c'est donc aussi, en principe, le cas remémoré). Une solution d'un problème d'adaptation est une solution $Sol(cible)$ du problème cible. On symbolise un tel problème par le diagramme suivant, appelé « carré d'analogie » :

$$\begin{array}{ccc}
 srce & \xrightarrow{\Delta_{pb}} & cible \\
 \beta_{srce} \downarrow & & \downarrow \beta_{cible} ? \\
 Sol(srce) & \xrightarrow{\Delta_{sol}} & Sol(cible)?
 \end{array} \tag{7.1}$$

Ce carré permet de poser le problème de l'adaptation. Il a été présenté dans [Chouraqui, 1986] puis a été repris par [Py, 1994] (dans ces articles, Δ se note α). Les Δ (Δ_{pb} et Δ_{sol}) sont des liens entre sources et cibles. Δ_{pb} est l'*appariement* entre problèmes. Il code des informations sur les liens entre $srce$ et $cible$. En particulier, il répond, au moins en partie, aux questions « En quoi ces problèmes sont-ils similaires ? », « En quoi diffèrent-ils ? » ou encore « Comment *varie* le problème lors du passage de $srce$ à $cible$? » Δ_{pb} peut être un chemin de similarité. Δ_{sol} relie la solution $Sol(srce)$ et la solution $Sol(cible)$ (encore inconnue à ce stade). Les β sont des *dépendances* : ils représentent ce qui est connu des liens entre un problème et une solution. β_{srce} peut être inféré au moment de l'adaptation, mais peut également être associé au cas source dès son acquisition.

Adaptations par transformation et par dérivation. L'adaptation par transformation et, plus généralement, l'analogie par transformation (*transformational analogy* [Carbonell, 1983]), peut être vue comme une première lecture du carré d'analogie :

$$\underbrace{Sol(cible) \text{ est à } Sol(srce)}_{\Delta_{sol}} \text{ ce que } \underbrace{cible \text{ est à } srce}_{\Delta_{pb}}$$

connaissant $srce, cible$ et $Sol(srce)$, que vaut $Sol(cible)$?

Nous proposons de décrire une adaptation par transformation en trois étapes :

(AT-1) $(srce, cible) \mapsto \Delta_{pb}$;

(AT-2) $(CA, \Delta_{pb}) \mapsto \Delta_{sol}$, où CA dénote les connaissances d'adaptation disponibles ;

(AT-3) $(Sol(srce), \Delta_{sol}) \mapsto Sol(cible)$.

Notons que ce modèle est schématique, en particulier parce que Δ_{pb} peut également dépendre de $Sol(srce)$ et de β_{srce} : si une caractéristique particulière de $srce$ ne joue aucun rôle dans la résolution du problème source, il est inopportun de la considérer dans l'appariement Δ_{pb} . Cela rejoint le point sur l'indexation de RÉSYN/RÀPC traité à la section 6.4.1 : l'index ne retient de $srce$ que ce qui est susceptible de jouer un problème dans la résolution de problème $srce \mapsto Sol(srce)$.

L'adaptation par dérivation et, plus généralement, l'analogie par dérivation (*derivational analogy* [Carbonell, 1986]) peut être vue comme une deuxième lecture du carré d'analogie :

$$\underbrace{Sol(cible) \text{ est à } cible}_{\beta_{cible}} \text{ ce que } \underbrace{Sol(srce) \text{ est à } srce}_{\beta_{srce}}$$

connaissant $srce, cible$ et $Sol(srce)$, que vaut $Sol(cible)$?

Nous proposons de décrire une adaptation par dérivation en cinq étapes :

(AD-0) $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce})) \mapsto \beta_{\text{srce}}$;

(AD-1) $(\text{srce}, \text{cible}) \mapsto \Delta\text{pb}$;

(AD-2) $(\text{CA}, \Delta\text{pb}) \mapsto \Delta\beta$;

(AD-3) $(\beta_{\text{srce}}, \Delta\beta) \mapsto \beta_{\text{cible}}$;

(AD-4) $(\text{cible}, \beta_{\text{cible}}) \mapsto \text{Sol}(\text{cible})$.

Si on adhère à cette description en cinq étapes, on peut considérer que l'adaptation par dérivation s'appuie sur une adaptation par transformation sur les dépendances : (AD-1), (AD-2) et (AD-3) correspondent respectivement à (AT-1), (AT-2) et (AT-3), si les solutions sont substituées par des dépendances.

7.1.2 Décompositions de l'adaptation

Une approche pour aborder l'adaptation, quand elle est supposée complexe, est de la décomposer. Deux approches de cette décomposition ont été étudiées.

7.1.2.1 Décomposition horizontale et chemins de similarité

Si on reprend le carré d'analogie (7.1) et qu'on le découpe en tranches selon son horizontale, on peut obtenir ceci :

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{srce} = \text{pb}_0 & \xrightarrow{r_1} & \text{pb}_1 & \xrightarrow{r_2} & \text{pb}_2 & \dots & \text{pb}_{q-1} \xrightarrow{r_q} \text{pb}_q = \text{cible} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \text{Sol}(\text{srce}) = \text{Sol}(\text{pb}_0) & \xrightarrow{\mathcal{A}_{r_1}} & \text{Sol}(\text{pb}_1) & \xrightarrow{\mathcal{A}_{r_2}} & \text{Sol}(\text{pb}_2) & \dots & \text{Sol}(\text{pb}_{q-1}) \xrightarrow{\mathcal{A}_{r_q}} \text{Sol}(\text{pb}_q) = \text{Sol}(\text{cible})
 \end{array}$$

Ce schéma est celui de l'adaptation selon un chemin de similarité présentée au chapitre 6 : il contient un chemin de similarité reliant srce à cible et un chemin de modification reliant $\text{Sol}(\text{srce})$ à $\text{Sol}(\text{cible})$. Les q étapes d'adaptation s'appuient sur les reformulations (r_i, \mathcal{A}_{r_i}) . Cette décomposition permet de combiner des connaissances d'adaptation de natures diverses, pourvu qu'elles puissent être chacune représentée par une reformulation (plus de détails et des exemples sont présentés dans [Lieber, 1999b]).

Dans [Lieber, 1999a], est présenté un parallèle entre la décomposition de l'adaptation par chemins de similarité et la méthode d'Euler pour l'intégration approchée des équations différentielles de la forme $y' = F(x, y)$. Nous en présentons ci-dessous une version simplifiée aux équations $y' = f(x)$, dont l'intégration équivaut au calcul d'une primitive de f . Soit $[a; b]$, un intervalle de \mathbb{R} . Soit $y : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$, une application C^∞ (ou, en tout cas, « suffisamment régulière »). En un point $x_i \in [a; b]$, on définit la fonction différentielle dy par

$$dy = y'(x_i)dx \quad (7.2)$$

où $dx : x \in \mathbb{R} \mapsto x$. Soit $x_{i+1} \in [a; b]$, « proche » de x_i . (7.2) conduit à l'égalité approximative

$$\Delta y \simeq y'(x_i)\Delta x \quad \text{où } \Delta x = x_{i+1} - x_i \text{ et } \Delta y = y(x_{i+1}) - y(x_i) \quad (7)$$

D'où

$$y(x_{i+1}) \simeq y(x_i) + y'(x_i)(x_{i+1} - x_i) \quad (7.3)$$

⁷Un développement de Taylor-Lagrange donnera une majoration de l'erreur par $\frac{M_2}{2}(x_{i+1} - x_i)^2$ où M_2 est un majorant de $|y''|$ sur $[a; b]$. Si on veut que ce majorant de l'erreur soit inférieur à un ε donné, il suffit que $|x_{i+1} - x_i| \leq \sqrt{\frac{2\varepsilon}{M_2}}$, ce qui permet de modéliser la notion de proximité entre x_i et x_{i+1} : ε étant fixé, x_{i+1} est *proche* de x_i si cette inégalité est respectée.

Soit $x^s, x^c \in [a; b]$. $y(x^s)$ étant supposé connu, on cherche à connaître une valeur approchée de $y(x^c)$. On peut voir cela comme un problème d'adaptation : Problèmes = $[a; b]$, Solutions = \mathbb{R} , pb \in Problèmes a pour solution sol $\in \mathbb{R}$ si sol est une valeur approchée de $y(\text{pb})$, $(x^s, y(x^s))$ est le cas source à adapter, x^c est le problème cible. Si x^s et x^c ne sont pas suffisamment proches pour appliquer directement (7.3), avec $x_i = x^s$ et $x_{i+1} = x^c$, on peut découper régulièrement $[x^s; x^c]$ en q intervalles $[x_i; x_{i+1}]$ ($i \in \{0, 1, \dots, q-1\}$, $x_0 = x^s$, $x_q = x^c$, $x_{i+1} = x_i + \frac{x^c - x^s}{q}$). On peut alors appliquer q fois (7.3), avec $y_0 = y(x_0)$:

$$y_1 = y_0 + y'(x_0) \frac{x^c - x^s}{q} \quad \text{est une valeur approchée de } y(x_1)$$

$$\dots$$

$$y_q = y_{q-1} + y'(x_{q-1}) \frac{x^c - x^s}{q} \quad \text{est une valeur approchée de } y(x_q) = y(x^c) \quad (8)$$

avec $y'(x_i) = f(x_i)$ pour $i \in \{0, 1, \dots, q-1\}$. Ce calcul est l'application de la méthode d'Euler et permet d'obtenir une valeur approchée de $\int_{x^s}^{x^c} f(x)dx = \int_{x^s}^{x^c} y'(x)dx = y(x^c) - y(x^s)$. On peut le voir comme une adaptation le long d'un chemin de similarité reliant srce = x^s à cible = x^c , sachant que la connaissance donnée par la reformulation (r_i, \mathcal{A}_{r_i}) correspond à la valeur $f(x_i) = y'(x_i)$ qui indique comment, au voisinage de x_i , la solution y varie avec le problème x . Plus précisément, \mathcal{A}_{r_i} est défini par

$$\mathcal{A}_{r_i} : ((x_i, y_i), x_{i+1}) \mapsto y_{i+1} = y_i + f(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i)$$

On peut associer à (r_i, \mathcal{A}_{r_i}) un poids P_{r_i} (cf. section 6.3.2) égal à un majorant de l'erreur introduite par \mathcal{A}_{r_i} . Par exemple, $P_{r_i} = \frac{M_2}{2} \left(\frac{x^c - x^s}{q} \right)^2$.

7.1.2.2 Décompositions verticales

Deux approches de la décomposition verticale de l'adaptation sont décrites. La première s'appuie, comme ci-dessus, sur la métaphore de la différentielle dy . La seconde, sur la notion de point de vue. Toutes deux correspondent à une décomposition des problèmes et des solutions en lien avec leur représentation. Toutes deux peuvent se combiner avec une décomposition horizontale.

La métaphore des différentielles : le retour.

Une collaboration avec Béatrice Fuchs, Alain Mille et Amedeo Napoli, toujours en cours, a pour objectif la modélisation de l'adaptation.

L'approche de l'adaptation décrite dans [Fuchs *et al.*, 2000; Fuchs *et al.*, 2001] peut être comprise à l'aide de la métaphore des différentielles. Étant donné une application $C^\infty y$ de \mathbb{R}^m dans \mathbb{R}^n , et un point $x^s \in \mathbb{R}^m$, on définit la fonction différentielle en x^s par $dy = (dy_1, dy_2, \dots, dy_n)$ avec :

$$dy_j = \sum_i \frac{\partial y_j}{\partial x_i} dx_i$$

⁸L'erreur est majorée par $\frac{M_2(x^c - x^s)^2}{2q}$.

On peut effectuer une approximation linéaire de y en un point x^c « proche » de x^s par :

$$\Delta y_j \simeq \sum_i \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \Delta x_i \quad \text{où } \Delta y_j = y_j(x^c) - y_j(x^s) \text{ et } \Delta x_i = x_i^c - x_i^s$$

$$\text{d'où } y_j(x^c) \simeq y_j(x^s) + \sum_i \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \Delta x_i$$

Si Problèmes = \mathbb{R}^m , Solutions = \mathbb{R}^n et que le lien entre problèmes et solutions est matérialisé par la fonction y (x a pour solution $y(x)$) cela permet, étant donné un cas remémoré ($x^s, y(x^s)$) et un problème cible x^c , de calculer une valeur approchée de la solution $y(x^c)$.

Dans un cadre plus général, on suppose que les problèmes et les solutions sont décrits par des ensembles de *descripteurs* : pb = $\{x_i\}_i$ et sol = $\{y_j\}_j$ pour pb \in Problèmes et sol \in Solutions. De plus, on suppose qu'à chaque cas source (srce, Sol(srce)) est associée une dépendance $\beta_{\text{srce}} = \left\{ \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \right\}_{ij}$ où $\frac{\partial y_j}{\partial x_i}$ dénote les connaissances dont on dispose sur la façon dont le descripteur de solution y_j varie en fonction des variations du descripteur de problème x_i . Cette métaphore constitue une stratégie pour implanter une fonction d'adaptation. Elle conduit à modéliser, dans le domaine d'application du système de RÀPC :

- Les *appariements* entre descripteurs problème source et cible ($\Delta x_i = x_i^c - x_i^s$ qui synthétise la correspondance $x_i^s \rightarrow x_i^c$ de x_i^s à x_i^c),
- Les *dépendances* entre descripteurs solution y_j et descripteurs problèmes x_i $\left(\frac{\partial y_j}{\partial x_i} \right)$,
- La combinaison de ces dépendances et de ces appariements qui donne la contribution de la variation du descripteur problème x_i à la modification du descripteur solution y_j de srce vers cible $\left(\frac{\partial y_j}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$,
- La combinaison de ces contributions $\left(\sum_i \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$ et
- Comment cette combinaison permet de proposer une solution au problème cible à partir de la solution du problème source $\left(y_j(x^s) + \sum_i \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$.

Dans [Fuchs *et al.*, 2000; Fuchs *et al.*, 2001], un exemple d'aide à la configuration d'un ordinateur personnel a été présenté. Cet exemple s'appuyait sur une représentation des cas sous la forme de n -uplets de réels, ce qui permettait d'utiliser les opérations sur les réels, en tenant compte de l'incomplétude des connaissances de certaines valeurs numériques. Par exemple, dans l'une des approches, seuls le signe et la nullité des $\frac{\partial y_j}{\partial x_i}$ sont utilisés. Nous allons présenter ici un autre exemple dans lequel la représentation n'est pas ramenée aux espaces \mathbb{R}^m et \mathbb{R}^n . Cet exemple va illustrer l'intérêt de cette stratégie pour se poser de « bonnes questions » lors de la conception d'un module d'adaptation d'un système de RÀPC.

Le domaine d'application est l'écriture d'algorithmes pour calculer des expressions numériques : un problème est décrit par une formule et une solution par un algorithme implantant cette formule. La figure 7.1 présente cet exemple. Une fois le problème d'adaptation (srce, Sol(srce), cible) posé, l'appariement consiste à exhiber les x_i , i.e., les descripteurs de problèmes dans srce et dans cible qui vont correspondre. Par exemple, pour le descripteur x_3 , $x_3^s = \sum$ dans srce correspond à $x_3^c = \max$ dans cible et Δx_3 correspond donc au passage de la sommation au maximum. Les dépendances $\frac{\partial y_j}{\partial x_i}$ entre descripteurs problèmes x_i^s de srce et descripteurs solutions $y_j(x^s)$ de Sol(srce) peuvent être établies indépendamment de cible. En l'occurrence, beaucoup de ces dépendances sont *nulles*, par exemple $\frac{\partial y_2}{\partial x_3} = 0$ exprime le fait que, dans l'algorithme Sol(srce), le fait que cet algorithme ne traite que des

paramètres strictement positifs n'a pas de lien avec le fait de devoir faire une somme. Les dépendances non nulles sont assorties d'explications qui vont être utiles à l'adaptation. Par exemple, le calcul de $y_3(x^c)$ se fait de la manière suivante :

$$y_3(x^c) = y_3(x^s) + \underbrace{\frac{\partial y_3}{\partial x_3}}_{\substack{0 : \text{élément} \\ \text{neutre de } +}} \cdot \underbrace{\Delta x_3}_{+ \rightarrow \max}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\substack{\text{substituer 0 par l'élément} \\ \text{neutre de max } (-\infty)}}$
 appliquer cette substitution sur $y_3(x^s)$

Par conséquent, $y_3(x^s) = \boxed{A \leftarrow 0}$ est adapté en $y_3(x^c) = \boxed{A \leftarrow -\infty}$.

De ce modèle à base de différentielles à l'implantation d'un système de RÀPC effectuant de telles adaptations d'algorithmes, il reste bien entendu un très long chemin à parcourir : cela requiert des connaissances d'adaptation, des algorithmes pour l'appariement, etc. Cependant, ce modèle permet de poser des jalons pour le parcours d'un tel chemin et c'est en quoi il est utile.

Ce modèle des différentielles permet également de décrire certaines reformulations de façon concise. Ainsi, la figure 7.2 décrit la reformulation (cs, \mathcal{A}_{cs}) de KASIMIR appliqué au traitement du cancer du sein, où cs relie deux problèmes s'ils représentent des patients équivalents, à la seule différence du sexe et des caractéristiques qui sont liées (p. ex., l'attribut à valeur booléenne ménopause apparaîtra dans un des problèmes mais pas dans l'autre). \mathcal{A}_{cs} est décrit à l'aide d'une notation $\frac{\partial \text{ttt}}{\partial \text{sexe}}$, où ttt est un type de traitement (chirurgie, etc.). Soulignons à nouveau le caractère métaphorique de ces notations : $\frac{\partial y_j}{\partial x_i}$, en particulier, n'a pas de définition aussi précise que celles des dérivées partielles des applications C^∞ $y : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$.

Adaptation et représentation multi-points de vue. Dans certains domaines d'application, les connaissances et les cas peuvent être organisés en plusieurs sous-domaines, ou *points de vue* [d'Aquin, 2002; d'Aquin *et al.*, 2004f]. Pour l'application de KASIMIR au traitement du cancer du sein non métastatique, ces points de vue correspondent aux disciplines médicales impliquées dans la prise de décision : chimiothérapie, chirurgie, gynécologie, hormonothérapie, radiothérapie, etc. Étant donné ce découpage des connaissances, l'adaptation — et, plus largement, le processus de RÀPC — se découpe en points de vue. Nous reviendrons sur le RÀPC multi-points de vue au chapitre suivant (section 8.2.4).

7.1.3 Utilisation de cas d'adaptation

L'adaptation elle-même peut être effectuée grâce à un processus de RÀPC, selon le principe appelé RÀPC récursif dans [Stahl et Bergmann, 2000]. Les cas associés à un tel raisonnement représentent des épisodes de résolution de problèmes d'adaptation et sont appelés *cas d'adaptation* [Herbeaux, 2000]. [Leake *et al.*, 1995] et [Okada et Kawai, 1989] étudient également de telles adaptations. Un cas d'adaptation peut être considéré comme un couple $((\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible}), \text{Sol}(\text{cible}))$ dont le premier élément est un problème d'adaptation et dont le second est sa solution.

À titre d'illustration et en reprenant l'exemple des fonctions $y : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$, soit $((\widehat{x^s}, y(\widehat{x^s}), \widehat{x^c}), y(\widehat{x^c}))$ un cas d'adaptation (on suppose, pour simplifier, que $y(\widehat{x^c})$ est connu sans erreur). Soit $(x^s, y(x^s), x^c)$ un nouveau problème d'adaptation. On peut montrer que

$$y(x^c) \simeq y(x^s) + \frac{y(\widehat{x^c}) - y(\widehat{x^s})}{\widehat{x^c} - \widehat{x^s}} (x^c - x^s) \quad (9)$$

paramètre : entier $n > 0$
calculer $\sum_{1 \leq k \leq n} \log_{10} k$

paramètre : entier $p \geq 0$
calculer $\max_{0 \leq n \leq p} \cos(n + 1)$

paramètre n : entier
si non (n > 0)
alors retourner erreur
A ← 0
pour k de 1 à n faire
A ← A + log (k)
fin-pour
retourner A

Sol(cible) = ?

Appariements :

descripteurs problème	dans srce : x_i^s	dans cible : x_i^c
x_1	entier n	entier p
x_2	$n > 0$	$p \geq 0$
x_3	\sum	max
x_4	$1 \leq k \leq n$	$0 \leq n \leq p$
x_5	$x \mapsto \log_{10} x$	$x \mapsto \cos(x + 1)$

Dépendances :

descripteurs solution	dans Sol(srce) : $y_i(x^s)$	dépendances non nulles
y_1	n : entier	$\frac{\partial y_1}{\partial x_1}$ (traduction syntaxique)
y_2	si non (n > 0) alors retourner erreur	$\frac{\partial y_2}{\partial x_2}$ (prise en compte de la contrainte x_2^s)
y_3	A ← 0	$\frac{\partial y_3}{\partial x_3}$ (0 est élément neutre de +)
y_4	pour k de 1 à n faire ... fin-pour	$\frac{\partial y_4}{\partial x_4}$ (choix d'une boucle pour avec k croissant)
y_5	A + log (k)	$\frac{\partial y_5}{\partial x_3}$ (+ correspond à \sum) $\frac{\partial y_5}{\partial x_5}$ (log est la notation algorithmique de \log_{10})

Sol(cible) =

paramètre p : entier
si non (p >= 0)
alors retourner erreur
A ← $-\infty$
pour n de 0 à p faire
A ← max (A, cos (n + 1))
fin-pour
retourner A

FIG. 7.1 – Exemple d'adaptation d'un algorithme.

Pour le traitement du cancer du sein :

$$\frac{\partial \text{chirurgie}}{\partial \text{sexe}} = 0 \quad \frac{\partial \text{chimiothérapie}}{\partial \text{sexe}} = 0 \quad \frac{\partial \text{radiothérapie}}{\partial \text{sexe}} = 0$$

$$\frac{\partial \text{hormonothérapie}}{\partial \text{sexe}} = \begin{cases} \text{pour l'hormonothérapie chimique : 0} \\ \text{pour l'hormonothérapie par ablation des ovaires :} \\ \text{remplacer par ablation des testicules et inversement}^a \end{cases}$$

^a L'ablation des ovaires permet la suppression rapide de la production d'œstrogènes, hormone ayant un effet favorisant la prolifération tumorale pour le cancer du sein. Le traitement au tamoxifène a un effet analogue chez l'homme : il inhibe la production de testostérone qui ont également un effet de prolifération tumorale pour le cancer du sein.

FIG. 7.2 – Reformulation (cs, \mathcal{A}_{cs}) (« changement de sexe »).

Ainsi, si on ne dispose pas de connaissances générales d'adaptation (dans la métaphore : y'), on peut réutiliser la façon dont l'adaptation est effectuée pour un cas d'adaptation proche (dans la métaphore : le taux de variation $\frac{y(\widehat{x}^c) - y(\widehat{x}^s)}{\widehat{x}^c - \widehat{x}^s}$, valeur approchée de $y'(\widehat{x}^s)$).

7.1.4 Autres modèles de l'adaptation

Adaptation avec test et réparation. L'approche de l'adaptation développée dans [Hammond, 1990] pour le planificateur à partir de cas CHEF est constituée des étapes de modification, de test et de réparation. La modification de $\text{Sol}(\text{srce})$ en une première solution de cible se fait en cherchant une substitution σ de descripteurs telle que $\sigma(\text{srce}) = \text{cible}$, puis en appliquant σ à $\text{Sol}(\text{srce})$: $\text{Sol}_1(\text{cible}) = \sigma(\text{Sol}(\text{srce}))$ (la modification effectuée un « simple » transfert analogique). $\text{Sol}_1(\text{cible})$ peut ne pas être une solution satisfaisante de cible ; c'est ce que le module de test vérifie. Si ce module estime que $\text{Sol}_1(\text{cible})$ est satisfaisant (au sens où elle vérifie un ensemble de propriétés fixé), cette solution est le résultat de l'adaptation. Sinon, il explique en quoi $\text{Sol}_1(\text{cible})$ n'est pas satisfaisant et le module de réparation produit une nouvelle solution pour cible, tenant compte de ces explications. Un module d'apprentissage analyse le travail de réparation effectué, ce qui lui permet d'enrichir les connaissances de remémoration (en diminuant la similarité entre deux descripteurs des problèmes srce et cible qui ont nécessité beaucoup de réparation) et les connaissances d'adaptation (en retenant les réparations antérieures).

Grégoire Boussu a effectué son stage de DEA dans la continuité de ces travaux et dans l'optique du projet KASIMIR.

[Boussu, 1998] reprend les travaux de [Hammond, 1990] (entre autres) pour étudier l'apprentissage à partir d'échecs, ou « Comment faire évoluer les connaissances d'un système confronté à un échec ? » L'application à KASIMIR de cet apprentissage est l'évolution des référentiels suivant les adaptations des cas hors référentiels.

Les travaux théoriques mentionnés dans l'encadré page 35, en collaboration avec Amélie Cordier, Béatrice Fuchs et Alain Mille entrent également dans ce thème de l'apprentissage suite à un échec.

⁹À l'aide de plusieurs développements de Taylor-Lagrange, on peut majorer l'erreur par $\frac{M_2}{2} |x^c - x^s| (|\widehat{x}^c - \widehat{x}^s| + |x^s - \widehat{x}^s| + |x^c - x^s|)$ où M_2 est un majorant de $|y''|$.

Adaptation par généralisation/spécialisation et adaptation par abstraction/raffinement. Les notions d'abstraction et de généralisation, si elles sont souvent utilisées dans le cadre du RÀPC, sont parfois confondues l'une avec l'autre. Certains auteurs, en revanche, distinguent ces notions : une abstraction est une transformation selon la dimension du niveau de détails alors qu'une généralisation est une transformation selon la dimension « sous-ensemble/ensemble » (voir en particulier [Michalski et Kodratoff, 1990], repris par [Bergmann, 1992]). L'article [Lieber et Napoli, 1998c] reprend cette distinction et propose des définitions de « est une abstraction de » et de « est une généralisation de », dans le cadre du RÀPC appliqué à la résolution de problèmes.

La définition de l'abstraction que nous proposons est la suivante. Le problème *abst* est une abstraction d'un problème *pb* si toute solution $Sol(abst)$ de *abst* peut être considérée comme une solution partielle de *pb*. Si une solution $Sol(abst)$ est connue, la résolution de *pb* peut s'appuyer sur cette solution. Différents travaux rentrent dans ce cadre. Dans [Branting et Aha, 1995], une approche théorique illustrée par un problème de recherche de chemin dans un labyrinthe est présentée. Le système ROUTER [Goel et Callantine, 1992] est un planificateur de robot fondé sur le RÀPC et qui utilise une telle approche. Enfin, la conception à partir de cas du système Déjà Vu [Smyth, 1996] rentre également dans ce cadre.

La définition de la généralisation que nous proposons est la suivante. Le problème *gén* est une généralisation du problème *pb* si toute solution $Sol(gén)$ de *gén* peut être spécialisée en une solution $Sol(pb)$ de *pb*. Si une solution $Sol(gén)$ de *gén* est connue, la résolution de *pb* peut se faire par spécialisation de *gén*. RÉSYN/RÀPC et KASIMIR s'appuient, notamment, sur une adaptation par généralisation/spécialisation. Les travaux de Jana Koehler [Koehler, 1994; Koehler, 1996] combinent généralisation/spécialisation et abstraction/raffinement.

La différence principale entre ces deux notions est que la connaissance d'une solution $Sol(abst)$ d'un problème plus abstrait que *pb* n'est généralement pas suffisante pour la résolution de *pb* alors que la connaissance d'une solution $Sol(gén)$ d'un problème *gén* plus général que *pb* l'est.

L'article [Lieber et Napoli, 1998c] contient quelques exemples qui illustrent ces notions et conclut par une discussion sur ces définitions.

Il convient de distinguer la notion de point de vue de la notion d'abstraction : un point de vue d'un problème est une vue partielle de ce problème et sa résolution donne une solution selon ce point de vue. En revanche, résoudre une abstraction d'un problème c'est donner une ébauche de sa solution complète.

Modèle de tâches de l'adaptation. Béatrice Fuchs a étudié les composants d'un système de RÀPC, en particulier l'adaptation, selon un modèle de tâches [Fuchs, 1997; Fuchs et Mille, 1999]. Ce travail présente au moins deux intérêts. D'abord, il décrit les tâches et sous-tâches possibles de l'adaptation. En particulier, sont mises en évidence des tâches de traitement des solutions : tâches élémentaires (copie, ajout/suppression d'un descripteur, substitution d'un descripteur par un autre, etc.) et tâches plus abstraites (rechercher un élément à ajouter, réorganiser, etc.). Ensuite, il permet une description de systèmes de RÀPC : comment un tel système « entre » dans ce schéma, quelles tâches il effectue, quels choix de méthodes ont été faits, etc.

Utilisation d'une mesure de similarité entre solutions. Dans [Dubois *et al.*, 1998], le RÀPC s'appuie sur le principe selon lequel plus *srce* et *cible* sont proches, plus la solution de *cible* est proche de la solution de *srce*. Cette idée est formalisée en :

$$Diss(Sol(srce), Sol(cible)) \leq diss(srce, cible) \quad (7.4)$$

où Diss est une mesure de dissimilarité entre solutions et où diss est une mesure de dissimilarité entre problèmes¹⁰. Sous cette hypothèse, si les mesures de similarité diss et Diss sont supposées connues, étant donné un problème d'adaptation $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible})$, sa solution $\text{Sol}(\text{cible})$ vérifiera la contrainte (7.4). Plus le problème srce est proche de cible (au sens de diss), plus cette contrainte sera forte. L'article [Dubois *et al.*, 1998] suggère de faire appel à plusieurs cas sources proches de cible qui fourniront autant de contraintes permettant de cerner $\text{Sol}(\text{cible})$.

7.1.5 L'adaptation conservatrice

Réviser une base de connaissances ψ par une base de connaissances μ consiste à *modifier minimalement* ψ en une base ψ' cohérente avec μ ; la base révisée sera alors la conjonction de ψ' et μ . Cette idée intuitive de modification minimale peut se réaliser de multiples manières : il n'y a pas unicité de l'opérateur de révision $\circ : (\psi, \mu) \mapsto \psi \circ \mu$. Néanmoins, n'importe quel opérateur ne convient pas : la théorie AGM de la révision consiste en un ensemble de postulats qu'il est raisonnable d'exiger de la part d'un opérateur de révision [Alchourrón *et al.*, 1985].

De façon parallèle, l'adaptation transformationnelle consiste en une *modification* de $\text{Sol}(\text{srce})$ en une solution de cible . Cela conduit à l'idée d'utiliser la théorie de la révision — et les travaux qui en découlent — en RÀPC. L'*adaptation conservatrice* est une telle application de la théorie de la révision [Lieber, 2006; Lieber, 2007c; Lieber, 2007b]. L'idée de cette adaptation est de garder le plus possible du cas remémoré pour résoudre le problème cible, tout en assurant la cohérence à la fois avec le contexte du problème cible et avec les connaissances du domaine. Soit BC_{srce} le contexte du cas $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}))$, c'est-à-dire, l'ensemble des connaissances associées à ce cas interprété dans le cadre des connaissances du domaine. Soit BC_{cible} l'ensemble des connaissances associées au problème cible interprété dans le cadre des connaissances du domaine. La révision de BC_{srce} par BC_{cible} donne une base de connaissances cohérente avec BC_{cible} qui garde « le plus possible » de BC_{srce} . Cette base de connaissances permet d'inférer une proposition de solution (ou des éléments de cette proposition) pour le problème cible.

Cette approche de l'adaptation recouvre par exemple, dans le cadre de KASIMIR, une partie au moins des adaptations en cas de contre-indications. Ce travail sur l'adaptation conservatrice n'en est qu'à ses débuts et doit se poursuivre, notamment par sa mise en œuvre pratique dans le cadre du formalisme des logiques de descriptions.

7.2 L'acquisition de connaissances d'adaptation (ACA)

L'acquisition de connaissances d'adaptation (ACA) a pour objectif d'« obtenir » des connaissances d'adaptation et de les modéliser. Nous avons étudié et étudions encore l'ACA dans le cadre du projet KASIMIR, avec l'objectif de proposer des méthodes et techniques générales d'ACA. [Lieber *et al.*, 2004] présente une comparaison des quelques rares travaux en RÀPC relevant de l'ACA que nous avons relevés dans la littérature. On peut distinguer les approches d'ACA selon les sources de connaissances.

7.2.1 L'ACA auprès d'experts

Dans le cadre du projet KASIMIR, deux études d'ACA auprès d'experts ont été menées. La première a été dirigée par les informaticiens du projet et la deuxième, lors d'une thèse de psycho-ergonomie.

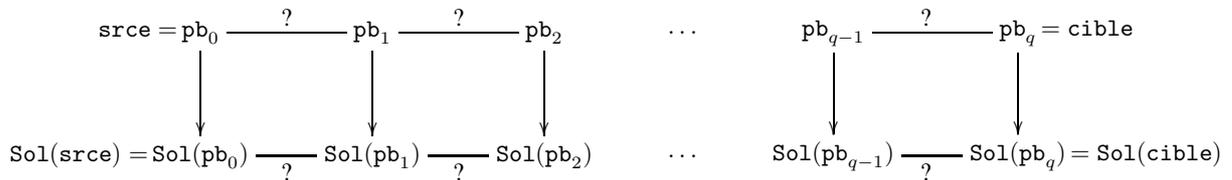
¹⁰Nous avons reformulé cette inéquation avec nos notations. Cette formalisation suppose que les problèmes du domaine considéré sont *déterministes*, ce qui entraîne qu'un problème a au plus une solution. Une formalisation du principe plus faible selon lequel « Plus srce et cible sont proches, plus il est *possible* que la solution de cible soit proche de la solution de srce » est également présentée dans [Dubois *et al.*, 1998].

Première étude : examen d'adaptations effectuées en RCP.

Cette étude était constituée de 10 réunions qui se sont déroulées en 2000, avec la participation de cancérologues (Maria Rios et Anne Lesur), de Catherine Sauvagnac, qui est à la fois psycho-ergonome et médecin, et d'informaticiens (Benoît Bresson et Jean Lieber).

Comme nous l'avons vu au chapitre 5, section 5.2.2, des adaptations du référentiel sont effectuées lors de RCP (réunions de concertation pluridisciplinaires) qui traitent des cas hors référentiel. Des comptes-rendus de telles adaptations ont formé le matériau de base de sessions d'ACA auprès d'experts [Lieber *et al.*, 2001; Lieber *et al.*, 2003].

Il est apparu que les notions de chemin de similarité, de problème intermédiaire et de reformulation ont joué un rôle important pour cette ACA. En effet, une fois que l'adaptation est comprise des personnes présentes, elle est modélisée par un chemin de similarité liant un problème *srce* au problème cible correspondant à un patient : des problèmes intermédiaires correspondant à des patients virtuels sont introduits. Les différentes étapes de l'adaptation sont marquées par la résolution successive de ces problèmes intermédiaires pb_i et, finalement, du problème cible. On a alors un schéma de la forme :



La question « Comment et avec quelles connaissances, $Sol(srce)$ est-il adapté en $Sol(cible)$? » est réduite en q questions « Comment et avec quelles connaissances (r_i, \mathcal{A}_{r_i}) , $Sol(pb_{i-1})$ est-il adapté en $Sol(pb_i)$? », questions censées être plus simples que la question originale, car liée à une étape « élémentaire » de l'adaptation. On retrouve, pour l'ACA, la décomposition horizontale de l'adaptation discutée en section 7.1.2.1. Il reste alors à modéliser les reformulations (r_i, \mathcal{A}_{r_i}) .

Dans bien des cas, un problème intermédiaire pb_{i-1} est introduit à partir d'un problème pb_i suite à une affirmation d'expert de la forme « On fait [provisoirement] comme si la patiente avait/n'avait pas telle caractéristique. » La façon d'adapter $Sol(pb_{i-1})$ en $Sol(pb_i)$ peut être acquise en interrogeant l'expert sur cette affirmation. En particulier, si c'est une affirmation non provisoire (à la différence d'une hypothèse de travail), elle se lit « On peut faire comme si la caractéristique était présente/absente : cela ne joue pas de rôle dans la prise de décision thérapeutique. », dans ce cas, on peut faire l'affectation $Sol(pb_i) \leftarrow Sol(pb_{i-1})$.

Pour cerner ce qui joue un rôle dans une étape d'adaptation, il est parfois utile de faire une étude des « variations » : on change une caractéristique du problème cible et on interroge les experts sur l'incidence de ce changement. Par exemple, on pose la question « Et si la patiente était plus âgée ou plus jeune ? » et cela permet de préciser la portée des reformulations. Pour reprendre la métaphore des différentielles, on interroge les experts sur $\frac{\partial \text{traitement}}{\partial \text{âge}}$.

Cette ACA a permis de mettre en évidence des processus en lien avec l'adaptation, mais aussi avec la remémoration. Ces processus nécessitent une modélisation et une mise en place dans le système, et ont induit de nouveaux besoins en représentation des connaissances. Ainsi, les problèmes liés à la proximité d'une caractéristique numérique d'un seuil de décision ont conduit à une représentation des référentiels avec des seuils flous (voir au chapitre suivant, section 8.2.2, comment est réalisée cette représentation et au chapitre précédent, comment la classification hiérarchique floue est implantée). La reformulation (cs, \mathcal{A}_{cs}) décrite à la figure 7.2 est également issue de cette étude. D'autres connaissances acquises lors de cette étude sont présentées ci-dessous (en particulier dans la section 7.3.3).

Deuxième étude : ACA auprès d'experts utilisant des méthodes d'ergonomie.

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un projet TCAN du CNRS [TCAN (Traitement des connaissances, apprentissage et NTIC), 2005], qui s'est déroulé de juillet 2003 à juin 2005, projet ayant pour thème l'ACA, que ce soit l'ACA auprès d'experts ou l'ACA semi-automatique.

L'étude a été menée par Vanina Mollo, lors de sa thèse de psycho-ergonomie dans le cadre du projet KASIMIR (encadrée par Pierre Falzon), en collaboration avec des cancérologues (notamment Maria Rios) et des informaticiens (Mathieu d'Aquin et Jean Lieber).

La deuxième étude [Mollo, 2004b; Mollo, 2004a] s'est appuyée sur 15 cas médicaux de cancer du sein, dont 14 cas hors référentiel, nécessitant donc une adaptation. Ces cas ont été créés artificiellement par un expert cancérologue et ont été proposés à une quinzaine de médecins lorrains. Ces médecins ont dans un premier temps donné et expliqué leurs décisions sur les 15 cas. Dans un deuxième temps, ils ont été confrontés sur chacun des cas avec les décisions de leurs collègues (selon la technique dite d'allo-confrontation).

En aval du recueil des décisions et explications des experts, une modélisation des adaptations, similaire au travail effectué lors de la première étude mais sur un matériau différent, a été menée.

Patrons d'adaptation. Pour ces deux études, les connaissances d'adaptation acquises sont sous la forme de « patrons d'adaptation ». Un tel patron est une règle d'adaptation dépendant de paramètres formels et assortis d'explications (ou de justifications). L'intérêt des patrons d'adaptation est qu'ils sont intelligibles, grâce à ces explications. Leur inconvénient majeur est de ne pas être, en général, directement opérationnalisables : ils s'appuient sur d'autres connaissances qu'il faut acquérir. En effet, pour obtenir une règle d'adaptation opérationnalisable, il faut trouver une bonne instanciation de ces paramètres formels. Prenons l'exemple du patron d'adaptation de la figure 7.3. Une instanciation de ses paramètres sera proposée à la section 7.2.3.

Paramètres \underline{Ttt} , \underline{Ttt}' : deux traitements ayant des bénéfices thérapeutiques attendus similaires quand ils sont efficaces et \underline{C} : une caractéristique patient

Si $\underline{Ttt} \in \text{Sol}(\text{srce})$ et srce et cible ne diffèrent que pour une caractéristique \underline{C} qu'a cible et n'a pas srce et qui rend \underline{Ttt} inefficace sans rendre \underline{Ttt}' inefficace

alors Remplacer \underline{Ttt} par \underline{Ttt}' dans $\text{Sol}(\text{srce})$ pour obtenir $\text{Sol}(\text{cible})$:

$$\text{Sol}(\text{cible}) = (\text{Sol}(\text{srce}) \setminus \{\underline{Ttt}\}) \cup \{\underline{Ttt}'\}$$

Explication Le traitement \underline{Ttt} n'étant pas efficace sur cible à cause de la caractéristique \underline{C} , on peut le substituer par \underline{Ttt}' qui a un bénéfice thérapeutique attendu pour cible similaire à celui de \underline{Ttt} pour srce .

FIG. 7.3 – Un patron d'adaptation.

D'autres exemples de patrons d'adaptation issus de ces deux études sont présentés dans la section 7.3.3 : ils nous semblent avoir un intérêt dans un cadre plus large que l'application au traitement du cancer du sein, celui de l'aide à la décision.

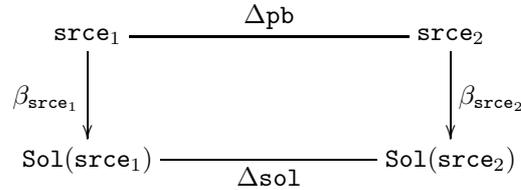
7.2.2 L'ACA semi-automatique : CABAMAKA

Ce travail a débuté dans le cadre du projet du programme interdisciplinaire TCAN du CNRS déjà mentionné plus haut (cf. deuxième étude, section 7.2.1). L'implantation du système CABAMAKA d'ACA semi-automatique a été entamée par le stage de DESS RGTI de Jérôme Haquin (février à août 2004) et s'est poursuivi par le stage d'ingénieur CNAM de Sandrine Lafrogne (février 2005 à janvier 2006). Fadi Badra, en thèse depuis l'automne 2005, a pris le relais. Le module de fouille de données au centre de CABAMAKA fait partie du système CORON qui réunit de tels outils et qui est développé par Laszlo Szathmary, de l'équipe Orpailleur.

La présentation de l'état actuel du système et des premiers résultats a été publiée dans [d'Aquin *et al.*, 2007a] et dans [Badra et Lieber, 2007a].

Principes. Une autre approche de l'ACA consiste à utiliser des techniques d'apprentissage automatique. Une question qui se pose alors est de savoir quelles sont les données d'apprentissage. Une première possibilité est d'utiliser une base de cas d'adaptation qui devra être suffisamment grande pour permettre un tel apprentissage. Concernant KASIMIR, de tels cas d'adaptation sont les comptes-rendus des RCP (voir section 5.2.2, page 34), qui sont actuellement sous une forme de fichiers textuels peu structurés et supposant un travail d'anonymisation.

Une deuxième possibilité est de *construire* des cas d'adaptation à partir de la base de cas, puis d'effectuer un apprentissage sur la base de ces cas d'adaptation. C'est cette piste que nous avons privilégiée. L'idée est la suivante. Étant donné deux cas sources ($srce_1, Sol(srce_1)$) et ($srce_2, Sol(srce_2)$), on considère que la fonction d'adaptation — qu'on cherche à apprendre — permet de résoudre $Sol(srce_2)$ par adaptation du cas ($srce_1, Sol(srce_1)$) au problème $srce_2$, ce qu'on peut représenter par le carré d'analogie suivant :



Autrement dit, ($srce_1, Sol(srce_1)$) joue le rôle du cas à adapter et $srce_2$, celui du problème cible.

Nous avons privilégié une approche par transformation de l'adaptation. Par conséquent, pour inférer $Sol(srce_2)$ à partir du problème d'adaptation ($srce_1, Sol(srce_1), srce_2$), on s'appuie sur :

(AT-2) $(CA, \Delta_{pb}) \mapsto \Delta_{sol}$ (cf. page 54).

C'est au niveau de cette étape de l'adaptation par transformation que des connaissances d'adaptation CA sont utilisées. Pour *réaliser* l'adaptation, Δ_{pb} et CA sont connus et on cherche Δ_{sol} . Pour *acquérir* les connaissances d'adaptation, Δ_{pb} et Δ_{sol} sont connus et on cherche CA. L'apprentissage se fera donc sur les couples $(\Delta_{pb}, \Delta_{sol})$. Une idée analogue a été exploitée par [Hanney et Keane, 1996; Hanney, 1997] et donne de bons résultats pour un système de RÀPC permettant de prédire le prix d'un logement.

Parmi les couples de cas sources $((srce_1, Sol(srce_1)), (srce_2, Sol(srce_2)))$, lesquels privilégier ? Une première réponse est de ne considérer que ceux pour lesquels $srce_1$ et $srce_2$ sont similaires au sens d'une mesure de dissimilarité $diss$ donnée entre problèmes : $diss(srce_1, srce_2) \leq \sigma_{diss}$ où σ_{diss} est un seuil prédéfini. L'approche d'ACA automatique de [Hanney et Keane, 1996; Hanney, 1997] sélectionne de cette manière les couples de cas sources. En revanche, nous considérons *a priori* tous les couples de cas sources et nous allons expliquer pourquoi. Selon l'approche du RÀPC que nous suivons, la similarité est définie sur la base des connaissances d'adaptation disponibles (cf. la définition de $diss$ en terme de longueur minimale d'un chemin de similarité : (6.16), page 47). Dans ces conditions, si $srce_1$ et $srce_2$ sont similaires au sens de $diss$, les connaissances CA utiles à l'adaptation de $Sol(srce_1)$ pour résoudre $srce_2$ sont *déjà disponibles* (il suffit d'avoir $diss(srce_1, srce_2) < +\infty$). Par conséquent,

apprendre comment résoudre $srce_2$ à partir de $Sol(srce_1)$ c'est apprendre quelque chose de déjà su. Nous aurions pu choisir une autre mesure de dissimilarité $diss$, indépendante de la remémoration guidée par l'adaptation, mais laquelle ? Il nous a semblé plus simple de considérer tous les couples de cas sources distincts.

Ce choix entraîne un problème de temps de calcul : si $n = |BaseDeCas|$, il y a $n(n-1)$ couples de cas sources à considérer. Pour le référentiel du traitement du cancer du sein constituant une base de cas de KASIMIR, $n \simeq 750$, ce qui fait $n(n-1) \simeq 500\,000$ couples. Par conséquent, l'algorithme d'apprentissage doit être efficace en temps de calcul. De tels algorithmes ont été développés pour l'ECBD (extraction de connaissances dans des bases de données [Dunham, 2003]). Nous avons conçu [d'Aquin *et al.*, 2004d] et commencé à développer [Haquin, 2004] un système, baptisé CABAMAKA (*CAse BAse Mining for Adaptation Knowledge Acquisition*), pour l'ACA semi-automatique, suivant les principes de l'ECBD. Cela signifie que CABAMAKA comprend trois étapes principales : la préparation des données, la fouille de données et l'aide à l'interprétation.

La préparation des données est constituée d'un formatage et d'un filtrage. Le *formatage* vise à traduire les couples $(\Delta pb, \Delta sol)$ sous une forme exploitable par le processus de fouille. L'idée est de traduire un couple $(\Delta pb, \Delta sol)$ sous la forme d'un ensemble de propriétés booléennes. Le formatage se fait en deux étapes. La première étape consiste à associer à chaque cas source $(srce, Sol(srce))$ les ensembles de propriétés booléennes, dénotés par $\Phi(srce)$ et $\Phi(Sol(srce))$, sous-ensembles de l'ensemble \mathcal{P} des propriétés relatives à la base de cas et à la théorie du domaine. $\Phi(srce)$ et $\Phi(Sol(srce))$ doivent être clos pour la déduction étant donné la théorie du domaine Th . Par exemple, si $FEC50 \in \mathcal{P}$, $chimiothérapie \in \mathcal{P}$ et que $FEC50 \vdash_{Th} chimiothérapie$, alors $FEC50 \in \Phi(Sol(srce))$ entraîne $chimiothérapie \in \Phi(Sol(srce))$.

La deuxième étape du formatage considère, pour chaque couple γ de cas sources — $\gamma = ((srce_1, Sol(srce_1)), (srce_2, Sol(srce_2)))$ — les quatre ensembles de propriétés associés par la première étape du formatage : $\Phi(srce_1)$, $\Phi(Sol(srce_1))$, $\Phi(srce_2)$ et $\Phi(Sol(srce_2))$. La similarité entre deux ensembles de propriétés E_1 et E_2 est représentée par le triplet $\Delta E = (E^=, E^-, E^+)$ où $E^= = E_1 \cap E_2$, $E^- = E_1 \setminus E_2$ et $E^+ = E_2 \setminus E_1$ (en s'inspirant d'une idée de [Berasaluce *et al.*, 2002]). $E^=$ représente les propriétés communes à E_1 et E_2 , et E^- et E^+ représentent les propriétés qui diffèrent entre les deux ensembles : E^- sont les propriétés qui sont dans E_1 et pas dans E_2 et E^+ sont les propriétés qui sont dans E_2 et pas dans E_1 . De cette façon, on peut définir Δpb par le triplet $(\Phi_{pb}^=, \Phi_{pb}^-, \Phi_{pb}^+)$ et Δsol par le triplet $(\Phi_{sol}^=, \Phi_{sol}^-, \Phi_{sol}^+)$; par exemple, $\Phi_{sol}^- = \Phi(Sol(srce_1)) \setminus \Phi(Sol(srce_2))$. Ainsi, on associe aux couples de cas sources γ , 6 ensembles de propriétés. En créant, pour chacun de ces 6 ensembles $\Phi_{pb/sol}^{+/-/=}$ et chacune des propriétés $p \in \Phi_{pb/sol}^{+/-/=}$, une propriété $p_{pb/sol}^{+/-/=}$ (i.e., la propriété p avec une marque indiquant duquel des 6 ensembles provient p), on obtient un ensemble de propriétés $\Phi(\gamma)$ à associer à γ . Par exemple :

$$\text{si } \begin{cases} \Phi(srce_1) = \{a, b, c\} & \Phi(Sol(srce_1)) = \{A, B\} \\ \Phi(srce_2) = \{b, c, d\} & \Phi(Sol(srce_2)) = \{B, C\} \end{cases} \\ \text{alors } \Phi(\gamma) = \{a_{pb}^-, b_{pb}^=, c_{pb}^=, d_{pb}^+, A_{sol}^-, B_{sol}^=, C_{sol}^+\} \quad (7.5)$$

Le *filtrage* permet de ne sélectionner que les propriétés et ensembles de propriétés jugés pertinents pour la session d'ACA en cours. Il permet ainsi d'orienter la session d'ACA pour un type de recherche particulier (p. ex., si l'on cherche les connaissances d'adaptation ne concernant pas la radiothérapie, on pourra supprimer tous les ensembles de propriétés dont un élément concerne la radiothérapie). Il peut s'appliquer avant la première étape du formatage, entre les deux étapes et après la deuxième.

La fouille de données est effectuée dans CABAMAKA par l'algorithme Charm [Zaki et Hsiao, 2002], implanté dans le système CORON [Szathmary et Napoli, 2005; Szathmary, 2006]. Charm effectue une extraction de motifs fermés fréquents¹¹. L'idée est de n'extraire que les motifs qui apparaissent le plus fréquemment : sont oubliées les propriétés particulières n'apparaissant que dans des contextes très particuliers. Par exemple, supposons que les propriétés de $\Phi(\gamma)$ de l'équation (7.5) apparaissent fréquemment ensemble, à l'exception de b_{pb}^- . Dans ce cas, on aura le motif fermé fréquent

$$m = \{a_{pb}^-, c_{pb}^-, d_{pb}^+, A_{so1}^-, B_{so1}^-, C_{so1}^+\} \quad (7.6)$$

L'aide à l'interprétation a pour objectif d'assister l'analyste dans la construction de nouvelles connaissances à partir des motifs extraits. Par exemple, le motif m de l'équation (7.6) peut s'interpréter par la règle d'adaptation suivante :

- 1°/ *srce* et *cible* partagent la propriété c ,
- 2°/ la propriété a est dans *srce* mais n'est pas dans *cible*,
- 3°/ la propriété d n'est pas dans *srce* mais est dans *cible*,
- 4°/ $Sol(srce)$ a les propriétés A et B et
- 5°/ $Sol(srce)$ n'a pas la propriété C

alors les propriétés de $Sol(cible)$ sont $\Phi(Sol(cible)) = (\Phi(Sol(srce)) \setminus \{A\}) \cup \{C\}$.

Il reste à inférer $Sol(cible)$ à partir de l'ensemble de ses propriétés $\Phi(Sol(cible))$.

Le problème principal est que les motifs fréquents peuvent être très nombreux et que ce ne sont pas nécessairement les plus fréquents (parmi les fréquents) qui sont les plus pertinents. Une étude en cours vise à définir des *indices de vraisemblance* qui soient utiles pour mettre en avant les motifs susceptibles d'être pertinents, à l'image de ce qui se fait, en particulier, pour la fouille de textes [Cherfi, 2004].

Perspectives sur l'ACA semi-automatique. Deux choix fondamentaux ont été faits qui peuvent être remis en cause. Le premier est le type de fouille choisi, en l'occurrence, la recherche de motifs fermés fréquents sur des données sous la forme d'ensembles de propriétés booléennes. D'autres types de fouille peuvent être envisagés, en particulier, ceux nécessitant un formatage dans un langage moins contraignant devraient nous intéresser. Ils permettraient d'exprimer des différences sous une forme plus expressive : on peut penser aux concepts PPG et DISS décrits dans [Salotti et Ventos, 1999] qui expriment respectivement la similarité et la dissimilarité entre deux concepts exprimés dans une logique de descriptions, voire aux modèles des chemins de similarité et des chemins de modification pour exprimer respectivement Δ_{pb} et Δ_{so1} . Par exemple, les travaux de [Polaillon, 1999] qui visent à étendre les techniques de construction de treillis de Galois pour des données plus complexes que des ensembles de propriétés booléennes, pourraient s'avérer utiles.

Un deuxième choix est la modélisation des adaptations par les couples $(\Delta_{pb}, \Delta_{so1})$. Si on reprend la métaphore des différentielles (cf. section 7.1.2.2), un tel couple $(\Delta_{pb}, \Delta_{so1})$ peut être assimilé à la dépendance $\left\{ \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \right\}_{ij}$: il associe aux variations de problèmes des variations de solution. Une suggestion d'Alain Mille est de considérer d'autres éléments de cette métaphore. Par exemple, le lien $\Delta_{pb} \mapsto \Delta_{so1}$ est considéré comme une « boîte noire » (on ne code que l'entrée Δ_{pb} et la sortie Δ_{so1} , mais on ne code rien concernant le « mécanisme » associant cette sortie à cette entrée). Une perspective est d'aller plus loin et d'enrichir le formalisme des cas d'adaptation en s'appuyant sur la métaphore des différentielles.

Une troisième perspective a été abordée par le stage de M2R de Matthieu Tixier [Tixier, 2007]. Elle consiste à considérer les motifs fermés fréquents m comme des règles d'adaptation candidates $RA(m)$

¹¹Un motif m est un ensemble de propriétés. $f(m)$ est l'ensemble des objets γ possédant le motif m (i.e., l'ensemble des γ possédant chacune des propriétés de m). m est fréquent si $|f(m)|/|\mathcal{O}|$ est supérieur à un seuil prédéfini, \mathcal{O} étant l'ensemble de tous les objets γ . m est fermé quand il est maximal pour l'inclusion dans l'ensemble des motifs m' tels que $f(m') = f(m)$.

et à étudier leur composition : $RA(m_c)$ sera la composée de $RA(m_1)$ et de $RA(m_2)$ si adapter selon $RA(m_c)$ revient à adapter selon un chemin de similarité en deux étapes, avec les règles d'adaptation $RA(m_1)$ puis $RA(m_2)$. Cette composition permet de définir la notion de famille génératrice et de base d'un ensemble de règles d'adaptation. Cela doit permettre une description plus compacte des mêmes connaissances d'adaptation et, partant, un moindre travail d'interprétation de la part de l'analyste.

Une dernière perspective serait d'utiliser des techniques d'extraction de connaissances à partir de textes [Cherfi, 2004], en utilisant les comptes-rendus textuels des RCP. Comme nous l'avons évoqué plus haut, cette perspective suppose un travail important en amont, pour l'anonymisation de ces textes.

7.2.3 Vers une ACA mixte

Les patrons d'adaptation issus de l'ACA auprès d'experts ont l'avantage d'être intelligibles — des explications y sont rattachées — et l'inconvénient d'être difficilement opérationnalisables. Les règles d'adaptation issues de l'ACA automatique constituent des connaissances d'adaptation opérationnalisables au sein du système KASIMIR, mais elles ont le défaut d'être difficilement intelligibles, ce qui les rend en pratique peu exploitables : une adaptation qui n'est pas assortie d'une explication est rarement convaincante, surtout dans un domaine tel que la médecine dans lequel l'impact d'une mauvaise décision peut être grave. L'ACA mixte aura pour objectif d'allier ACA auprès d'experts et ACA automatique afin d'obtenir des connaissances d'adaptation à la fois opérationnelles et intelligibles. Pour ce faire, on peut penser à représenter des patrons d'adaptation issus de l'ACA auprès d'experts et à s'en servir à la fois comme filtres des règles d'adaptation et comme un moyen de leur associer des explications. Cela doit être effectué en interaction avec des experts du domaine, ce qui aura le double mérite de valider les résultats et de les généraliser.

À titre d'exemple, considérons le patron d'adaptation de la figure 7.3 et la règle d'adaptation suivante :

$$\text{Si } \Delta_{pb} = [CC; RH+ \rightarrow RH-] \text{ alors } \Delta_{sol} = [tamoxifène \rightarrow FEC50]^{12}$$

On peut envisager d'instancier les paramètres du patron par

$$\underline{C} = RH- \quad \underline{Ttt} = \text{tamoxifène} \quad \underline{Ttt}' = \text{FEC50}$$

Avec cette instanciation, on obtient une explication de cette règle d'adaptation :

Le traitement tamoxifène n'étant pas efficace sur cible à cause de la caractéristique RH−, on peut le substituer par FEC50 qui a un bénéfice thérapeutique attendu pour cible similaire à celui de tamoxifène pour srce.

Cette explication servira dans un premier temps à l'expert pour valider (ou corriger) la règle d'adaptation et, dans un deuxième temps, permettra au système de RÀPC d'associer cette explication à l'application de cette règle.

7.3 Un catalogue de connaissances d'adaptation

À mi-chemin entre approches générales de l'adaptation et adaptations spécifiques à des systèmes particuliers, existent des connaissances d'adaptation applicables (ou *adaptables*) à des classes de systèmes.

¹²Ici, CC dénote des caractéristiques communes aux deux problèmes. RH+ (resp. RH−) indique que les récepteurs hormonaux sont présents (resp., absents). Le tamoxifène est un produit d'hormonothérapie alors que FEC50 représente un ensemble de produits de chimiothérapie, avec une dose de 50. Le motif correspondant à cette règle, si CC correspond à une seule propriété, serait $m = \{CC_{pb}^-, RH+_{pb}^-, RH-_{pb}^+, tamoxifène_{sol}^-, FEC50_{sol}^+, \dots\}$, où les points de suspension correspondent aux propriétés déduites, étant donné Th.

L'expérience du développement d'un système de RÀPC peut être valorisée par une réflexion généralisatrice sur les connaissances d'adaptation mises en jeu qui peut conduire à des connaissances d'adaptation réutilisables dans plusieurs domaines d'application. Des catalogues recensant de telles connaissances ont déjà été établis (p. ex. [Riesbeck et Schank, 1989, pp. 41–51] ou [Kolodner, 1993]). Ici, nous présentons des connaissances d'adaptation issues et généralisées des études sur RÉSYN/RÀPC et KASIMIR. Il peut s'agir de connaissances d'adaptation opérationnelles ou de patrons d'adaptation. Elles sont en général très simples ; la complexité éventuelle de l'adaptation venant de leur composition.

7.3.1 Généralisations et spécialisations

Comme cela a été mentionné à la section 6.4.1, le processus d'indexation constitue une généralisation, puisque $srce \sqsubseteq idx(srce)$. C'est une généralisation qui est contrainte par la généralisabilité de $Sol(srce)$ en $Sol(idx(srce))$. Cette généralisation est *statique* au sens où elle ne dépend que du problème cible. D'autres généralisations peuvent être effectuées sur $idx(srce)$ grâce à des *règles de généralisation* g . Une telle règle doit respecter les conditions suivantes :

- (i) si $pb \rightarrow_g pb'$ (i.e., si pb' peut être obtenu par application de la règle g sur pb) alors $pb \sqsubseteq pb'$.
- (ii) La solution $Sol(pb)$ de pb est généralisable en une solution $Sol(pb')$ de pb' , grâce à la fonction de généralisation $\mathcal{A}_{\rightarrow_g}$ associée à \rightarrow_g .

Cela signifie qu'on a une reformulation $(\rightarrow_g, \mathcal{A}_{\rightarrow_g})$ pour chaque règle de généralisation g respectant les conditions ci-dessus. Pour rendre opérationnelle une telle reformulation, il importe de disposer de connaissances sur ce qui, dans un problème pb , joue un rôle pour une solution $Sol(pb)$. Ces connaissances sont des cas particuliers de dépendances β (cf. section 7.1.1). Certaines règles de généralisation ont été étudiées dans [Michalski, 1986] et ont été réutilisées pour l'application RÉSYN/RÀPC.

La spécialisation d'une solution s'appuie sur la reformulation $(\sqsupseteq, \text{Spécialisation})$ et est à la base de la classification dure (cf. chapitre précédent).

7.3.2 Connaissances d'adaptation pour la planification à partir de cas

Considérons un espace d'états structuré par des opérateurs. Une transition entre deux états ét et $\text{ét}'$ est dénotée par $\text{ét} \Longrightarrow \text{ét}'$ ce qui signifie qu'il existe un opérateur permettant de passer de ét à $\text{ét}'$. Résoudre un problème de recherche pb c'est chercher un chemin dans l'espace d'états. Nous nous contenterons ici, pour simplifier, des problèmes de recherche donnés par des couples d'états $pb = (\text{init}, \text{but})$ pour lesquels les solutions sont des chemins $Sol(pb) = \text{ét}_0 \Longrightarrow \text{ét}_1 \Longrightarrow \dots \Longrightarrow \text{ét}_n$ tels que $\text{ét}_0 = \text{init}$ et $\text{ét}_n = \text{but}$. Par exemple, soit l'espace dont les états sont les villes d'Europe ayant une gare et dont les transitions correspondent aux relations par le rail entre ces villes. Un exemple de problème de cet espace est $pb = (\text{Nancy}, \text{Paris})$, et une solution de ce problème est un trajet de la forme $Sol(pb) = \text{Nancy} \Longrightarrow \dots \Longrightarrow \text{Paris}$. On peut définir (au moins) cinq reformulations sur la base de ces opérateurs.

Soit $srce = (\text{init}, \text{but})$ un problème source, i.e. un problème pour lequel une solution $Sol(srce)$ est connue. La première reformulation est $(\rightarrow_{spt}, \mathcal{A}_{\rightarrow_{spt}})$ et s'appuie sur la règle *spt* (*supprimer première transition*), qui est définie par $srce \rightarrow_{spt} \text{cible}$ si $\text{cible} = (\text{init}', \text{but})$ avec init' le deuxième état de $Sol(srce)$. L'adaptation de $Sol(srce)$ en $Sol(\text{cible})$ grâce à $\mathcal{A}_{\rightarrow_{spt}}$ consiste à supprimer la transition $\text{init} \Longrightarrow \text{init}'$ de $Sol(srce)$:

$$\overbrace{\text{init} \Longrightarrow \text{init}' \Longrightarrow \dots \Longrightarrow \text{but}}^{Sol(srce)}$$

$$\underbrace{\text{init}' \Longrightarrow \dots \Longrightarrow \text{but}}_{Sol(cible)}$$

La deuxième reformulation est $(\rightarrow_{sdt}, \mathcal{A}_{\rightarrow_{sdt}})$ et s'appuie sur la règle *sdt* (*supprimer dernière transition*), qui est définie par $srce \rightarrow_{sdt} cible$ si $cible = (init, but')$ où but' est l'avant-dernier état de $Sol(srce)$. L'adaptation de $Sol(srce)$ en $Sol(cible)$ grâce à $\mathcal{A}_{\rightarrow_{sdt}}$ consiste à supprimer la transition $but' \Rightarrow but$ de $Sol(srce)$:

$$\underbrace{\text{Sol}(srce)}_{\text{Sol}(cible)} \quad \underbrace{init \Rightarrow \dots \Rightarrow but'}_{\text{Sol}(cible)} \Rightarrow but$$

Soit $cible = (init, but)$ un problème cible. La troisième reformulation est $(\leftarrow_{apt}, \mathcal{A}_{\leftarrow_{apt}})$ et s'appuie sur la règle *apt* (*ajoute première transition*), qui est définie par $srce \leftarrow_{apt} cible$ si $srce = (init', but)$ où $init'$ est tel que la transition $init \Rightarrow init'$ existe. Dans ce cas, l'adaptation de $Sol(srce)$ en $Sol(cible)$ grâce à $\mathcal{A}_{\leftarrow_{apt}}$ consiste à ajouter au chemin $Sol(srce)$ la transition $init \Rightarrow init'$:

$$\underbrace{init \Rightarrow \underbrace{init' \Rightarrow \dots \Rightarrow but}_{\text{Sol}(srce)}}_{\text{Sol}(cible)}$$

La quatrième reformulation est $(\leftarrow_{adt}, \mathcal{A}_{\leftarrow_{adt}})$ et s'appuie sur la règle *adt* (*ajoute dernière transition*), qui est définie par $srce \leftarrow_{adt} cible$ si $srce = (init, but')$ où but' est tel que la transition $but' \Rightarrow but$ existe. Dans ce cas, l'adaptation de $Sol(srce)$ en $Sol(cible)$ grâce à $\mathcal{A}_{\leftarrow_{adt}}$ consiste à ajouter au chemin $Sol(srce)$ la transition $but' \Rightarrow but$:

$$\underbrace{init \Rightarrow \dots \Rightarrow but'}_{\text{Sol}(cible)} \Rightarrow but \quad \underbrace{\text{Sol}(srce)}$$

Certains espaces d'états sont symétriques : s'il existe une transition $ét \Rightarrow ét'$ alors la transition $ét' \Rightarrow ét$ existe également. C'est le cas pour l'exemple des villes d'Europe reliées par un réseau ferré, si on suppose que les voies sont toutes à deux sens. Pour un tel espace d'états, une cinquième reformulation, $(\rightarrow_{renv}, \mathcal{A}_{\rightarrow_{renv}})$ peut être définie. Elle s'appuie sur la règle *renv* (*renverser*) définie par $(init, but) \rightarrow_{renv} (but, init)$. En effet, la solution $Sol(srce)$ de $srce = (init, but)$ peut être adaptée grâce à $\mathcal{A}_{\rightarrow_{renv}}$ en une solution $Sol(cible)$ de $cible = (but, init)$ par renversement du plan $Sol(srce)$:

$$\begin{aligned} \text{Si } Sol(srce) &= init \Rightarrow \dots \Rightarrow but \\ \text{alors } Sol(cible) &= but \Rightarrow \dots \Rightarrow init \end{aligned}$$

Les cinq reformulations ci-dessus sont similaires à certains des *T-operators* définis dans [Carbonell, 1983].

7.3.3 Connaissances d'adaptation pour l'aide à la décision à partir de cas

Prendre une décision, c'est choisir ou concevoir une action qui change l'état du monde. Une décision thérapeutique, par exemple, conduit à un traitement qui change l'état d'un patient. Une action peut être applicable ou non et peut avoir des conséquences bénéfiques et/ou des conséquences néfastes. La décision d'effectuer l'action a peut ainsi être appréhendée selon deux dimensions : l'applicabilité de a et les conséquences bénéfiques et néfastes de a (par abus de langage, on parlera de l'applicabilité et des conséquences de la décision). Par ailleurs, il arrive qu'une décision doive être prise en l'absence d'informations cruciales. Ces trois aspects de la décision sont considérés ci-dessous sous l'angle du RÀPC et illustrés

par des exemples issus des deux ACA auprès d'experts pour KASIMIR. De façon plus générale, les problèmes *srce* et *cible* considérés sont des problèmes de décision (i.e., des représentations de situations pour lesquelles des décisions sont requises). Leurs solutions $\text{Sol}(\text{srce})$ et $\text{Sol}(\text{cible})$ représentent des conjonctions de décisions notées dans cette section sous la forme d'ensembles (par exemple, une solution de KASIMIR constituée d'une décision chirurgicale déc_1 et d'une décision chimiothérapique déc_2 est notée $\{\text{déc}_1, \text{déc}_2\}$).

Adaptation d'une décision inapplicable (ou difficilement applicable). Supposons que la raison pour laquelle $\text{Sol}(\text{srce})$ ne peut pas être réutilisée littéralement pour résoudre *cible* est qu'une décision $\text{déc} \in \text{Sol}(\text{srce})$ ne peut être applicable dans le cadre de la situation décrite par *cible* (ou que l'application de cette décision est difficile). Dans ce cas, une façon d'adapter consiste à identifier la décision $\text{déc} \in \text{Sol}(\text{srce})$ qui pose le problème de l'applicabilité et à la substituer par une décision $\text{déc}'$ pour laquelle ce problème ne se pose pas et qui remplit approximativement la même fonction que déc (pour KASIMIR, déc et $\text{déc}'$ doivent avoir des bénéfices thérapeutiques attendus similaires). Cette substitution peut être vue comme un retrait de déc suivi d'un ajout de $\text{déc}'$, cet ajout ayant pour objectif de *compenser* le retrait de déc . Le patron de la figure 7.4 décrit ce type d'adaptation. On pourra noter la ressemblance entre ce patron concernant les décisions inapplicables et celui de la figure 7.3 qui concerne les décisions thérapeutiques inopérantes.

<p>Paramètres $\underline{\text{déc}}, \underline{\text{déc}'}$: deux décisions ayant des conséquences bénéfiques similaires quand elles sont applicables et $\underline{\text{R}}$: une raison empêchant l'applicabilité d'une décision</p> <p>Si $\underline{\text{déc}} \in \text{Sol}(\text{srce})$ et $\underline{\text{déc}}$ n'est pas applicable (ou est difficilement applicable) sur <i>cible</i> à cause de $\underline{\text{R}}$ et $\underline{\text{déc}'}$ est applicable sur <i>cible</i></p> <p>alors Remplacer $\underline{\text{déc}}$ par $\underline{\text{déc}'}$ dans $\text{Sol}(\text{srce})$ pour obtenir $\text{Sol}(\text{cible})$:</p> $\text{Sol}(\text{cible}) = (\text{Sol}(\text{srce}) \setminus \{\underline{\text{déc}}\}) \cup \{\underline{\text{déc}'}\}$ <p>Explication La décision $\underline{\text{déc}}$ n'étant pas applicable sur <i>cible</i> à cause de $\underline{\text{R}}$, on peut la substituer par $\underline{\text{déc}'}$ qui est applicable et conduit à des conséquences bénéfiques sur <i>cible</i> similaires à celles de $\underline{\text{déc}}$ sur <i>srce</i>.</p>

FIG. 7.4 – Un patron pour l'adaptation d'une décision inapplicable.

Les deux études d'ACA auprès d'experts ont mis en évidence des adaptations opérationnalisant ce patron. Ces adaptations sont faites à différents niveaux de granularité des décisions. Un exemple à un niveau fin était le cas d'une patiente âgée, à mobilité réduite et habitant loin d'un centre de radiothérapie. La décision appliquant littéralement le référentiel était l'administration d'une dose quotidienne de rayons, pendant trois semaines, ce qui entraînait des déplacements jugés peu supportables par la patiente. L'adaptation a conduit à l'augmentation de la dose d par séance et à la réduction du nombre n de séances, en gardant la dose totale $n \times d$ constante : la diminution de n était compensée par l'augmentation de d (il fallait en plus tenir compte du fait que la dose d ne devait pas dépasser une certaine valeur d_{max}). Cette adaptation instancie le patron de la figure 7.4 par :

$$\begin{aligned} \underline{\text{déc}} &= n \text{ séances de radiothérapie, à dose } d \\ \underline{\text{déc}'} &= n' \text{ séances de radiothérapie, à dose } d' \text{ avec } n' < n, n' \times d' = n \times d \text{ et } d' \leq d_{\text{max}} \\ \underline{\text{R}} &= \text{mobilité réduite de la patiente} \end{aligned}$$

À un niveau de granularité large, il y a le remplacement d'un traitement d'un type par un traitement d'un autre type. Par exemple, une patiente avait, pour des raisons nerveuses, en permanence les bras croisés devant sa poitrine. S'il était possible de l'opérer sous anesthésie générale, il était pratiquement impossible de lui faire des séances de radiothérapie. Ces séances auraient eu pour but de tuer les cellules cancéreuses à proximité de la zone d'exérèse (la zone du corps enlevée par l'opération chirurgicale). L'adaptation a consisté à ne pas faire de radiothérapie et à compenser en prévoyant un geste chirurgical plus large que celui recommandé par le référentiel, englobant la zone qui aurait été visée par la radiothérapie. Cette adaptation instancie le patron de la figure 7.4 par :

$\underline{\text{déc}}$ = radiothérapie des parois de la zone d'exérèse
 $\underline{\text{déc}'}$ = chirurgie élargie (par rapport à la chirurgie de $\text{Sol}(\text{srce})$)
 $\underline{\text{R}}$ = impossibilité d'effectuer des séances de radiothérapie sur la patiente

Adaptation tenant compte des conséquences d'une décision. L'*index thérapeutique* est un outil conceptuel utilisé par les médecins (notamment, les oncologues du projet). Étant donné un patient et une décision thérapeutique, l'index thérapeutique est le rapport entre la mesure du bénéfice thérapeutique attendu (du traitement sur le patient) et la mesure des effets indésirables. Si cet index est parfois utilisé de façon quantitative (avec des valeurs numériques pour ces mesures), il peut aussi être utilisé de façon qualitative :

- (A) À effets indésirables constants, l'index augmente quand les bénéfices thérapeutiques attendus sont améliorés.
- (B) À bénéfices thérapeutiques attendus constants, l'index augmente quand les effets indésirables sont diminués.
- (C) Quand les bénéfices thérapeutiques attendus sont améliorés et les effets indésirables sont diminués, l'index augmente.

Cette notion d'index thérapeutique peut se généraliser en remplaçant les bénéfices thérapeutiques attendus (resp., les effets indésirables) par les conséquences bénéfiques (resp., néfastes) d'une décision. L'adaptation vise à trouver la décision qui donne un indice élevé, dans le contexte du problème cible. Les points (A), (B) et (C) ci-dessus peuvent ainsi être utilisés pour effectuer des adaptations.

(A) est utile en particulier quand la conséquence bénéfique de $\text{Sol}(\text{srce})$ sur cible est moins élevée que sur srce . Le cas extrême est quand une décision n'a pas de conséquence bénéfique sur cible . Un patron d'adaptation correspondant à cet extrême (mais pouvant être généralisé) est celui de la figure 7.3.

(B) est utile pour KASIMIR, en particulier pour gérer les contre-indications d'un traitement. Le patron de la figure 7.5 décrit ce type d'adaptation dans le cadre général de l'aide à la décision à partir de cas. À titre d'exemple, considérons le cas d'une patiente ayant un problème au foie pour lequel le traitement hormonothérapeutique au tamoxifène est contre-indiqué. Le référentiel ne traite pas cette contre-indication et doit donc être adapté. Une adaptation possible consiste à remplacer le tamoxifène par des anti-aromatases. Cette adaptation instancie le patron de la figure 7.5 par :

$\underline{\text{déc}}$ = hormonothérapie au tamoxifène
 $\underline{\text{déc}'}$ = hormonothérapie aux anti-aromatases
 $\underline{\text{R}}$ = allergie au tamoxifène

Certaines adaptations s'appuyant sur (B) consistent à ajouter au traitement une action qui rende une thérapie à nouveau tolérable. Par exemple, considérons une patiente ayant une tumeur au sein gauche et à qui le référentiel recommande une radiothérapie sur ce sein après chirurgie. Supposons de plus que

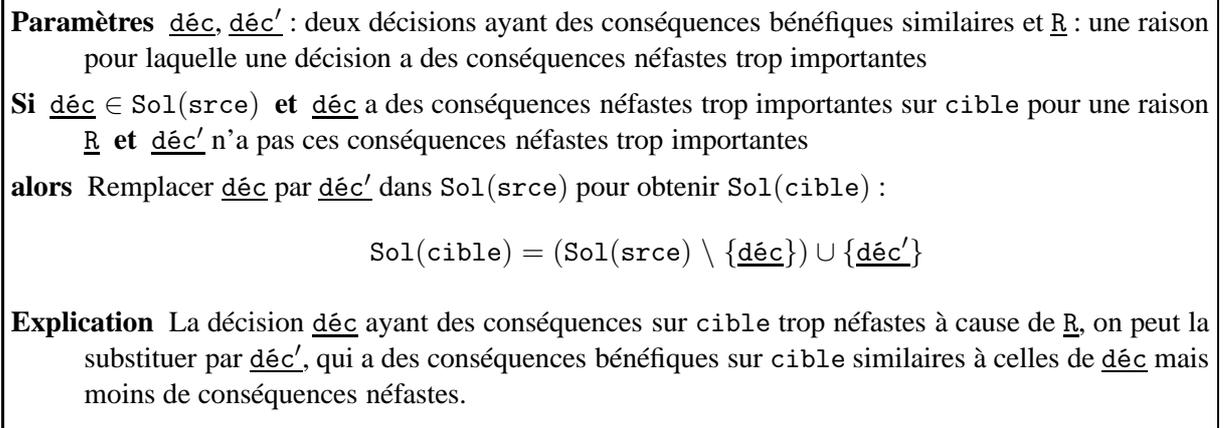


FIG. 7.5 – Un patron pour l'adaptation d'une décision ayant des conséquences néfastes trop importantes.

cette patiente porte un *pacemaker* (stimulateur cardiaque). Les rayonnements du traitement radiothérapique risquent de dérégler cet appareil, ce qui a de grandes chances de conduire à une crise cardiaque. L'adaptation consiste à déplacer le *pacemaker* avant toute cure de radiothérapie, de façon à éviter ce dérèglement. Cette adaptation peut instancier le patron de la figure 7.5 par :

$\underline{d\acute{e}c}$ = effectuer une radiothérapie du sein gauche

$\underline{d\acute{e}c}'$ = déplacer le *pacemaker* puis effectuer une radiothérapie du sein gauche

\underline{R} = la radiothérapie peut dérégler le *pacemaker*

(C) peut être vu comme une composition de (A) et (B) : une adaptation s'appuyant sur (C) peut être vue comme une adaptation le long d'un chemin de similarité de longueur 2 et dont l'une des étapes s'appuie sur (A) et l'autre sur (B).

Décision en cas d'informations manquantes. Il arrive que des informations utiles à la résolution du problème de décision cible soient manquantes. Cela arrive dans le cadre de KASIMIR, notamment quand un examen ne peut être effectué sur le patient sans le mettre en danger. Dans ce contexte, le critère pessimiste de Wald [Wald, 1950; Dubois *et al.*, 2001] peut être appliqué. Selon ce critère, les décisions doivent être évaluées sur la base de leurs pires conséquences. L'utilisation de ce critère par les cancérologues, mise en évidence lors de la première étude d'ACA auprès d'experts, relève en fait plutôt de la remémoration (guidée par l'adaptabilité) que de l'adaptation. Dans [d'Aquin *et al.*, 2005c], l'utilisation de ce critère pour l'aide à la décision à partir de cas est étudiée. Cet article présente une approche utilisant relativement peu de connaissances et une façon d'acquérir ces connaissances au cours de l'utilisation du système de RÀPC selon ce que [Hammond, 1990] appelle le *learning by remembering* : quand le système a besoin d'une préférence entre conséquences de décisions, s'il n'est pas capable de l'inférer, il la demande à un expert et pourra la réutiliser ultérieurement. Nous allons nous contenter ici d'un exemple.

Soit le cas d'une patiente atteinte du cancer du sein et dont la tumeur mesure 2 centimètres. Le référentiel (compte tenu d'autres paramètres) recommande une mastectomie partielle. Or, la radiographie montre des points blancs sur l'image assez éloignés de la tumeur et qui peuvent correspondre (a) à des cellules cancéreuses ou (b) à tout autre chose. Sous l'hypothèse (a), une mastectomie totale est recommandée — décision $\underline{d\acute{e}c}_{(a)}$. Sous l'hypothèse (b), une mastectomie partielle est recommandée —

décision $déc_{(b)}$. Si aucun examen avant la chirurgie ne peut indiquer laquelle des hypothèses (a) et (b) est correcte, la question qui se pose est de savoir s'il est préférable de faire une mastectomie totale $déc_{(a)}$ sous l'hypothèse (b) — donc un geste chirurgical inutilement large — ou de faire une mastectomie partielle $déc_{(b)}$ sous l'hypothèse (a) — qui laisserait des cellules cancéreuses dans le corps de la patiente. Ce choix correspond au choix entre le cas source recommandant $déc_{(a)}$ et celui recommandant $déc_{(b)}$.

7.4 Perspectives

Ce chapitre présente un survol de travaux sur l'adaptation (les nôtres et d'autres). Il constitue un inventaire qui est un premier pas vers une véritable synthèse : à qui demande « Comment réaliser l'adaptation ? » il répond de plusieurs façons différentes et c'est au questionneur de faire son marché. Aller vers une synthèse qui réunisse ces travaux (et les travaux à venir !) et qui serve de guide pour concevoir un système de RÀPC est une perspective de recherches à long terme.

En vue de cette synthèse, nous plaçons beaucoup d'espoir dans la métaphore des différentielles : nous avons vu qu'elle permettait de rendre compte de plusieurs approches générales de l'adaptation et il nous semble qu'elle pourrait être exploitée pour d'autres de ces approches. Cette métaphore est partiellement utilisée pour l'ACA mais, comme nous l'avons suggéré dans les perspectives de la section 7.2.2, elle pourrait l'être davantage.

De façon complémentaire, l'adaptation conservatrice évoquée à la section 7.1.5 nous semble une voie de recherche prometteuse. Son étude théorique à déjà commencée et doit se poursuivre, notamment de façon applicative.

Une autre perspective est l'étude des patrons d'adaptation. Tels qu'ils sont présentés dans ce chapitre, ils constituent une description d'adaptations avec des paramètres génériques. Aller vers une définition plus précise pourrait permettre leur représentation informatique et leur utilisation pour, notamment, l'ACA mixte. Là encore, s'inspirer de la métaphore des différentielles pour proposer un formalisme général des patrons d'adaptation est une piste de recherche qui nous semble prometteuse.

Ces perspectives qui se veulent unificatrices — vers un modèle général de l'adaptation et de l'acquisition des connaissances d'adaptation — ne sont qu'une face d'une médaille dont l'autre est l'étude des adaptations dans leur diversité. Cette diversité peut éventuellement conduire à des procédures d'adaptation *ad hoc* : s'appliquant à *un* système de RÀPC dans *un* domaine d'application particulier. Malgré leurs spécificités, ces adaptations particulières peuvent souvent (toujours ?) être généralisées en des approches de l'adaptation qu'on peut ranger dans des catalogues organisés, par exemple, selon les types de problèmes résolus par le système de RÀPC (planification, décision, etc.). Ces catalogues constituent une part de l'expertise du concepteur de systèmes de RÀPC et c'est en quoi leur diffusion peut être utile à la communauté du RÀPC, même quand ils s'agit de connaissances d'adaptation qui semblent évidentes ou qui nécessitent une acquisition de connaissances particulière (relative au domaine d'application) pour être opérationnelles.

Chapitre 8

Gestion des connaissances du système KASIMIR

Dans le cadre du projet KASIMIR, les connaissances sont constituées de référentiels et de connaissances d'adaptation de ces référentiels. Un référentiel peut être vu comme une base de cas ou comme une base de règles de décision, selon qu'il soit manipulé par un raisonnement à partir de cas ou par un raisonnement déductif. La gestion des connaissances au sein du système KASIMIR est décrite dans ce chapitre en plusieurs points : l'acquisition, la représentation, l'interrogation, l'édition, la maintenance, la diffusion et l'évolution des connaissances d'un système de RÀPC.

8.1 Acquisition des connaissances

Plusieurs personnes ont travaillé sur l'acquisition des référentiels. En particulier, Benoît Bresson, lors de son stage d'ingénieur CNAM, a implanté une première version du référentiel sein (ainsi que la première version du système KASIMIR) [Bresson, 2000]. Puis, Florian Boisson, lors de son stage de DESS, a implanté une version du référentiel pour le diagnostic et le traitement du cancer de la prostate [Boisson, 2000]. D'autres référentiels ont été implantés par la suite, par des ingénieurs et des stagiaires d'Oncolor. Cette acquisition s'est faite auprès de plusieurs experts en cancérologie, notamment Maria Rios qui s'est beaucoup investie dans ce travail. Catherine Sauvagnac, alors doctorante en psycho-ergonomie, mais également médecin du travail, a joué un grand rôle dans l'acquisition des référentiels et des connaissances d'adaptation : de par sa double spécialité, elle a pu jouer le précieux rôle d'interprète entre experts et informaticiens.

L'acquisition des référentiels consiste en un travail d'explicitation et de désambiguïation des référentiels « papiers ». Ceux-ci sont sous la forme de documents textuels et d'organigrammes (appelés « arbres de décision » sur www.oncolor.org). Par exemple, la décision « 6 cures de niveau 1 ou 2 selon contexte » qu'on peut trouver dans un de ces documents, doit être explicitée (afin de préciser de quel contexte il s'agit).

L'acquisition des connaissances d'adaptation a été présentée au chapitre précédent (section 7.2).

8.2 Représentation des connaissances

La représentation des connaissances et le raisonnement artificiel sont deux problématiques intimement liées [Kayser, 1997]. Il peut donc paraître surprenant qu'elles soient abordées de façon si nettement

séparée dans ce mémoire : le raisonnement (à partir de cas) dans les chapitres précédents et la représentation des connaissances dans cette section. Cela peut s'expliquer de la façon suivante. Les chapitres précédents ont été rédigés avec la volonté de s'abstraire de particularités liées à des domaines d'application : pour dégager des idées communes à deux applications dans lesquelles les problèmes sont représentés de façon très différentes (par des graphes moléculaires pour RÉSYN/RAPC et par des représentations s'appuyant sur des attributs de patients pour KASIMIR), cette abstraction était nécessaire. Les principes des approches proposées ont fait apparaître des besoins en représentation des connaissances. La réponse à ces besoins peut varier d'une classe d'applications à une autre. Cette section traite de la réponse à ces besoins pour l'application KASIMIR, mais en gardant un souci de généralité : les choix de représentation conduisent à se restreindre à une classe d'applications, mais ces choix ont été faits pour amoindrir cette restriction.

Le système KASIMIR 3 (ainsi que ses versions antérieures, KASIMIR 1 et KASIMIR 2) s'appuie sur un formalisme de représentation des connaissances par objets *ad hoc*. Le système KASIMIR 4 est un portail sémantique (i.e., un portail du Web sémantique) qui s'appuie sur la logique de descriptions OWL DL (et ses extensions) qui est une partie de OWL, recommandation du W3C pour la représentation des ontologies du Web sémantique [Bechhofer *et al.*, 2007]. Une grande partie de ce qui est présenté dans cette section a été développée dans les formalismes de KASIMIR 3 et KASIMIR 4.

La représentation des connaissances dans KASIMIR 4 a été étudiée par Mathieu d'Aquin dans le cadre de sa thèse [d'Aquin, 2005]. Mathieu a également développé un outil de traduction automatique d'un référentiel sous KASIMIR 3 en un référentiel sous KASIMIR 4.

8.2.1 Représentations par objets et logiques de descriptions

Afin de ne pas multiplier les formalismes, nous nous appuyons sur la logique de descriptions $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$ et commencerons par un bref rappel de ce formalisme.

Rappel sur $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$. Le rapport [Napoli, 1997] est une introduction aux logiques de descriptions et le livre [Baader *et al.*, 2003] constitue la référence actuelle. Les logiques de descriptions s'appuient sur les notions de *concepts* (ou *classes*), de *rôles* et d'*instances*, qui représentent respectivement des ensembles, des relations binaires et des éléments d'un domaine d'interprétation. Plus précisément, soit $\mathcal{I} = (\Delta_{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$, une *interprétation* : $\Delta_{\mathcal{I}}$ est un ensemble (le *domaine d'interprétation*) et $\cdot^{\mathcal{I}}$ est une fonction appelée *fonction d'interprétation*, qui à un concept C associe $C^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta_{\mathcal{I}}$, à un rôle r associe $r^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta_{\mathcal{I}} \times \Delta_{\mathcal{I}}$, et à une instance a associe $a^{\mathcal{I}} \in \Delta_{\mathcal{I}}$. La logique de descriptions \mathcal{ALC} s'appuie sur les constructeurs suivants : \top , \perp , $C \sqcap D$, $C \sqcup D$, $\neg C$, $\exists r.C$ et $\forall r.C$ où C et D sont des concepts et r est un rôle. Étant donné une interprétation \mathcal{I} , on a :

$$\begin{aligned} \top^{\mathcal{I}} &= \Delta_{\mathcal{I}} & (\neg C)^{\mathcal{I}} &= \Delta_{\mathcal{I}} \setminus C^{\mathcal{I}} \\ \perp^{\mathcal{I}} &= \emptyset & (\exists r.C)^{\mathcal{I}} &= \{x \in \Delta_{\mathcal{I}} \mid \exists y \in \Delta_{\mathcal{I}}, (x, y) \in r^{\mathcal{I}} \text{ et } y \in C^{\mathcal{I}}\} \\ (C \sqcap D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cap D^{\mathcal{I}} & (\forall r.C)^{\mathcal{I}} &= \{x \in \Delta_{\mathcal{I}} \mid \forall y \in \Delta_{\mathcal{I}}, (x, y) \in r^{\mathcal{I}} \Rightarrow y \in C^{\mathcal{I}}\} \\ (C \sqcup D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cup D^{\mathcal{I}} \end{aligned}$$

$\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$ est l'extension de \mathcal{ALC} par un ou plusieurs domaines concrets. Un *domaine concret* D est un couple (Δ_D, Φ_D) où Δ_D est un ensemble et où Φ_D est un ensemble de noms de prédicats sur Δ_D [Lutz, 2003]. Seuls les prédicats unaires sont considérés ici, ce qui signifie que tout $\varphi \in \Phi_D$ est interprété comme un sous-ensemble φ^D de Δ_D . Plusieurs domaines concrets sont représentés dans KASIMIR. Retenons ici $R = (\Delta_R, \Phi_R)$ et $Z = (\Delta_Z, \Phi_Z)$, les domaines concrets des réels et des entiers ordonnés.

$\Delta_R = \mathbb{R}$ est l'ensemble des réels et Φ_R est l'ensemble des noms de prédicats \top_R , \perp_R et P_x où $P \in \{<, \leq, \geq, >\}$ et $x \in \Delta_R$. \top_R est un nom pour Δ_R et \perp_R , un nom pour \emptyset : $\top_R^R = \Delta_R$ et $\perp_R^R = \emptyset$. P_x

représente l'ensemble P_x^R des $t \in \Delta_R$ tels que $t P x$. Par exemple, $>_1^R =]1; +\infty[$. Plus généralement, P_x^R est un intervalle avec une borne infinie et une borne finie (x).

$\Delta_Z = \mathbb{Z}$ est l'ensemble des entiers et Φ_Z est l'ensemble des noms de prédicats \top_Z , \perp_Z et P_x où $P \in \{<, \leq, \geq, >\}$ et $x \in \Delta_Z$. L'interprétation de ces prédicats est $\top_Z^I = \Delta_Z$, $\perp_Z^I = \emptyset$ et $P_x^Z = \{n \in \Delta_Z \mid n P x\}$ (p. ex., $\geq_3^Z = \{3, 4, 5, \dots\}$).

Étant donné un domaine concret D , les constructeurs d' $\mathcal{ALC}(D)$ sont les constructeurs d' \mathcal{ALC} auquel s'ajoute $\exists g.\varphi$, où g est un *attribut concret* et $\varphi \in \Phi_D$. g s'interprète comme une fonction partielle $g^I : \Delta_I \rightarrow \Delta_D$. La sémantique du concept $\exists g.\varphi$ est donnée par

$$(\exists g.\varphi)^I = \{x \in \Delta_I \mid g^I(x) \text{ est définie et } g^I(x) \in \varphi^D\}$$

Pour $D \in \{R, Z\}$, g un attribut concret et $x \in \Delta_D$, le terme $\exists g.=_x$ est une abréviation de $\exists g.\leq_x \sqcap \exists g.\geq_x$.

Une base de connaissances en $\mathcal{ALC}(D)$ est donnée par un ensemble d'*axiomes* et un ensemble d'*assertions*. Un axiome est une expression de la forme $C \sqsubseteq D$ ou de la forme $C \equiv D$, C et D étant deux concepts. Une assertion est une expression de la forme $C(a)$, de la forme $r(a, b)$ ou de la forme $g(a, x)$ où C , r , a , b , g et x sont respectivement un concept, un rôle, deux instances, un attribut concret et un élément de Δ_D . Un *modèle* d'une base de connaissances est une interprétation I qui satisfait tous ses axiomes et toutes ses assertions, sachant que les axiomes et assertions ci-dessus sont satisfaits si $C^I \subseteq D^I$, $C^I = D^I$, $a^I \in C^I$, $(a, b) \in r^I$ et $g^I(a^I) = x$.

Représentation des référentiels. Le formalisme de KASIMIR 3 est celui d'une représentation des connaissances par objets simple. Il est équivalent à la partie d' $\mathcal{ALC}(D)$ correspondant aux constructeurs $C \sqcap D$, $\exists r.C$ et $\exists g.\varphi$ et pour laquelle la notion d'instance n'est pas introduite. Il ne permet pas de gérer des exceptions à l'héritage, ne permet pas d'effectuer des attachements procéduraux (méthodes ou réflexes), etc.

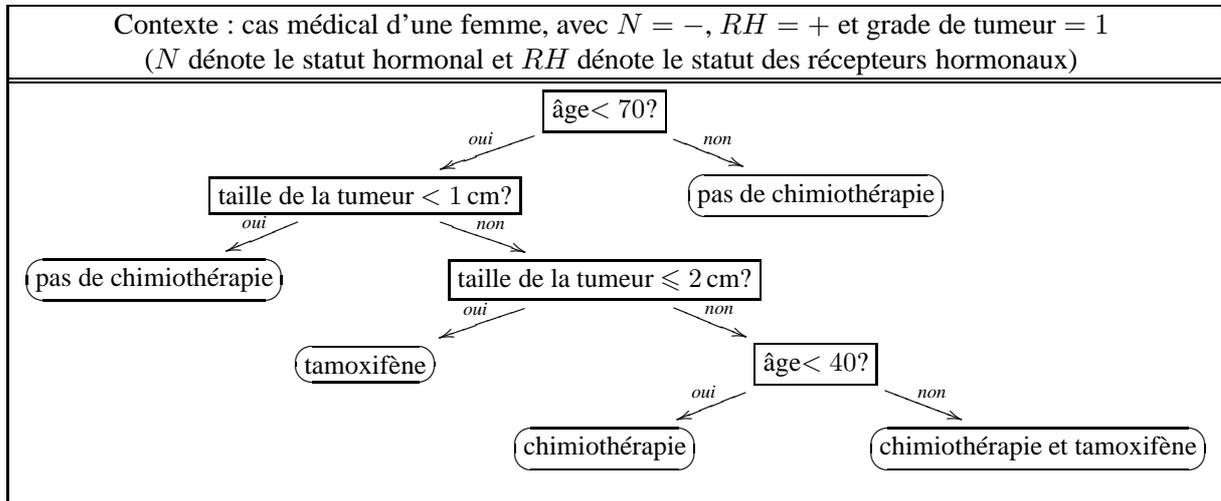


FIG. 8.1 – Un référentiel représenté par un arbre de décision (extrait et adapté du référentiel du traitement du cancer du sein décrit sur www.oncolor.org/).

Considérons l'arbre de décision de la figure 8.1. Cet arbre est une représentation d'un référentiel, après le travail d'explicitation et de désambiguïation évoqué dans la section 8.1. Cet arbre est représenté par la base de connaissances de la figure 8.2. À titre d'exemple, si l'on considère les axiomes [A3]

[A0] $C_0 \equiv \text{Patient} \sqcap \exists \text{sexe.Féminin} \sqcap \exists N.\text{Faux} \sqcap \exists RH.\text{Vrai} \sqcap \exists \text{tumeur}.\exists \text{grade.} =_1$	
[A1] $C_1 \equiv C_0 \sqcap \exists \text{âge.} <_{70}$	[A9] $C_2 \sqsubseteq \exists \text{reco.Pas-de-chimiothérapie}$
[A2] $C_2 \equiv C_0 \sqcap \exists \text{âge.} \geq_{70}$	[A10] $C_3 \sqsubseteq \exists \text{reco.Pas-de-chimiothérapie}$
[A3] $C_3 \equiv C_1 \sqcap \exists \text{tumeur}.\exists \text{taille.} <_1$	[A11] $C_5 \sqsubseteq \exists \text{reco.Tamoxifène}$
[A4] $C_4 \equiv C_1 \sqcap \exists \text{tumeur}.\exists \text{taille.} \geq_1$	[A12] $C_7 \sqsubseteq \exists \text{reco.Chimiothérapie}$
[A5] $C_5 \equiv C_4 \sqcap \exists \text{tumeur}.\exists \text{taille.} \leq_2$	[A13] $C_8 \sqsubseteq \exists \text{reco.Chimio+tam}$
[A6] $C_6 \equiv C_4 \sqcap \exists \text{tumeur}.\exists \text{taille.} >_2$	
[A7] $C_7 \equiv C_6 \sqcap \exists \text{âge.} <_{40}$	
[A8] $C_8 \equiv C_6 \sqcap \exists \text{âge.} \geq_{40}$	

FIG. 8.2 – Une base de connaissances représentant le référentiel de la figure 8.1.

et [A10], le premier définit le concept C_3 (en s'appuyant sur les définitions de concepts des axiomes [A0] et [A1]) et le second indique qu'à tout individu $x \in C_3^{\mathcal{I}}$ est associée la recommandation « pas de chimiothérapie ». Ces axiomes correspondent à la branche la plus à gauche de l'arbre de décision. Les concepts qui ne sont pas introduits par des axiomes (Patient, Féminin, etc.) sont primitifs : ils constituent les briques de base de la représentation.

Notons que la traduction du référentiel du traitement du cancer du sein au stade non métastatique sous cette forme fait appel à plus de 1000 concepts. Pour KASIMIR 4, qui bénéficie de l'expressivité d'OWL DL (i.e., celle de $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$, qui contient $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$), il devrait être possible d'avoir une représentation avec moins de concepts.

Classification dure dans KASIMIR 3 et KASIMIR 4. Dans KASIMIR 3, les problèmes et les solutions sont représentés par des concepts¹³. Les inférences utilisées pour KASIMIR 3 sont la subsumption de concepts et la classification de concepts. La subsumption est un test qui indique si un concept C est plus général qu'un concept D , ce qu'on dénote par $C \sqsupseteq D$ ou $D \sqsubseteq C$, qui se lit « C subsume D », « D est subsumé par C » ou encore « D est un sous-concept de C ». Par définition, $C \sqsupseteq D$ si, pour tout modèle \mathcal{I} de la base de connaissances, $C^{\mathcal{I}} \supseteq D^{\mathcal{I}}$. C et D sont équivalents ($C \equiv D$) s'ils représentent le même ensemble : $C^{\mathcal{I}} = D^{\mathcal{I}}$, ce qui revient à dire que $C \sqsupseteq D$ et $D \sqsupseteq C$. La classification de concept consiste, étant donné une base de connaissances et un concept C , à exhiber tous les concepts qui subsument C (et aussi ceux qui sont subsumés par C , mais nous n'en tiendrons pas compte ici).

Considérons le problème cible « Quel traitement recommander pour une femme de 39 ans atteinte d'un cancer du sein, ayant les caractéristiques $N = -$, $RH = +$ et une tumeur de 3 cm de grade 1 ? » cible sera représenté par le concept de même nom (cible) introduit par l'axiome suivant :

$$\begin{aligned} \text{cible} \equiv & \text{Patient} \sqcap \exists \text{sexe.Féminin} \sqcap \exists \text{âge.} =_{39} \sqcap \text{Patient} \sqcap \exists N.\text{Faux} \sqcap \exists RH.\text{Vrai} \\ & \sqcap \exists \text{tumeur} . (\exists \text{taille.} =_3 \sqcap \exists \text{grade.} =_1) \end{aligned} \quad (8.1)$$

La classification dure consiste à classer cible dans la hiérarchie des problèmes, i.e., dans la hiérarchie des concepts de la base de connaissances de la figure 8.2 qui sont plus spécifiques que Patient. Le résultat de cette classification est l'ensemble des concepts plus généraux que cible réifiés dans la base :

$$\{\text{Patient}, C_0, C_1, C_4, C_6, C_7\} \quad (8.2)$$

¹³Dans ce chapitre, nous supposons, pour simplifier, que la question associée à un problème est sous-entendue (cf. section 5.3.2).

Or l'axiome [A12] indique que C_7 est un sous-concept de $\exists \text{reco.Chimiothérapie}$, par conséquent, le référentiel recommande une chimiothérapie pour cette patiente.

On suppose qu'un problème est représenté par un concept plus spécifique que *Patient*, qu'une solution est représentée par un concept plus spécifique que *Traitement* (*Pas-de-chimiothérapie*, *Chimiothérapie*, *Tamoxifène* et *Chimio+tam* étant des sous-concepts de *Recommandation*) et que le rôle *reco* permet de lier une solution à un problème. Autrement dit, si on infère que $\text{pb} \sqsubseteq \exists \text{reco.sol}$, cela signifie que le problème représenté par *pb* a pour solution la solution représentée par *sol*. Dans ces conditions, on peut vérifier que la relation de subsomption entre concepts peut être considérée comme une relation de généralité entre problèmes, au sens où les hypothèses (6.2), (6.3), (6.4), (6.5) et (6.6) sur \sqsubseteq sont vérifiées (cf. chapitre 6).

Dans KASIMIR 4, un problème peut être représenté par un concept, mais aussi par une instance. En l'occurrence, si l'on reprend l'exemple ci-dessus, ce problème sera représenté par l'instance cible définie par les assertions suivantes :

$$\begin{array}{l} \text{Patient}(\text{cible}) \quad (\exists \text{sexe.Féminin})(\text{cible}) \quad \text{âge}(\text{cible}, 39) \quad (\exists \text{N.Faux})(\text{cible}) \\ (\exists \text{RH.Vrai})(\text{cible}) \quad \text{Tumeur}(t) \quad \text{tumeur}(\text{cible}, t) \quad \text{taille}(t, 3) \quad \text{grade}(t, 1) \end{array}$$

Si *cible* est représenté par une instance, la classification dure s'appuie sur la *test d'instanciation* et sur la *classification d'instance*. Étant donné un concept C et une instance a , le test d'instanciation vérifie si $a^{\mathcal{I}} \in C^{\mathcal{I}}$ pour tout modèle \mathcal{I} de BC, ce qu'on note $C \xleftarrow{\text{est un}} a$. La classification d'instance associe à une instance a et à une base de connaissances BC l'ensemble des concepts C de BC tels que $C \xleftarrow{\text{est un}} a$. La classification dure consiste alors à classer *cible* dans BC et à ne retenir que les sous-concepts de *Patient*, ce qui donne l'ensemble (8.2) pour notre exemple. Enfin, la classification dure sélectionne parmi ces concepts un problème source, autrement dit un concept *srce* tel qu'il existe un concept $\text{Sol}(\text{srce})$ réalisant $\text{srce} \sqsubseteq \exists \text{reco.Sol}(\text{srce})$. Dans l'exemple : $\text{srce} = C_7$ et $\text{Sol}(\text{srce}) = \text{Chimiothérapie}$. L'adaptation qui suit la classification dure consiste à instancier $\text{Sol}(\text{srce})$ en une solution $\text{Sol}(\text{cible})$ de *cible*. Dans l'exemple, la solution de *cible* sera une instance *chim1* de *Chimiothérapie*, introduite par l'assertion *Chimiothérapie(chim1)*. Cette adaptation peut être représentée par la reformulation $\left(\xleftarrow{\text{est un}}, \text{Instanciation} \right)$ où *Instanciation* associe à un problème d'adaptation $(\text{srce}, \text{Sol}(\text{srce}), \text{cible})$ une instance $\text{Sol}(\text{cible})$ de $\text{Sol}(\text{srce})$, *srce* et $\text{Sol}(\text{srce})$ étant des concepts et *cible* étant une instance.

8.2.2 Représentation floue

Le système KASIMIR-FLOU, extension de KASIMIR 3, a été développé lors du stage de DESS de Julien Lévêque [Lévêque, 2001]. L'extension floue de KASIMIR 4 a été étudiée de façon théorique lors de la thèse de Mathieu d'Aquin et reste à implanter.

En reprenant l'exemple ci-dessus de la femme de 39 ans, on peut se rendre compte que son âge est proche du seuil de décision de 40 ans. Ceci pose problème si le choix de ce seuil n'est pas très précis. En effet, si cette femme avait juste un an de plus, le traitement « chimiothérapie et tamoxifène » aurait été recommandé. Par conséquent, il semble raisonnable que le système KASIMIR fasse les deux recommandations correspondant aux concepts *Chimiothérapie* et *Chimio+tam*, charge à l'utilisateur de faire un choix ou de combiner ces deux recommandations (p. ex., avec une dose normale de produits de chimiothérapie et une petite dose de tamoxifène).

Pour prendre en compte cela, les seuils classiques ont été remplacés par des seuils flous. Cela revient à ajouter aux prédicats de domaines concrets $D \in \{\mathbb{R}, \mathbb{Z}\}$ les noms de prédicats $\leq_{a\pm b}$ et $\geq_{a\pm b}$ avec

$a, b \in \Delta_D$ et $b > 0$, sachant qu'un tel nom de prédicat φ s'interprète comme un sous-ensemble flou φ^D de Δ_D :

$$\text{pour } x \in \Delta_D, \quad \leq_{a\pm b}^D(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq a - b \\ \frac{a+b-x}{2b} & \text{si } a - b \leq x \leq a + b \\ 0 & \text{si } a + b \leq x \end{cases}$$

$$\geq_{a\pm b}^D(x) = n(\leq_{a\pm b}^D(x))$$

où $n : v \in [0; 1] \mapsto 1 - v \in [0; 1]$ est une « négation floue ».

On peut remplacer les seuils classiques \leq_a et \geq_a par des seuils flous $\leq_{a\pm b}$ et $\geq_{a\pm b}$ en déterminant la largeur $2b$ de la « zone floue $[a - b; a + b]$ ». Considérons une nouvelle base de connaissances obtenue en donnant une zone floue de largeur $2b = 2$ pour les tailles de tumeur et une zone floue de largeur $2b = 10$ pour les âges. Cela signifie en particulier que les axiomes [A6], [A7] et [A8] de la figure 8.2 sont remplacés respectivement par :

$$[A6'] \quad C_6 \equiv C_4 \sqcap \exists \text{tumeur} . \exists \text{taille} . \geq_{2\pm 1}$$

$$[A7'] \quad C_7 \equiv C_6 \sqcap \exists \text{âge} . \leq_{40\pm 5}$$

$$[A8'] \quad C_8 \equiv C_6 \sqcap \exists \text{âge} . \geq_{40\pm 5}$$

L'introduction de ce type de concepts entraîne une nécessaire modification de la sémantique : les concepts sont interprétés comme des sous-ensembles flous du domaine d'interprétation. Par exemple, $\exists g . \varphi$ s'interprète comme une application

$$(\exists g . \varphi)^I : x \in \Delta_I \mapsto \varphi^D(g^I(x)) \in [0; 1]$$

La résolution d'un problème défini par un concept cible se fait alors par classification floue, au sens du chapitre 6 : on cherche à déterminer les couples (C, s) où C est un concept qui est plus général que cible à un degré $s > 0$: $F_{\supseteq}(C, \text{cible}) = s$. Le problème se ramène alors à définir le degré de subsomption F_{\supseteq} entre deux concepts, qui coïncidera avec la relation de généralité floue entre problèmes. En nous appuyant sur les travaux de [Tresp et Molitor, 1998], nous proposons la définition suivante, C et D étant deux concepts :

$$F_{\supseteq}(C, D) = \inf\{F_{\supseteq}(C^I, D^I) \mid I : \text{modèle de la base de connaissances}\}$$

où $F_{\supseteq}(A, B)$ est une mesure du degré d'inclusion de B dans A , A et B étant deux sous-ensembles flous de Δ_I . Si on définit F_{\supseteq} par $F_{\supseteq}(A, B) = \inf_{x \in \Delta_I} F_{\Rightarrow}(B(x), A(x))$, où F_{\Rightarrow} est une implication floue, il faut choisir F_{\Rightarrow} pour que l'on ait l'équivalence $F_{\supseteq}(A, B) = 1$ ssi $A \supseteq B$, ce qui entraînera l'équivalence $F_{\supseteq}(C, D) = 1$ ssi $C \supseteq D$ (qui est l'hypothèse (6.11) sur la relation de généralité floue entre problèmes). Dans [Dubois *et al.*, 1991], plusieurs implications floues vérifiant cette propriété sont présentées, en particulier celle de Gödel et celle de Łukasiewicz.

Dans [d'Aquin *et al.*, 2006c], sont présentés des détails sur le calcul de F_{\supseteq} dans KASIMIR 3 et sur la façon dont F_{\supseteq} pourrait être implantée pour KASIMIR 4 en s'appuyant sur un moteur d'inférence d'une logique de descriptions classique. Dans le même document, l'exemple du problème cible ci-dessus (cf. (8.1)) avec la base de connaissances avec des seuils flous est détaillé : $F_{\supseteq}(C_7, \text{cible}) > F_{\supseteq}(C_8, \text{cible}) > 0$, donc KASIMIR recommande Chimiothérapie et Chimio+tam, dans cet ordre.

Dans [d'Aquin *et al.*, 2004e], une étude et une comparaison de logiques de descriptions floues et de formalismes apparentés (représentation par objets floue, logiques de descriptions possibilistes, etc.) permet de mettre en évidence trois manières d'introduire le flou dans ces formalismes : par les domaines concrets (comme pour KASIMIR), par des modificateurs flous de concepts (voir par exemple [Tresp et

Molitor, 1998]) et par des axiomes et assertions floues (voir par exemple [Straccia, 2001]). Notons une quatrième : l'utilisation de quantificateurs flous [Sánchez et Tettamanzi, 2005].

Concluons cette section par une remarque. Au chapitre 6, le flou était introduit via la fuzzification de \sqsubseteq en F_{\sqsubseteq} . Ici, pour KASIMIR, ce sont les concepts — et donc les cas — qui sont représentés à l'aide de prédicats flous et F_{\sqsubseteq} est défini sur cette base. Cela signifie que la notion de similarité que véhicule F_{\sqsubseteq} est définie dans KASIMIR au niveau de chaque cas : un cas définit les frontières floues de son domaine d'application. Au-delà de ces frontières (pour un degré de subsomption inférieur à un seuil σ_{\sqsubseteq}), la réutilisation du cas nécessite une adaptation.

8.2.3 Intégration du RÀPC dans KASIMIR 4

L'intégration du RÀPC dans KASIMIR 4 a été conçue et développée par Mathieu d'Aquin qui s'est efforcé de réutiliser au maximum les techniques du Web sémantique [d'Aquin, 2003; d'Aquin, 2005].

Pour mettre en œuvre le processus de classification élastique décrit au chapitre 5, trois problèmes se posent : (1) Comment représenter les cas ? (2) Comment représenter les reformulations constituant les connaissances d'adaptation ? (3) Comment construire les chemins de similarité et de modifications ?

La représentation des problèmes, des solutions et des cas a été évoquée ci-dessus, section 8.2.1. Rappelons simplement qu'un problème est représenté par un concept (en particulier pour les problèmes sources du référentiel) ou par une instance, qu'un problème qui est représenté par un concept P, sous-concept de Patient, est associé à une solution également représentée par un concept S, sous-concept de Traitement, à l'aide du rôle reco ($P \sqsubseteq \exists \text{reco}.S$) et qu'un problème représenté par une instance p de Patient est associé à une instance s de Traitement par le rôle reco (ce qui revient à l'assertion $\text{reco}(p, s)$). Les cas eux-mêmes ne sont pas réifiés dans KASIMIR 4 (du moins dans sa version actuelle).

Le service de RÀPC développé pour KASIMIR 4 suppose que le problème cible est représenté par une instance. Les chemins de similarité qu'il construit ne contiennent chacun qu'un seul problème qui soit représenté par un concept — le problème srce — et s'appuie sur des reformulations (r, \mathcal{A}_r) où r relie deux instances, à l'exception de la reformulation $\left(\overset{\text{est un}}{\longleftarrow}, \text{Instanciation} \right)$ évoquée à la fin de la section 8.2.1. À part cette dernière, ces reformulations sont de la forme $(d \leftarrow, \mathcal{A}_{d \leftarrow})$ où d est une règle qui transforme une instance de problème en une autre instance de problème et où $\mathcal{A}_{d \leftarrow}$ transforme une instance de solution en une autre instance de solution. La représentation des reformulations s'appuie sur OWL DL et est décrite en détail dans [d'Aquin, 2005].

Chaque $d \leftarrow$ et chaque $\mathcal{A}_{d \leftarrow}$ est implanté sous la forme d'un service Web qui fait appel à des mécanismes d'inférences opérant sur le formalisme OWL DL. Le choix de l'application des reformulations adéquates pour construire un chemin de similarité se fait par une recherche dans un espace d'états à l'image de ce qui est fait pour RÉSYN/RÀPC, sauf que la recherche ne se fait que par des règles de transformation allant de cible à srce (pas de relation r de la forme \rightarrow_g , i.e. s'appuyant sur une règle g comme c'était le cas pour RÉSYN/RÀPC, cf. (6.18), page 51). Cela permet de construire des chemins de similarité de la forme :

$$\text{srce} \overset{\text{est un}}{\longleftarrow} \text{pb}_n \quad d_n \leftarrow \text{pb}_{n-1} \quad d_{n-1} \leftarrow \dots \text{pb}_1 \quad d_1 \leftarrow \text{pb}_0 = \text{cible}$$

L'adaptation se fait alors en appliquant successivement Instanciation, $\mathcal{A}_{d_n \leftarrow}$, $\mathcal{A}_{d_{n-1} \leftarrow}$, ... et $\mathcal{A}_{d_1 \leftarrow}$.

Travaux proches. Plusieurs travaux utilisent les principes des représentations par objets et des logiques de descriptions pour le RÀPC. En particulier, les formalismes de représentation par objets NOOS [Arcos et Plaza, 1996] et ROCADE [Fuchs, 1997; Fuchs, 1996] sont adaptés au RÀPC. En ce qui concerne les

logiques de descriptions, de nombreux travaux se sont appuyés sur leurs formalismes et sur les inférences associées pour le RÀPC, en particulier, la subsomption et la classification (voir en particulier [Koehler, 1994] et [Kamp, 1996]). Une autre inférence beaucoup utilisée pour la remémoration est la recherche du plus petit subsumant commun de deux concepts, que ce soit dans le système NOOS (où il est appelé *antiunification* [Plaza, 1995]) ou dans la logique de descriptions C-Classic : dans [Salotti et Ventos, 1999], en plus de cette inférence mettant en évidence les points communs de deux concepts (leur similarité), une autre inférence mettant en évidence leurs dissimilarité sous la forme d'un concept est également introduite. Une description plus détaillée de travaux sur l'utilisation de ces formalismes et des inférences associées pour le RÀPC est décrite dans [Lieber et Napoli, 1999].

8.2.4 Représentation multi-points de vue et RÀPC

Le stage de DEA de Mathieu d'Aquin avait pour objectif l'étude des besoins en représentation des connaissances induits par l'adaptation en RÀPC et, plus particulièrement, dans le cadre de KASIMIR [d'Aquin, 2002]. Ce stage a permis de mettre en évidence l'intérêt de la notion de point de vue pour mettre en œuvre l'adaptation en RÀPC [d'Aquin *et al.*, 2002]. Mathieu a poursuivi ce travail lors de sa thèse, d'abord dans un cadre de représentation des connaissances par objets [d'Aquin *et al.*, 2004f], puis dans le cadre d'OWL [d'Aquin *et al.*, 2005b; d'Aquin *et al.*, 2007b].

Points de vue pour TICCO et KASIMIR. Nous définissons un point de vue sur un domaine comme une représentation partielle de ce domaine. En général, un point de vue correspond à un ensemble de tâches particulières. Par exemple, le travail de Pierre Jambaud [Jambaud, 1996] dans le cadre du projet TICCO considérait les problèmes de synthèse selon plusieurs points de vue, en particulier, selon les points de vue de la fonctionnalité (groupes fonctionnels, familles chimiques), de la stéréochimie (agencement relatif des atomes dans l'espace) et de la topologie (étude des cycles et chaînes composant la molécule ainsi que de leurs relations). La synthèse est envisagée selon chacun de ces points de vue pdv, en sélectionnant des méthodes de synthèse associées à pdv, puis la construction d'une solution globale passe par un dialogue entre points de vue.

Dans le cadre de KASIMIR, les points de vue correspondent aux disciplines impliquées dans la prise de décision qui sont aussi les disciplines des experts des RCP. En particulier, les points de vue chimio, chir et radio correspondent respectivement à la chimiothérapie, à la chirurgie et à la radiothérapie¹⁴. Étant donné un problème pb, sa représentation se fera dans chaque point de vue pdv par un concept ou une instance notée pdv:pb. Autrement dit, le problème « global » pdv sera l'ensemble $\{pdv:pb\}_{pdv}$ où pdv décrit l'ensemble de points de vue $\{chimio, chir, radio\}$. Par exemple, la localisation de la tumeur joue un rôle dans chir et radio, mais pas dans chimio ; elle ne sera donc pas représentée dans ce dernier point de vue.

Représentation et raisonnements multi-points de vue. La représentation multi-points de vue se fait d'une part par une représentation dans chaque point de vue (avec des formalismes qui peuvent différer d'un point de vue à un autre) et d'autre part par des *passerelles*. Une passerelle $e_1 \xrightarrow{\ell} e_2$ décrit un lien entre une entité de représentation e_1 d'un point de vue et une entité e_2 d'un autre point de vue, lien dont la sémantique est déterminée par le type de lien ℓ . Par exemple $chir:Patient \xrightarrow{\sqsubseteq} chimio:Patient$ indique qu'à tout patient vu du point de vue chir correspond un patient vu du point de vue chimio. Le référentiel est représenté par un ensemble de référentiels correspondant aux différents

¹⁴En toute rigueur, il faudrait préciser que ces points de vue se font dans le cadre de la prise de décision, p. ex. chir est le point de vue d'un chirurgien en train de prendre une décision thérapeutique, pas en train d'effectuer une opération chirurgicale.

points de vue $\{R_{\text{chimio}}, R_{\text{chir}}, R_{\text{radio}}\}$ et par un ensemble de passerelles. Un raisonnement multi-points de vue se fait au niveau local (pdv:cible est résolu dans R_{pdv}) et au niveau global en tenant compte des passerelles. La représentation multi-points de vue de KASIMIR a d'abord été étudiée dans un cadre objets pour KASIMIR 3 [d'Aquin *et al.*, 2004f], en s'inspirant notamment du système TROEPS [Mariño, 1993]. Puis, elle a été étudiée pour KASIMIR 4 [d'Aquin *et al.*, 2005b; d'Aquin *et al.*, 2007b], en s'appuyant sur le formalisme C-OWL pour la représentation d'ontologies contextualisées [Bouquet *et al.*, 2004].

À titre d'exemple, considérons une patiente cible dont la tumeur est de $T = 3$ cm et dont le sein est petit. Étant donné d'autres caractéristiques, le référentiel recommande une chimiothérapie au FEC50, car $T \leq 4$ cm. À cause de la petitesse du sein, le cas est discuté lors d'une RCP. D'un point de vue chimio , la taille du sein ne joue aucun rôle mais il n'en va pas de même du point de vue chir dans lequel la taille de la tumeur peut être considérée schématiquement comme relative à la taille du sein. Dans ce cas, chir:cible est assimilé (via une reformulation adéquate) à chir:pb_1 dont les caractéristiques sont les mêmes que chir:cible , sauf la taille de la tumeur qui sera (mettons) de $T = 5$ cm pour chir:pb_1 . Cela revient à dire qu'une tumeur de 3 cm dans un petit sein est assimilée à une tumeur de 5 cm dans un sein « normal ». Le raisonnement pour $\text{pb}_1:\text{chir}$ conduit à une mastectomie totale. Pour représenter les choses de façon intuitive, le chirurgien « verra » une tumeur de 5 cm alors que le chimiothérapeute « verra » une tumeur de 3 cm, et la représentation multi-points de vue permet de gérer cette apparente (c'est le mot) contradiction. La radiothérapie a pour rôle d'irradier la zone d'exérèse après chirurgie afin d'éliminer d'éventuelles cellules cancéreuses proches de la tumeur mais n'y appartenant pas. La décision radiothérapique dépend donc de la décision chirurgicale, qui peut se modéliser par un ensemble de passerelles allant du point de vue chir au point de vue radio , telles que :

$$\begin{aligned} \text{chir:Patient} \sqcap \exists \text{reco.AblationPartielleDuSein} \\ \xrightarrow{\sqsubseteq} \text{radio:Patient} \sqcap \exists \text{reco.RadiothérapieSein} \end{aligned} \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} \text{chir:Patient} \sqcap \exists \text{reco.AblationTotaleDuSein} \\ \xrightarrow{\sqsubseteq} \text{radio:Patient} \sqcap \exists \text{reco.RadiothérapieParois} \end{aligned} \quad (8.4)$$

L'exemple ci-dessus se poursuit en associant à cible une radiothérapie des parois de la zone d'exérèse : la passerelle (8.4) permet d'inférer que radio:cible a pour recommandation une instance de $\text{RadiothérapieParois}$. Le raisonnement suivant à la lettre le référentiel aurait conduit à une ablation partielle du sein, et donc, d'après la passerelle (8.3), à une radiothérapie du sein.

Apports des points de vue au RÀPC. Un des intérêts de l'utilisation d'une représentation multi-points de vue pour le RÀPC est qu'elle permet de faire coexister plusieurs appréhensions du problème cible, à travers un RÀPC local à chaque point de vue. L'exemple ci-dessus concernant la taille de la tumeur « vue » différemment selon chimio et chir illustre cela : des chemins de similarité et de modification différents sont construits dans les différents points de vue, par exemple chir:cible peut être résolu en faisant intervenir un problème intermédiaire chir:pb_1 alors que chimio:cible peut faire appel à une application directe du référentiel. Cela ne revient pas pour autant à avoir autant de systèmes de RÀPC que de points de vue : les passerelles permettent de gérer la solution globale. Par exemple, les passerelles (8.3) et (8.4) permettent de résoudre radio:cible à partir de la solution de chir:cible . D'autres passerelles peuvent être utilisées pour compléter les informations sur un problème cible vu d'un point de vue à l'aide d'informations sur ce problème dans un autre point de vue, ce qui relève du processus d'élaboration [Mille, 1998; Fuchs *et al.*, 2006].

Par ailleurs, la notion de point de vue permet une représentation de la question associée à un problème : étant donné la description d'une patiente par l'ensemble d'instances $\{\text{pdv:p}\}_{\text{pdv}}$, le problème

« Quelle chirurgie et quelle radiothérapie proposer pour p ? » sera représenté par l'ensemble d'instances $\{\text{chir:p, radio:p}\}$.

Dans ce qui précède, nous nous sommes toujours limité au RÀPC s'appuyant sur la réutilisation d'un seul cas source au cours d'une session. Or, si l'on reprend l'exemple de la patiente au petit sein vue de *chimio* et de *chir*, rien n'oblige à ce que ce soit le même cas source qui soit utilisé dans les deux points de vue. De cette façon, l'éclatement du problème *cible* en points de vue permet de faire un raisonnement à partir de plusieurs cas, la combinaison de ces cas se faisant sur les solutions $\text{Sol}(\text{pdv:cible})$ inférées localement et complétées grâce aux passerelles (cette présentation est simplifiée ; l'article [d'Aquin *et al.*, 2005b] donne davantage de détails). Notons cependant que, comme l'ensemble des points de vue d'une application est statique, cela ne permet pas de modéliser n'importe quel type de raisonnement à partir de plusieurs cas. Par exemple, le planificateur à partir de cas PRODIGY/ANALOGY permet de construire un nouveau plan à partir de morceaux de plusieurs plans, morceaux extraits dynamiquement de plans sources, et non pas sur la base d'un ensemble prédéfini de points de vue.

Perspectives. Une première perspective de l'utilisation de points de vue pour le RÀPC est l'introduction d'autres types de liens dans les passerelles que \sqsubseteq . On peut penser à la subsomption floue ou encore à des couples de passerelles $(\text{pb}_1 \xrightarrow{r} \text{pb}_2, \text{Sol}(\text{pb}_2) \xrightarrow{A_r} \text{Sol}(\text{pb}_1))$ pour la représentation de « reformulations inter-points de vue ». Cette perspective ne sera probablement étudiée que si des besoins pratiques de représentation la rendent nécessaire.

Dans les formalismes de représentation multi-points de vue étudiés (y compris C-OWL dont ce n'est pas la fonction à l'origine), les points de vue sont tous primitifs. Une deuxième perspective de recherches a pour objectif la définition d'un langage qui permette de définir des points de vue à l'aide de points de vue primitifs (comme dans les logiques de descriptions, des concepts sont définis sur la base de concepts primitifs). Une retombée de cette perspective en RÀPC pourrait être de s'appuyer sur l'idée selon laquelle deux problèmes *srce* et *cible* sont similaires s'il existe un point de vue *pdv* selon lesquels ils sont équivalents : $\text{pdv:srce} \equiv \text{pdv:cible}$. La solution $\text{Sol}(\text{pdv:srce})$ sera alors une solution de pdv:cible , donc une contribution à la solution de *cible*. L'avantage de pouvoir définir des points de vue est de mettre en évidence le point de vue du langage le plus « large » selon lequel les deux problèmes sont équivalents, afin de définir la contribution la plus importante à la solution du problème *cible*.

Une recherche proche. À notre connaissance, peu de travaux ont traité de la représentation multi-points de vue pour le RÀPC. Dans [Arcos et López de Mántaras, 1997], le problème *cible* est projeté en plusieurs *perspectives* selon des *patrons syntaxiques* : un tel patron correspond à un point de vue *pdv* et une perspective de *cible* à pdv:cible . La remémoration consiste à construire des perspectives de *cible* (sorte de filtrage de *cible* selon les patrons syntaxiques), la recherche des cas sources pour chacune des perspectives de *cible* et leur ordonnancement. Cette approche est implantée à l'aide du langage de représentation par objets NOOS et est appliquée à SAXEX, système de RÀPC pour la génération d'interprétations expressives de mélodies (les cas sources sont des mélodies interprétées par des humains). Les deux patrons syntaxiques décrits dans [Arcos et López de Mántaras, 1997], s'appuient sur deux théories de la perception musicale. Cela peut être rapproché de KASIMIR : les deux domaines d'application sont complexes et leur appréhension sous différents angles aide à la gestion de cette complexité. Une différence de cette approche et de la nôtre est que les perspectives d'un problème sont construites (un problème *cible* global préexiste et est projeté en perspectives) alors que dans notre approche, le problème global correspond à l'ensemble des problèmes définis dans les différents points de vue.

8.3 Interrogation des référentiels

L'interface d'interrogation des référentiels de KASIMIR 3 a été conçue et développée conjointement par des membres d'Orpailleur et d'Oncolor. Celle de KASIMIR 4 — EDHIBOU — a été conçue et développée par Mathieu d'Aquin, lors de sa thèse. Le « navigateur de référentiel » NAVHIBOU a été conçu par Mathieu et réalisé par Sandrine Lafrogne, lors de son stage d'ingénieur CNAM.

KASIMIR 3 bénéficie d'une interface pour l'interrogation des référentiels qui est générique et personnalisable [Lieber *et al.*, 2002; d'Aquin *et al.*, 2005a]. Elle est générique car, quel que soit le référentiel représenté dans le formalisme de KASIMIR 3, elle permet son interrogation sans autre développement informatique. Elle est aussi personnalisable : on peut rendre l'interface par défaut plus conviviale (p. ex., pour demander la position de la tumeur dans le sein, au lieu d'avoir une liste déroulante, on aura une interface permettant de cliquer sur l'image de deux seins). Cette interface se présente sous la forme d'un ensemble d'attributs du patient considéré (p. ex., sexe, âge, taille de la tumeur, etc.) auxquels il faut associer des valeurs. À chaque saisie (ou changement) de valeur, un nouveau problème cible est créé et les solutions associées par la classification dure (i.e., les $Sol(srce)$ tels que $srce \sqsubseteq cible$) sont affichées dans l'interface. Une version pour les référentiels avec des seuils flous a également été développée, qui permet l'affichage des décisions $Sol(srce_i)$, rangées par degrés de subsomption non nuls $F_{\sqsubseteq}(srce_i, cible)$ décroissant.

EDHIBOU a été développé pour jouer le rôle de l'interface de KASIMIR 3 pour KASIMIR 4 : l'instance cible est éditée comme instance d'un concept du référentiel puis classifiée dans le référentiel représenté en OWL DL. Le résultat de la classification permet de lui associer de nouvelles caractéristiques, en particulier, des recommandations. En fait, EDHIBOU a été conçu de façon plus générique comme un éditeur d'instances en OWL. Il est lui aussi personnalisable, ce qui permet, par exemple, d'afficher les caractéristiques des problèmes dans un panneau et celles relevant des solutions dans un autre panneau.

L'interface de KASIMIR 3 et EDHIBOU ne permettent d'appréhender le référentiel qu'à travers la résolution de problèmes posés par l'utilisateur. NAVHIBOU est une autre interface, développée pour KASIMIR 4, qui permet d'appréhender un référentiel et, plus généralement, une base de connaissances BC, par une navigation : partant d'un concept C, NAVHIBOU génère ses descendants directs dans BC (i.e., les concepts D les plus généraux parmi les concepts plus spécifiques que C). Une page HTML est générée, avec le concept C, ses descendants et les caractéristiques associées à ces descendants. En cliquant sur un tel descendant D, on peut générer une nouvelle page, avec D et ses descendants.

8.4 Édition et maintenance des connaissances

Sébastien Brachais est un ingénieur informaticien qui a, d'octobre 2002 à septembre 2004, travaillé sous ma direction, dans le cadre du projet KASIMIR. L'objectif de son travail a été la mise en place d'un éditeur de connaissances pour KASIMIR, s'appuyant sur le système Protégé. Il a aussi mis en place, dans la même infrastructure, des outils pour la maintenance de connaissances (comparaison de deux versions d'un même référentiel, outils de visualisation de hiérarchies, outils de test de cohérence). Ces outils d'édition et de maintenance ont été développés suite à une demande de la part des ingénieurs du réseau de santé Oncolor en charge du développement de nouveaux référentiels (en particulier, Benoît Bresson, Olivier Croissant, Julien Lévêque et Fabien Palomarès). Par ailleurs, nous avons tiré profit du travail de Christophe Bouthier (équipe ECOO du Loria), pour HYPERTREE.

Cette section est un résumé de l'article [d'Aquin *et al.*, 2005a].

Édition de référentiels. Les référentiels de KASIMIR 3 sont stockés sous une forme XML selon une DTD qui lui est propre. L'édition des référentiels s'est faite pendant quelques années par édition de ces fichiers textes, ce qui est fastidieux et qui a motivé la mise en place d'un éditeur de référentiel. Le système Protégé [Noy *et al.*, 2000] a été choisi à cette fin. Il a fallu le personnaliser pour l'édition des référentiels et le connecter au moteur d'inférence de KASIMIR 3. Cette connexion a permis l'utilisation de tests pour éviter certains types d'erreurs, la visualisation de hiérarchies de concepts selon plusieurs modes et la comparaison entre deux versions d'une base de connaissances.

Tests lors de l'édition. Deux tests ont été implantés qui permettent d'éviter certaines erreurs d'édition. Un premier test consiste à comparer la hiérarchie des concepts *déclarée* sous Protégé et celle *calculée* par KASIMIR 3, qui s'appuie sur le test de subsumption. En théorie, ces deux hiérarchies ne sont pas censées coïncider mais, en pratique, quand elles ne coïncident pas, c'est souvent signe d'erreur. Dans ce cas le test donne un signal d'avertissement qui met en évidence une éventuelle erreur d'édition. Le deuxième test permet d'éviter l'édition de deux concepts C et D équivalents, même quand ils correspondent à deux définitions syntaxiquement différentes. Par exemple, si ces deux concepts sont introduits par

$$C \equiv \exists \text{âge} . \geq_{40} \quad D \equiv \exists \text{âge} . >_{39}$$

alors le moteur d'inférences de KASIMIR 3 indique que $C \equiv D$ (l'âge étant un attribut concret pour le domaine concret Z des entiers ordonnés), et qu'un des deux concepts est inutile. Les utilisateurs de l'éditeur de Protégé personnalisé pour KASIMIR 3 nous ont indiqué que ces tests leur avaient permis d'éviter certaines erreurs d'édition et leur avaient ainsi fait gagner du temps.

Visualisation de hiérarchies. Le raisonnement de KASIMIR 3 s'appuyant sur une classification dans une hiérarchie calculée de concepts, deux outils pour visualiser cette hiérarchie ont été mis en place et connectés à Protégé sous la forme de greffons. Le premier (cf. figure 8.3(a)), baptisé PALÉTUVIER, permet de visualiser les hiérarchies de la façon « habituelle » : les nœuds de rang i sont alignés sur une droite Δ_i et ces droites Δ_i sont parallèles entre elles deux à deux (en l'occurrence, elles sont verticales). Le deuxième (cf. figure 8.3(b)) utilise l'API HYPERTREE [Bouthier, 2005] et permet de visualiser des *arbres* dans la géométrie hyperbolique de Poincaré : l'ensemble des nœuds est projeté sur un disque, la racine est projetée au centre et un nœud tend vers le bord du disque quand son rang tend vers l'infini. Les hiérarchies ne sont pas nécessairement des arbres : un nœud peut être le descendant direct de plusieurs nœuds. Cette situation est prise en compte dans PALÉTUVIER, en revanche, HYPERTREE dupliquera un tel nœud (il correspondra à plusieurs nœuds de l'arbre représenté). HYPERTREE en revanche aura l'avantage de permettre une navigation plus facile dans une hiérarchie de grande taille.

Comparaison de deux versions du référentiel. Soit BC_{avant} et $BC_{\text{après}}$, deux versions d'une base de connaissances. Par exemple, BC_{avant} est l'état de la base de connaissances au début d'une session et $BC_{\text{après}}$, l'état de cette base à un instant ultérieur de cette session. L'outil KILT a été développé pour répondre à la question « Quels sont les problèmes sources qui diffèrent entre les deux bases de connaissances ? » L'intérêt d'utiliser KILT en cours d'édition est de vérifier que les modifications faites sur BC_{avant} sont bien celles qu'on pensait faire. Le résultat de KILT est la visualisation sous PALÉTUVIER d'une hiérarchie de problèmes obtenue par union des hiérarchies de BC_{avant} et $BC_{\text{après}}$, avec des couleurs permettant de distinguer

- Les problèmes $srce$ qui se trouvent dans les deux bases, avec la même solution $Sol(srce)$,
- Les problèmes $srce$ qui se trouvent dans les deux bases, avec deux solutions $Sol_1(srce)$ et $Sol_2(srce)$ différentes,
- Les problèmes obsolètes (qui sont dans BC_{avant} et pas dans $BC_{\text{après}}$) et

confrontée à des exceptions — les cas hors référentiel qui nécessitent des adaptations — cette théorie peut évoluer. D'un point de vue informatique, le principe envisagé consiste à formaliser les adaptations effectuées en RCP, à les collecter et à les regrouper pour faire émerger des types d'adaptations fréquemment effectuées, sur la base desquels des évolutions du référentiel peuvent être proposées. Par exemple, l'adaptation du référentiel du traitement du cancer du sein chez la femme à des patients de sexe masculin pourrait conduire à l'établissement d'un référentiel du traitement du cancer du sein chez l'homme.

Chapitre 9

Conclusion et perspectives

9.1 Conclusion

Ce mémoire présente un survol de nos travaux, à altitudes variables : l'accent a été mis sur ce qui nous semble le plus original de ces travaux, même quand il s'agissait de recherches en cours. En particulier, confronté à la question « Comment aborder la conception d'un système de RÀPC ? », la réponse que je propose est l'ensemble des questions suivantes (associées parfois aux sections donnant des *éléments* de réponse) :

- Q1** Pourquoi implanter un système de RÀPC (cf. section 5.3.1) ?
- Q2** Quels sont les problèmes que le système de RÀPC est censé résoudre et donc, que sont un problème, une solution, les liens de dépendance entre problèmes et solutions et un cas pour cette application (cf. section 5.3.2) ?
- Q3** Comment obtenir une base de cas (acquisition, représentation, édition des connaissances — dont les cas — cf. sections 8.1, 8.2 et 8.4) ?
- Q4** Comment concevoir un module d'adaptation (cf. chapitre 7) ?
 - Q4a** Comment modéliser l'adaptation (cf. section 7.1) ?
 - Q4b** Comment acquérir des connaissances d'adaptation (cf. section 7.2) ?
 - Q4c** Sur quelles connaissances d'adaptation déjà acquises peut-on compter (cf. section 7.3) ?
- Q5** Comment concevoir un module de remémoration (cf. chapitre 6)
 - qui soit guidée par l'adaptation (cf. section 5.3.2),
 - qui permette au moins la recherche des problèmes sources plus généraux que le problème cible (classification dure, cf. section 6.1),
 - qui permette éventuellement la recherche de problèmes sources *approximativement* plus généraux que le problème cible (classification floue, cf. section 6.2),
 - qui permette de prendre en compte les connaissances d'adaptation disponibles (classification élastique, cf. section 6.3) ?

9.2 Perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire peuvent être poursuivis de plusieurs manières. Des perspectives ont déjà été présentées dans les chapitres précédents. Ci-dessous, nous présentons quatre grandes directions de recherche que nous aimerions poursuivre. Toutes quatre peuvent s'appliquer au cadre de KASIMIR.

9.2.1 Extraction de connaissances et Web sémantique

À l'heure actuelle, deux champs de recherches sont particulièrement actifs dans le cadre du projet KASIMIR : l'extraction de connaissances (principalement les ACA semi-automatique et mixte décrites à la section 7.2) et le Web sémantique. La première direction de recherche a pour objectif le développement conjoint de ces deux aspects du projet KASIMIR et leur intégration au sein d'une même architecture distribuée. La thèse de Fadi Badra, qui a débuté en octobre 2005, s'inscrit dans cette direction de recherche : son sujet est « Extraction de connaissances à destination du Web sémantique ». Il s'agit d'alimenter en connaissances le portail sémantique développé par Mathieu d'Aquin. Dans ce cadre, on peut distinguer des données de différentes natures constituant les sources de l'extraction, et différents types de connaissances à extraire.

CABAMAKA utilise comme source de données les variations entre cas généraux du référentiel (c'est le formatage qui effectue la transformation des connaissances en données) et doit fournir des connaissances générales sous la forme de règles d'adaptation.

Une deuxième source pour l'extraction pourrait être constituée par les dossiers des RCP : ces dossiers sont depuis peu sous une forme électronique standard mais avec des champs textuels libres auxquels nous essayons d'avoir accès, ce qui suppose un processus d'anonymisation. De cette source pourrait être extraites des connaissances d'adaptation générales mais aussi des cas particuliers d'adaptation. De tels cas d'adaptation pourraient être utiles soit à la génération de règles d'adaptation par généralisation, soit être utilisées tels quels pour l'adaptation à partir de cas (cf. section 7.1.3). En fait, un compte-rendu de RCP constitue un cas d'adaptation pour un être humain capable de le comprendre. L'extraction de connaissances partant d'un tel compte-rendu pour aboutir à un cas d'adaptation est la traduction, qu'on aimerait instrumenter, d'une connaissance informelle (i.e., d'une donnée que l'humain est capable d'interpréter et sur laquelle il peut raisonner) en connaissance formelle (sur laquelle une machine peut raisonner).

À terme est envisagée la mise en place d'une architecture distribuée mettant en connexion différents services d'extraction de connaissances et de raisonnements (déductifs, flous, à partir de cas, etc.), des sources de données hétérogènes, des bases de connaissances de différents types et des utilisateurs humains (experts ou profanes). Pour ce faire, tirer parti du cadre normalisateur et intégrateur du Web sémantique nous semble une bonne idée. À titre d'illustration, une telle architecture pourrait permettre de répondre à des requêtes d'utilisateurs, même si les connaissances disponibles pour y répondre ne sont pas (encore) disponibles : une telle requête pourrait être utilisée pour piloter un processus d'extraction de connaissances et générer ainsi les connaissances nécessaires pour y répondre.

9.2.2 Représentation des variations à l'intérieur d'une base de connaissances et entre bases de connaissances

Représenter les variations à l'intérieur d'une base de connaissances. Le système CABAMAKA pour l'acquisition semi-automatique de connaissances d'adaptation (voir section 7.2.2) utilise une représentation très simple des variations Δu entre deux unités de représentation (concepts, instances, etc.) u_1 et u_2 : Δu code simplement un ensemble d'ajouts et de suppressions de propriétés transformant u_1 en u_2 . Un objectif de recherche est de permettre une représentation plus riche de ces variations Δu pour l'ACA semi-automatique. Par exemple, considérons les deux concepts $u_1 = \text{Patient} \sqcap \exists \text{âge} =_{60}$ et $u_2 = \text{Patient} \sqcap \exists \text{âge} =_{70}$. Δu calculé par CABAMAKA est alors simplement l'ensemble des proprié-

tés

$$\begin{aligned}(\text{Patient})^- &= \text{« garder la propriété Patient »} \\ (\hat{\text{âge}} = 60)^- &= \text{« suppression de la propriété âge = 60 »} \\ (\hat{\text{âge}} = 70)^+ &= \text{« ajout de la propriété âge = 70 »}\end{aligned}$$

Une représentation plus riche permettrait d'ajouter à Δu par exemple :

$$\begin{aligned}(\hat{\text{âge}})^{\text{ajouter}=10} &= \text{« augmentation de 10 ans de l'âge »} \\ (\hat{\text{âge}})^{\text{augmenter}} &= \text{« augmentation de l'âge »}\end{aligned}$$

Une telle représentation doit permettre de comparer les éléments de variations entre eux, par exemple $(\hat{\text{âge}})^{\text{augmenter}}$ sera plus général que $(\hat{\text{âge}})^{\text{ajouter}=10}$, lui même plus général que la conjonction de $(\hat{\text{âge}} = 60)^-$ et de $(\hat{\text{âge}} = 70)^+$. Cela permettra en particulier l'extraction de règles d'adaptation abstraites, telles que « Quand l'âge augmente, la dose de chimiothérapie au FEC recommandée diminue. », règle plus générale que la règle opérationnelle « Quand l'âge passe de 60 à 70, la recommandation chimiothérapique passe de FEC100 à FEC50⁽¹⁵⁾. » De telles règles abstraites permettraient d'une part d'organiser les règles issues de CABAMAKA, ce qui faciliterait leur interprétation, et d'autre part de combler une partie du fossé entre règles opérationnelles et patrons d'adaptation.

Un problème qui se posera lors de ce travail futur sera le choix des constructeurs pour exprimer les variations. En particulier, dans l'exemple ci-dessus, nous n'avons pas proposé l'élément de variation « multiplier l'âge par $\frac{7}{6}$ ». Sur quoi se fonde ou s'invalide un tel choix ? Un élément de réponse pourrait être de s'appuyer sur les reformulations (x, \mathcal{A}_x) (ou sur des patrons d'adaptation) disponibles : la façon de représenter x et \mathcal{A}_x peut orienter ce choix.

Une première étude de cette problématique est présentée dans [Badra et Lieber, 2007b].

Représenter les variations entre bases de connaissances. On peut faire un rapprochement entre CABAMAKA et l'outil KILT développé pour comparer deux versions d'un référentiel (cf. section 8.4). En effet, CABAMAKA, dans sa version actuelle, compare deux unités de représentation en mettant simplement en évidence les ajouts et les retraits de propriétés, alors que KILT compare deux versions d'une base de connaissances en mettant en évidence les ajouts et retraits de concepts. De la même façon que CABAMAKA est encore limité pour exprimer la variation entre deux concepts, KILT est encore limité pour comparer deux versions d'une base de connaissances. Par exemple, si l'on considère un référentiel représenté par une base de connaissances BC_{avant} et qu'on effectue une modification en changeant simplement la valeur du seuil de 70 ans en 75 ans dans la base de la figure 8.2 (page 78) pour obtenir la base $BC_{\text{après}}$, il est souhaitable que la variation ΔBC calculée entre les deux versions de la base traduise simplement le changement 70 ans \rightarrow 75 ans. Or KILT va considérer comme modifiés non seulement les concepts introduits par des axiomes contenant explicitement le seuil de 70 ans mais aussi tous les concepts déclarés (directement ou non) comme sous-concepts de ces concepts et il peut y en avoir beaucoup (pour la base de la figure 8.2, il s'agit des concepts C_1 à C_8). Une perspective consiste à définir un langage de représentation des variations entre deux bases de connaissances et à concevoir un mécanisme qui, étant donné BC_{avant} et $BC_{\text{après}}$, donne ΔBC , la façon d'exprimer « le plus simplement possible » dans ce langage, la variation entre les deux bases.

La question à laquelle KILT donne des éléments de réponse est « Qu'est ce qui diffère entre deux bases de connaissances *a priori* semblables ? » Une question duale est « Qu'est ce qui rapproche deux bases de connaissances *a priori* dissemblables ? » Cette dernière question se pose dans le cadre de l'alignement d'ontologies [Euzenat et Shvaiko, 2007] : étant donné deux ontologies (i.e., deux bases de

¹⁵Cette règle n'est là qu'à titre d'illustration et n'a pas de validité médicale.

connaissances en OWL), quels sont les liens qui peuvent être tissés entre unités de représentation des deux ontologies ? Le langage C-OWL, évoqué à la section 8.2.4, a été conçu en particulier pour exprimer les alignements d'ontologies, sous la forme d'un ensemble de passerelles. Là aussi (et cela avait été évoqué dans les perspectives de 8.2.4), le langage des passerelles pourrait être enrichi pour exprimer, entre unités de représentation liées par des passerelles, à la fois des ressemblances et des dissemblances.

9.2.3 Raisonnement à partir de cas et aide à la décision

Le système KASIMIR a pour objectif de proposer des décisions. Jusqu'alors, notre réflexion au cours de la conception de cette application s'est essentiellement située au niveau du RÀPC en général. Une direction de recherches est de particulariser cette étude au niveau du domaine de l'aide à la décision à partir de cas (ADÀPC [Dubois *et al.*, 1998; Gilboa et Schmeidler, 1998]). Nous avons effectué quelques pas dans cette direction par l'étude des patrons d'adaptation et l'étude du critère pessimiste de Wald pour la remémoration (cf. section 7.3.3). Ce dernier, en particulier, est assez inadapté dans bien des situations pratiques : le choix qui évite la pire conséquence possible, quand celle-ci est extrêmement improbable, est discutable. D'autres critères, pessimistes ou optimistes et s'appuyant sur la théorie des possibilités, sont proposés dans [Dubois *et al.*, 2001] et leur réutilisation pour l'ADÀPC de KASIMIR doit être envisagée. Par ailleurs, la prise de décision en cancérologie est multi-critères : il ne s'agit pas seulement de maximiser l'espérance de vie des patients mais aussi leur qualité de vie et le coût financier des traitements et examens, critères qui, considérés isolément, aboutissent souvent à des décisions contradictoires. Cet aspect de l'ADÀPC doit aussi être pris en compte.

9.2.4 Raisonnement à partir de cas et théorie de la révision

Nous avons commencé récemment l'étude de l'*adaptation conservatrice* (cf. section 7.1.5). Cette approche s'appuie sur la théorie AGM de la révision et consiste à faire une modification minimale du cas source pour être cohérent avec le problème cible et les connaissances du domaine. Cette étude et, plus largement, l'étude de l'application de la théorie de la révision au RÀPC, nous semblent prometteuses pour plusieurs raisons.

D'abord, l'adaptation conservatrice recouvre certaines adaptations effectuées par des experts en cancérologie, en particulier, une partie au moins des adaptations en cas de contre-indications.

Ensuite, créer des ponts entre le RÀPC et la révision doit permettre à la communauté RÀPC de bénéficier des nombreux travaux effectués par la communauté de la révision (et, peut-être, réciproquement). Par exemple, il est envisageable d'étudier comment la fusion des connaissances — qui généralise la révision — peut s'appliquer à la combinaison de cas sources (une étude préliminaire est présentée dans [Lieber, 2007a]).

Enfin, les travaux théoriques sur la révision pourraient être utiles pour définir un cadre unificateur en RÀPC. Cela passera probablement par la définition d'opérateurs de révision intégrant des connaissances d'adaptation : la définition de la notion de modification minimale peut s'appuyer sur ces connaissances.

La problématique de la mise en œuvre pratique de l'adaptation conservatrice, dans le cadre formel des logiques de descriptions, est une des premières étapes envisagées dans cette étude. En effet, cela permettra d'intégrer cette approche de l'adaptation dans le portail sémantique KASIMIR 4, et de la combiner avec l'adaptation par chemins de similarité qui y est implantée. C'est d'ailleurs dans ce système que les autres travaux encore théoriques sur le RÀPC dans le cadre du projet KASIMIR doivent conduire à des implantations. Par exemple, cela devra permettre d'articuler l'adaptation conservatrice avec une utilisation des patrons d'adaptation.

Bibliographie

- [Aamodt et Plaza, 1994] A. Aamodt et E. Plaza. Case-based Reasoning : Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *AI Communications*, 7(1) :39–59, 1994.
- [Alchourrón *et al.*, 1985] C. E. Alchourrón, P. Gärdenfors et D. Makinson. On the Logic of Theory Change : partial meet functions for contraction and revision. *Journal of Symbolic Logic*, 50 :510–530, 1985.
- [Arcos et López de Mántaras, 1997] J.L. Arcos et R. López de Mántaras. Perspectives : A declarative bias mechanism for case retrieval. Dans *Case-Based Reasoning Research and Development – Second International Conference, ICCBR’97, Providence, RI, USA*, rédacteurs D. B. Leake et E. Plaza, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1266, pages 279–290. Springer, Berlin, 1997.
- [Arcos et Plaza, 1996] J.-L. Arcos et E. Plaza. Inference and reflection in the object-centered representation language Noos. *Journal of Future Generation Computer Systems*, 12 :173–188, 1996.
- [Baader *et al.*, 1992] F. Baader, B. Hollunder, B. Nebel et H.-J. Profitlich. An Empirical Analysis of Optimization Techniques for Terminological Representation Systems. Dans *Proceedings of the third International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR’92), Cambridge, Massachusetts*, pages 270–281, 1992.
- [Baader *et al.*, 2003] rédacteurs F. Baader, D. Calvanese, D. McGuinness, D. Nardi et P. Patel-Schneider. *The Description Logic Handbook*. Cambridge University Press, cambridge, UK, 2003.
- [Badra et Lieber, 2007a] F. Badra et J. Lieber. Extraction de connaissances d’adaptation par l’analyse de la base de cas. Dans *Extraction et gestion des connaissances (EGC’2007), Actes des septièmes journées Extraction et Gestion des Connaissances, Namur, Belgique, 23-26 janvier 2007, 2 Volumes*, Revue des Nouvelles Technologies de l’Information, pages 751–760, 2007.
- [Badra et Lieber, 2007b] F. Badra et J. Lieber. Une approche pour représenter les variations entre cas — Vers une application à l’extraction de connaissances d’adaptation. Dans *Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC’07*, rédacteurs A. Cordier et B. Fuchs, pages 47–56, Grenoble, 2007. Plateforme AFIA.
- [Bechhofer *et al.*, 2007] S. Bechhofer, F. van Harmelen, J. Hendler, I. Horrocks, D. L. McGuinness, P. F. Patel-Schneider et L. A. Stein. OWL Web Ontology Language Reference, www.w3.org/TR/owl-ref. dernière consultation : juillet, 2007.
- [Berasaluce *et al.*, 2002] S. Berasaluce, C. Laurenço et A. Napoli. Extraction de connaissances à partir de bases de données de réactions en chimie organique. Dans *Treizième journées francophones d’ingénierie des connaissances (IC’2002)*, rédacteur B. Bachimont, pages 151–162, 2002.
- [Bergmann et Wilke, 1998] R. Bergmann et W. Wilke. Towards a New Formal Model of Transformational Adaptation in Case-Based Reasoning. Dans *Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-98), Brighton, United Kingdom*, rédacteur H. Prade, pages 53–57, 1998.

- [Bergmann, 1992] R. Bergmann. Learning Plan Abstractions. Dans *GWAI-92, 16th German Workshop on Artificial Intelligence*, rédacteur H. J. Ohlbach, Lecture Notes in Artificial Intelligence 671, pages 187–198. Springer Verlag, Berlin, 1992.
- [Boisson, 2000] F. Boisson. Création d'un système d'aide à la décision pour la conduite à tenir diagnostique et le traitement du cancer de la prostate. Rapport de stage, DESS informatique double compétence, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2000.
- [Bouquet *et al.*, 2004] P. Bouquet, F. Giunchiglia, F. van Harmelen, L. Serafini et H. Stuckenschmidt. Contextualizing Ontologies. *Journal of Web Semantics*, 1(4) :1–19, 2004.
- [Boussu, 1998] G. Boussu. Apprentissage à partir d'échecs. Mémoire de DEA d'informatique, Université Henri Poincaré Nancy 1, 1998.
- [Bouthier, 2005] C. Bouthier. Hypertree Java Library. <http://hypertree.sourceforge.net/>, 2005.
- [Brachais *et al.*, 2003] S. Brachais, M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Vers un Web sémantique en cancérologie. Dans *Première journée Web sémantique médical - WSM'2003, Rennes, France*. Laboratoire d'informatique médicale de Rennes, Mars 2003. <http://videostream.univ-rennes1.fr/~wsm/>.
- [Branting et Aha, 1995] L. K. Branting et D. W. Aha. Stratified Case-Based Reasoning : Reusing Hierarchical Problem Solving Episodes. Dans *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95), Montréal*, volume 1, pages 384–390, August 1995.
- [Bresson et Lieber, 1999] B. Bresson et J. Lieber. Classification pour l'aide au traitement du cancer du sein. Dans *Septième journées de la Société Francophone de Classification, SFC'99*, rédacteurs F. Le Ber, J.-F. Mari, A. Napoli et A. Simon, pages 53–59, Nancy, septembre 1999. Unité de recherche INRIA Lorraine.
- [Bresson et Lieber, 2000] B. Bresson et J. Lieber. Raisonnement à partir de cas pour l'aide au traitement du cancer du sein. Dans *Actes des journées ingénierie des connaissances (IC-2000)*, rédacteur Nathalie Aussenac-Gilles, pages 189–196, Toulouse, 2000.
- [Bresson, 2000] B. Bresson. Un système de classification hiérarchique pour l'aide au traitement du cancer du sein. Mémoire de thèse CNAM, Conservatoire National des Arts et Métiers, février 2000.
- [Carbonell, 1983] J. G. Carbonell. Learning by analogy : Formulating and generalizing plans from past experience. Dans *Machine Learning, An Artificial Intelligence Approach*, rédacteur R. S. Michalski and J. G. Carbonell and T. M. Mitchell, chapitre 5, pages 137–161. Morgan Kaufmann, Inc., 1983.
- [Carbonell, 1986] J. G. Carbonell. Derivational analogy : A Theory of Reconstructive Problem Solving and Expertise Acquisition. Dans *Machine Learning*, volume 2, chapitre 14, pages 371–392. Morgan Kaufmann, Inc., 1986.
- [Cherfi, 2004] Hacène Cherfi. *Etude et réalisation d'un système d'extraction de connaissances à partir de textes*. Thèse d'université, UHP - Nancy 1, Nov 2004.
- [Chouraqui, 1986] E. Chouraqui. Le raisonnement analogique : sa problématique, ses applications. Dans *Actes des Journées Nationales sur l'Intelligence Artificielle, Aix-les-Bains*, pages 107–117. CEPADUES-Editions, Toulouse, 1986.
- [Chouvet *et al.*, 1996] M.-P. Chouvet, F. Le Ber, J. Lieber, L. Mangelinck, A. Napoli et A. Simon. Analyse des besoins en représentation et raisonnement dans une représentation à objets — L'exemple de Y3. Dans *Actes du colloque "Langages et Modèles à Objets" (LMO'96), Leysin, Suisse*, rédacteur Y. Dennebouy, pages 150–169, 1996.
- [Cojan, 2006] J. Cojan. Étude et mise en œuvre du raisonnement intégrant OWL et les types de données XML flous. Rapport de stage d'option scientifique, M1, École Polytechnique, 2006.

- [Cordier *et al.*, 2007a] A. Cordier, B. Fuchs, J. Lieber et A. Mille. Acquisition de connaissances du domaine d'un système de RÀPC : une approche fondée sur l'analyse interactive des échecs d'adaptation — le système FRAKAS. Dans *Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, rédacteurs A. Cordier et B. Fuchs, pages 57–70, Grenoble, 2007. Plateforme AFIA.
- [Cordier *et al.*, 2007b] A. Cordier, B. Fuchs, J. Lieber et A. Mille. Acquisition interactive des connaissances d'adaptation intégrée aux sessions de raisonnement à partir de cas — Principes, architecture IAKA et prototype KAYAK. Dans *Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, rédacteurs A. Cordier et B. Fuchs, pages 71–84, Grenoble, 2007. Plateforme AFIA.
- [Cordier *et al.*, 2007c] A. Cordier, B. Fuchs, J. Lieber et A. Mille. Failure Analysis for Domain Knowledge Acquisition in a Knowledge-Intensive CBR System. Dans *Proceedings of the 7th International Conference on Case-Based Reasoning*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Belfast, août, 2007. Springer.
- [Cordier *et al.*, 2007d] A. Cordier, B. Fuchs, J. Lieber et A. Mille. Interactive Knowledge Acquisition in Case Based Reasoning. Dans *Proceedings of the workshop on Knowledge Discovery and Similarity*, rédacteurs D. Wilson et D. Khemani. Workshop of the seventh International Conference on Case-Based Reasoning Workshop, 2007.
- [Cordier *et al.*, 2007e] A. Cordier, B. Fuchs, J. Lieber et A. Mille. On-Line Domain Knowledge Management for Case-Based Medical Recommendation. Dans *Proceedings of the 5th workshop on CBR in the Health Sciences*, rédacteurs I. Bichindaritz et S. Montani, pages 285–294. A workshop of the seventh International Conference on Case-Based Reasoning (ICCB-07), D. C. Wilson and D. Khemani (volume editors), 2007.
- [Corey et Cheng, 1989] E. J. Corey et X.-M. Cheng. *The Logic of Chemical Synthesis*. John Wiley & Sons, 1989.
- [Coulon *et al.*, 1990] D. Coulon, J.-F. Boivieux, L. Bourrelly, L. Bruneau, E. Chouraqui, J.-M. David, C. R. Lu, M. Py, J. Savelli, B. Séroussi et C. Vrain. Le raisonnement par analogie en intelligence artificielle. Dans *Actes des 3^{èmes} journées nationales du PRC-GDR Intelligence Artificielle*, rédacteur B. Bouchon-Meunier, pages 45–88, 1990.
- [Curien *et al.*, 1996] R. Curien, J. Lieber et A. Napoli. Une première analyse formelle du raisonnement à partir de cas. Dans *Actes du 5^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteur A. Mille, pages 6–18, Lyon, campus de la Doua, avril 1996.
- [Curien, 1995] R. Curien. *Outils pour la preuve par analogie*. Thèse de Doctorat d'Université, Université Henry Poincaré – Nancy 1, Janvier 1995.
- [d'Aquin *et al.*, 2002] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Représentation multi-points de vue des connaissances pour l'adaptation. Dans *actes du X^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteurs Marie-Christine Jaulent, Christel Le Bozec et Éric Zapletal, pages 23–31, 2002.
- [d'Aquin *et al.*, 2004a] M. d'Aquin, S. Brachais, J. Lieber et A. Napoli. Decision Support and Knowledge Management in Oncology using Hierarchical Classification. Dans *Proceedings of the Symposium on Computerized Guidelines and Protocols (CGP-2004)*, rédacteurs K. Kaiser, S. Miksch et S. W. Tu, volume 101 de *Studies in Health Technology and Informatics*, pages 16–30. IOS Press, 2004.
- [d'Aquin *et al.*, 2004b] M. d'Aquin, S. Brachais, J. Lieber et A. Napoli. Kasimir : gestion de connaissances décisionnelles en cancérologie. Dans *Modélisation et pilotage des systèmes de Connaissances et de Compétences dans les Entreprises Industrielles - C2EI'04, Nancy, France*, rédacteurs Emmanuel Caillaud, Muriel Lombard et Jean Renaud, Dec 2004.

- [d'Aquin *et al.*, 2004c] M. d'Aquin, S. Brachais, J. Lieber et A. Napoli. Kasimir : portail sémantique pour la gestion des connaissances en cancérologie. Dans *Deuxième séminaire francophone du Web Sémantique Médical — WSM 2004*, Rouen, France, Mars 2004. www.chu-rouen.fr/l0stics/wsm2004/.
- [d'Aquin *et al.*, 2004d] M. d'Aquin, S. Brachais, J. Lieber et A. Napoli. Vers une acquisition automatique de connaissances d'adaptation par examen de la base de cas — une approche fondée sur des techniques d'extraction de connaissances dans des bases de données. Dans *Actes du douzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'04*, rédacteurs R. Kanawati, S. Salotti et F. Zehraoui, pages 41–52, 2004.
- [d'Aquin *et al.*, 2004e] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Étude de quelques logiques de descriptions floues et de formalismes apparentés. Dans *Actes des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA-04)*, rédacteur Jacky Montmain, pages 255–262. CEPADUES-Éditions, Toulouse, 2004.
- [d'Aquin *et al.*, 2004f] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Représentation de points de vue pour le raisonnement à partir de cas. Dans *Langages et Modèles à objets - LMO'04*, volume 10 de *Revue des Sciences et Technologies de l'Information, RSTI - série L'Objet*, pages 245–258, 2004.
- [d'Aquin *et al.*, 2005a] M. d'Aquin, C. Bouthier, S. Brachais, J. Lieber et A. Napoli. Knowledge Edition and Maintenance Tools for a Semantic Portal in Oncology. *International Journal of Human Computer Studies*, 62(5) :619–638, 2005.
- [d'Aquin *et al.*, 2005b] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Decentralized Case-Based Reasoning for the Semantic Web. Dans *Proceedings of the 4th International Semantic Web Conference (ISWC 2005)*, rédacteurs Yolanda Gil et Enrico Motta, LNCS 3729, pages 142–155. Springer, November 2005.
- [d'Aquin *et al.*, 2005c] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Vers une utilisation du critère pessimiste de Wald pour l'aide à la décision à partir de cas. Dans *actes du treizième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'05, plate-forme AFIA*, 2005.
- [d'Aquin *et al.*, 2006a] M. d'Aquin, J. Cojan, J. Lieber et A. Napoli. Vers l'implantation d'un moteur d'inférences pour une logique de descriptions avec domaine concret flou. Dans *Actes des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA-06)*, pages 129–135, 2006.
- [d'Aquin *et al.*, 2006b] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Adaptation Knowledge Acquisition : a Case Study for Case-Based Decision Support in Oncology. *Computational Intelligence (an International Journal)*, 22(3/4) :161–176, 2006.
- [d'Aquin *et al.*, 2006c] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. Towards a Semantic Portal for Oncology using a Description Logic with Fuzzy Concrete Domains. Dans *Fuzzy Logic and the Semantic Web*, rédacteur Elie Sanchez, chapitre 19, pages 379–393. Elsevier, 2006.
- [d'Aquin *et al.*, 2007a] M. d'Aquin, F. Badra, S. Lafrogne, J. Lieber, A. Napoli et L. Szathmary. Case Base Mining for Adaptation Knowledge Acquisition. Dans *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)*, rédacteur M. M. Veloso, pages 750–755. Morgan Kaufmann, Inc., 2007.
- [d'Aquin *et al.*, 2007b] M. d'Aquin, J. Lieber et A. Napoli. La représentation de points de vue dans le système d'aide à la décision en cancérologie KASIMIR. *l'Objet*, 13(2-3) :143–175, 2007.
- [d'Aquin, 2002] M. d'Aquin. Besoins en représentation des connaissances et représentation par objets multi-points de vue pour l'adaptation en raisonnement à partir de cas. Mémoire de DEA, Université Henri Poincaré Nancy 1 — LORIA, 2002.

- [d'Aquin, 2003] M. d'Aquin. Un modèle de connaissances en RDF(S) pour raisonner à partir de cas sur le Web sémantique. Dans *Actes de l'atelier RàPC, plate-forme AFIA*, rédacteur J. Lieber, pages 7–15, 2003.
- [d'Aquin, 2005] M. d'Aquin. *Un portail sémantique pour la gestion des connaissances en oncologie*. Thèse d'université, Université Henri Poincaré Nancy 1, soutenue le 15 décembre, 2005.
- [Dubois *et al.*, 1991] D. Dubois, H. Prade et J.-P. Rossazza. Vagueness, Typicality and Uncertainty in Class Hierarchies. *International Journal of Intelligent Systems*, 6 :167–183, 1991.
- [Dubois *et al.*, 1998] D. Dubois, F. Esteva, P. Garcia, L. Godo, R. L. de Màntaras et H. Prade. Fuzzy set modelling in case-based reasoning. *International Journal of Intelligent Systems*, 13 :345–373, 1998.
- [Dubois *et al.*, 2001] D. Dubois, H. Prade et R. Sabbadin. Decision-theoretic foundations of qualitative possibility theory. *European Journal of Operational Research*, 128 :459–478, 2001.
- [Dubois et Prade, 2000] rédacteurs Didier Dubois et Henri Prade. *Fundamentals of Fuzzy Sets*, volume 7 de *The handbooks of fuzzy sets*. Kluwer, 2000.
- [Ducournau, 1991] R. Ducournau. Y3 : Yafool, the object-oriented language, 1991. SEMA Group.
- [Ducournau, 1996] R. Ducournau. Les incertitudes de la classification incertaine. Dans *Actes du colloque "Langages et Modèles à Objets" (LMO'96)*, Leysin, Suisse, rédacteur Y. Dennebouy, pages 183–200, 1996.
- [Dunham, 2003] M. H. Dunham. *Data Mining – Introductory and Advanced Topics*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [El Omari-Alaoui *et al.*, 2002] H. El Omari-Alaoui, I. Lahdiri, I. Nejjar, K. Hadadi, F. Ahyoud, H. Hachi, M. Alhilal, H. Errihani, N. Benjaafar, A. Souadja et B. K. Gueddari. Male breast cancer. A report of 71 cases. *Cancer radiothérapie*, 6 :349–351, 2002.
- [Euzenat et Shvaiko, 2007] J. Euzenat et P. Shvaiko. *Ontology matching*. Springer-Verlag, Heidelberg (DE), 2007.
- [Evidence-based medicine working-group, 1992] Evidence-based medicine working-group. Evidence-based medicine. A new approach to teaching the practice of medicine. *Journal of the American Medical Association*, 17 :268, 1992.
- [Fensel *et al.*, 2003] rédacteurs D. Fensel, J. Hendler, H. Lieberman et W. Wahlster. *Spinning the Semantic Web*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2003.
- [Forbus et Gentner, 1986] K. D. Forbus et D. Gentner. *Learning Physical Domains : Toward a Theoretical Framework*, volume 2, chapitre 12, pages 311–348. Machine Learning, 1986.
- [Fuchs *et al.*, 1999a] B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille et A. Napoli. Towards a Unified Theory of Adaptation in Case-Based Reasoning. Dans *Case-Based Reasoning Research and Development — Third International Conference on Case-Based Reasoning (ICCB-99)*, rédacteurs K.-D. Althoff, R. Bergmann et L. K. Branting, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1650, pages 104–117. Springer, Berlin, 1999.
- [Fuchs *et al.*, 1999b] B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille et A. Napoli. Vers une théorie unifiée de l'adaptation en raisonnement à partir de cas. Dans *Actes des journées ingénierie des connaissances*, pages 199–207, 1999.
- [Fuchs *et al.*, 2000] B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille et A. Napoli. An Algorithm for Adaptation in Case-Based Reasoning. Dans *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000)*, Berlin, Germany, pages 45–49, 2000.
- [Fuchs *et al.*, 2001] B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille et A. Napoli. Un algorithme pour la phase d'adaptation du raisonnement à partir de cas. Dans *Actes des journées nationales sur les modèles de raisonnement (JNMR'01)*, Arras, rédacteur A. Herzig, pages 79–92, 2001.

- [Fuchs *et al.*, 2006] B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille et A. Napoli. Une première formalisation de la phase d'élaboration du raisonnement à partir de cas. Dans *Actes du quatorzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'06*, rédacteur Brigitte Chebel-Morello, Besançon, 2006.
- [Fuchs et Mille, 1999] B. Fuchs et A. Mille. A Knowledge-Level Task Model of Adaptation in Case-Based Reasoning. Dans *Case-Based Reasoning Research and Development — Third International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR-99)*, rédacteurs K.-D. Althoff, R. Bergmann et L. K. Branting, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1650, pages 118–131. Springer, Berlin, 1999.
- [Fuchs, 1996] B. Fuchs. Représentation de connaissances par objets et raisonnement à partir de cas : le système Rocado. Dans *Actes du colloque “ Langages et Modèles à Objets ” (LMO'01)*, Le Croisic, rédacteur R. Godin, 1996.
- [Fuchs, 1997] B. Fuchs. *Représentation de connaissances pour le raisonnement à partir de cas. Le système ROCADE*. Thèse d'université, Laboratoire Image Signal Acoustique de CPE Lyon, 1997.
- [Gien, 1998] O. Gien. Modélisation de la synthèse organique multi-étapes — Développement d'outils informatiques d'aide à la conception de plans de synthèse. Thèse de l'Université Montpellier II, 1998.
- [Gilboa et Schmeidler, 1998] I. Gilboa et D. Schmeidler. Case-based Decision Theory : An Extended Abstract. Dans *Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-98)*, Brighton, United Kingdom, rédacteur H. Prade, pages 706–710, 1998.
- [Goel et Callantine, 1992] A. K. Goel et T. J. Callantine. An Experience-Based Approach to Navigational Route Planning. Dans *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 705–710, Raleigh (NC), 1992.
- [Hammond, 1990] K. J. Hammond. Explaining and Repairing Plans That Fail. *AI Magazine*, 45(1–2) :173–228, 1990.
- [Han et Kamber, 2001] J. Han et M. Kamber. *Data Mining : Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2001.
- [Hanney et Keane, 1996] K. Hanney et M. T. Keane. Learning Adaptation Rules From a Case-Base. Dans *Advances in Case-Based Reasoning – Third European Workshop, EWCBR'96*, rédacteurs I. Smith et B. Faltings, LNAI 1168, pages 179–192. Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [Hanney, 1997] K. Hanney. Learning Adaptation Rules from Cases. Master's thesis, Trinity College, Dublin, 1997.
- [Haquin, 2004] J. Haquin. Développement d'un outil de fouille de bases de cas pour l'acquisition de connaissances d'adaptation. Rapport de stage, DESS ressources génomiques et traitements informatiques, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2004.
- [Herbeaux, 2000] O. Herbeaux. *ACCELERE : aide à la conception de caoutchouc cellulaire exploitant la remémoration d'expériences*. Thèse d'université, Université Jean Monnet de Saint-Étienne, 2000.
- [Jambaud, 1996] P. Jambaud. Le dialogue comme processus de résolution de problème — Une application en chimie organique. Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1996.
- [Kaboré, 1999] É. Kaboré. Similarité entre structures spatiales — Application dans le domaine agricole. Mémoire de DEA d'informatique, Université Henri Poincaré Nancy 1, 1999.
- [Kamp, 1996] G. Kamp. Using Description Logics for Knowledge Intensive Case-Based Reasoning. Dans *Advances in Case-Based Reasoning – Third European Workshop, EWCBR'96*, rédacteurs I. Smith et B. Faltings, LNAI 1168, pages 204–218. Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [Kayser, 1997] D. Kayser. *La représentation des connaissances*. Hermès, 1997.

-
- [Koehler, 1994] J. Koehler. An Application of Terminological Logics to Case-based Reasoning. Dans *Proceedings of the 4th International Conference of Knowledge Representation and Reasoning (KR'94)*, Bonn, 1994.
- [Koehler, 1996] J. Koehler. Planning from Second Principles. *Artificial Intelligence*, 87 :145–186, 1996.
- [Kolodner, 1993] J. Kolodner. *Case-Based Reasoning*. Morgan Kaufmann, Inc., 1993.
- [Lafrogne, 2006] S. Lafrogne. Développement autour de CabamakA, Système de fouille de base de cas pour l'acquisition de connaissances d'adaptation – Tests pour le système Kasimir de gestion des connaissances décisionnelles en cancérologie. Mémoire d'ingénieur CNAM, Conservatoire National des Arts et Métiers, février 2006.
- [Laurenço *et al.*, 1990] C. Laurenço, M. Py, A. Napoli, J. Quinqueton et B. Castro. Représentation de connaissances en synthèse organique à l'aide d'un langage à objets. *New Journal of Chemistry*, 14(12) :921–931, 1990.
- [Laurenço, 1985] C. Laurenço. Synthèse organique assistée par ordinateur. Thèse de Doctorat d'État, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1985.
- [Leake *et al.*, 1995] D. B. Leake, A. Kinley et D. Wilson. Learning to Improve Case Adaptation by Introspective Reasoning and CBR. Dans *Case-Based Reasoning Research and Development – First International Conference, ICCBR'95, Sesimbra, Portugal*, rédacteurs M. Veloso et A. Aamodt, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1010, pages 229–240. Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [Lévêque, 2001] J. Lévêque. Classification hiérarchique floue pour l'aide au traitement du cancer du sein. Rapport de stage, DESS informatique double compétence, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2001.
- [Lieber *et al.*, 2001] J. Lieber, P. Bey, F. Boisson, B. Bresson, P. Falzon, A. Lesur, A. Napoli, M. Rios et C. Sauvagnac. Acquisition et modélisation de connaissances d'adaptation, une étude pour le traitement du cancer du sein. Dans *Actes des journées ingénierie des connaissances (IC-2001)*, pages 409–426, Grenoble, 2001.
- [Lieber *et al.*, 2002] J. Lieber, M. d'Aquin, P. Bey, B. Bresson, O. Croissant, P. Falzon, A. Lesur, J. Lévêque, V. Mollo, A. Napoli, M. Rios et C. Sauvagnac. The Kasimir Project : Knowledge Management in Cancerology. Dans *Proceedings of the 4th International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry (HealthComm 2002)*, pages 125–127, 2002.
- [Lieber *et al.*, 2003] J. Lieber, M. d'Aquin, P. Bey, A. Napoli, M. Rios et C. Sauvagnac. Acquisition of Adaptation Knowledge for Breast Cancer Treatment Decision Support. Dans *9th Conference on Artificial Intelligence in Medicine in Europe 2003 - AIME 2003, Protaras, Chypre*, rédacteurs M. Dojat, E. Keravnou et P. Barahona, Lecture Notes in Artificial Intelligence 2780, pages 304–313, Oct 2003.
- [Lieber *et al.*, 2004] J. Lieber, M. d'Aquin, S. Brachais et A. Napoli. Une étude comparative de quelques travaux sur l'acquisition des connaissances d'adaptation pour le raisonnement à partir de cas. Dans *Actes du douzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'04*, rédacteurs R. Kanawati, S. Salotti et F. Zehraoui, pages 53–60, 2004.
- [Lieber *et al.*, 2007] J. Lieber, M. d'Aquin, F. Badra et A. Napoli. Modeling adaptation of breast cancer treatment decision protocols in the KASIMIR project. *Applied Intelligence (an International Journal)*, à paraître, 2007.
- [Lieber et Bresson, 2000] J. Lieber et B. Bresson. Case-Based Reasoning for Breast Cancer Treatment Decision Helping. Dans *Advances in Case-Based Reasoning – Proceedings of the fifth European Workshop on Case-Based Reasoning (EWCBR-2k)*, rédacteurs E. Blanzieri et L. Portinale, LNAI 1898, pages 173–185. Springer, 2000.

- [Lieber et Marquis, 1996] J. Lieber et P. Marquis. Domain-Independent Similarity Relations for Case-Based Reasoning in a Logical Framework. Dans *Proceedings of the Poster Session of the Ninth International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems (ISMIS'96), Zakopane (Poland), 9-13 June*, pages 230–241. Oak Ridge National Laboratory, 1996.
- [Lieber et Napoli, 1996a] J. Lieber et A. Napoli. Adaptation of Synthesis Plans in Organic Chemistry. Dans *Proceedings of the ECAI'96 Workshop : Adaptation in Case-Based Reasoning*, rédacteur Voß, pages 18–21, 1996.
- [Lieber et Napoli, 1996b] J. Lieber et A. Napoli. Using Classification in Case-Based Planning. Dans *Proceedings of the 12th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'96), Budapest, Hungary*, rédacteur W. Wahlster, pages 132–136. John Wiley & Sons, Ltd., 1996.
- [Lieber et Napoli, 1998a] J. Lieber et A. Napoli. Correct and Complete Retrieval for Case-Based Problem-Solving. Dans *Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-98), Brighton, United Kingdom*, rédacteur Henri Prade, pages 68–72, 1998.
- [Lieber et Napoli, 1998b] J. Lieber et A. Napoli. Représentations par objets et classification pour le raisonnement à partir de cas. Dans *11^{ème} congrès reconnaissance des formes et intelligence artificielle (RFIA'98)*, pages 345–354, 1998.
- [Lieber et Napoli, 1998c] J. Lieber et A. Napoli. Vers une proposition de définitions des notions d'abstraction et de généralisation dans le cadre du raisonnement à partir de cas appliqué à la résolution de problèmes. Dans *Actes du VI^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteur M. Malek, 1998.
- [Lieber et Napoli, 1999] J. Lieber et A. Napoli. Raisonnement à partir de cas et résolution de problèmes dans une représentation par objets. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 13 :9–35, 1999.
- [Lieber et Napoli, 2000] J. Lieber et A. Napoli. Planification à partir de cas et classification. Dans *Ingénierie des connaissances – Évolutions récentes et nouveaux défis*, rédacteurs Jean Charlet, Manuel Zacklad, Gilles Kassel et Didier Bourigault, collection technique et scientifique des télécommunications, pages 357–369. Eyrolles, 2000. Le livre dans lequel est paru cet article est un recueil d'articles paru dans les actes des conférences IC (ingénierie des connaissances). En particulier, cet article est également paru dans les actes de la conférence IC-97.
- [Lieber, 1992] J. Lieber. Étude du raisonnement par cas. Mémoire de DEA d'informatique, Université de Nancy I, 1992.
- [Lieber, 1994] J. Lieber. A criterion of comparison between two case bases. Dans *Proceedings of the Second European Workshop on Case-Based Reasoning (EWCBR'94), Chantilly*, pages 205–213, 1994.
- [Lieber, 1995] J. Lieber. Une approche de la remémoration guidée par l'adaptabilité pour une application du raisonnement à partir de cas à la synthèse en chimie organique. Dans *Actes du IV^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteur I. Bichindaritz, pages 79–90, Université René Descartes (Paris V), 1995.
- [Lieber, 1997] J. Lieber. *Raisonnement à partir de cas et classification hiérarchique. Application à la planification de synthèse en chimie organique*. Thèse d'université, Université Henri Poincaré Nancy 1, 1997.
- [Lieber, 1999a] J. Lieber. La méthode d'Euler vue comme une application du raisonnement à partir de cas. Dans *Actes du VII^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteurs A. Mille et B. Trousse, 1999.

-
- [Lieber, 1999b] J. Lieber. Reformulations and Adaptation Decomposition. Dans *Formalisation of Adaptation in Case-Based Reasoning*, rédacteurs J. Lieber, E. Melis, A. Mille et A. Napoli. Third International Conference on Case-Based Reasoning Workshop, ICCBR-99 Workshop number 3, S. Schmitt and I. Vollrath (volume editor), LSA, University of Kaiserslautern, 1999.
- [Lieber, 2000] J. Lieber. Composition et décomposition de l'adaptation dans le cadre du raisonnement à partir de cas. Dans *Acte de la journée sur l'adaptation, INRA de Champenoux*, rédacteurs F. Le Ber et J. Lieber, pages 31–36, 2000.
- [Lieber, 2001] J. Lieber. Des règles, des cas, des généralités, des spécificités, des applications, des adaptations, des chaînes, des combinaisons et des tartes. Dans *Actes du IX^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteurs B. Fuchs et A. Mille, 2001.
- [Lieber, 2002a] J. Lieber. Recopier c'est déjà adapter : six types d'adaptation par copie. Dans *actes du X^{ème} séminaire français de raisonnement à partir de cas*, rédacteurs Marie-Christine Jaulent, Christel Le Bozec et Éric Zapletal, pages 11–21, 2002.
- [Lieber, 2002b] J. Lieber. Strong, Fuzzy and Smooth Hierarchical Classification for Case-Based Problem Solving. Dans *Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-02), Lyon, France*, rédacteur F. van Harmelen, pages 81–85. IOS Press, Amsterdam, 2002.
- [Lieber, 2003] J. Lieber. Raisonnement à partir de cas s'appuyant sur les classifications dure, floue et élastique dans une hiérarchie de problèmes. Dans *Actes des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA-03)*, rédacteur Carl Frélicot, pages 99–106. CEPADUES-Éditions, Toulouse, 2003.
- [Lieber, 2006] J. Lieber. A Definition and a Formalization of Conservative Adaptation for Knowledge-Intensive Case-Based Reasoning – Application to Decision Support in Oncology (A Preliminary Report). Rapport de recherche, LORIA, 2006.
- [Lieber, 2007a] J. Lieber. Application de la révision et de la fusion des connaissances à l'adaptation et à la combinaison de cas. Dans *Actes du quinzième atelier raisonnement à partir de cas, RàPC'07*, rédacteurs A. Cordier et B. Fuchs, pages 119–129, Grenoble, 2007. Plateforme AFIA.
- [Lieber, 2007b] J. Lieber. Application de la théorie de la révision à l'adaptation en raisonnement à partir de cas : l'adaptation conservatrice. Dans *Actes des quatrième journées francophones sur les modèles formels de l'interaction*, pages 201–213, 2007.
- [Lieber, 2007c] J. Lieber. Application of the Revision Theory to Adaptation in Case-Based Reasoning : the Conservative Adaptation. Dans *Proceedings of the 7th International Conference on Case-Based Reasoning* (à paraître), Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, Belfast, août 2007.
- [López de Mántaras et Plaza, 1997] R. López de Mántaras et E. Plaza. Case-Based Reasoning : An overview. *AI Communications*, 10(1) :21–29, 1997.
- [Lutz, 2003] C. Lutz. Description Logics with Concrete Domains – A Survey. Dans *Advances in Modal Logics Volume 4*. King's College Publications, 2003.
- [Mariño, 1993] O. Mariño. *Raisonnement classificatoire dans une représentation à objets multi-points de vue*. Thèse d'Informatique, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1993.
- [Melis et al., 1998] E. Melis, J. Lieber et A. Napoli. Reformulation in Case-Based Reasoning. Dans *Fourth European Workshop on Case-Based Reasoning, EWCBR-98*, rédacteurs B. Smyth et P. Cunningham, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1488, pages 172–183. Springer, 1998.
- [Melis, 1993] E. Melis. Reformulation in Analogical Reasoning. Dans *Proceedings of the First European Workshop on Case-Based Reasoning (EWCBR'93), Kaiserslautern*, rédacteurs M.M. Richter, S. Wess, K.-D. Althoff et F. Maurer, pages 120–124, 1993.

- [Melis, 1995] E. Melis. A model of analogy-driven proof-plan construction. Dans *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, pages 182–189, Montréal, 1995.
- [Metzger, 2000] J.-L. Metzger. Acquisition, modélisation et représentation de connaissances pour le raisonnement à partir de cas — Application à l'étude d'organisations spatiales agricoles. Mémoire de DEA d'informatique, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2000.
- [Michalski et Kodratoff, 1990] R. S. Michalski et Y. Kodratoff. Research in machine learning : Recent progress, classification of methods, and future directions. Dans *Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach*, rédacteurs R. S. Michalski et Y. Kodratoff, volume 3, chapitre 1, pages 3–30. Morgan Kaufmann, Inc., 1990.
- [Michalski, 1986] R. S. Michalski. Inductive Learning. Dans *Machine Learning*, rédacteurs R.S. Michalski, J.G. Carbonell et T.M. Mitchell, volume 2, chapitre 4. Morgan Kaufmann, Inc., 1986.
- [Mille, 1998] A. Mille. Habilitation à diriger les recherches en informatique. Université Claude Bernard Lyon 1, 1998.
- [Mollo, 2004a] V. Mollo. Normalisation et adaptation des règles en cancérologie. Dans *Ergonomie et normalisation, actes du XXXIXème congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF)*, rédacteurs P. Rey, E. Ollanier, V. Gonik et D. Ramaciotti, pages 221–229, Genève, september 2004. Octarès (Toulouse).
- [Mollo, 2004b] V. Mollo. *Usage des ressources, adaptation des savoirs et gestion de l'autonomie dans la décision thérapeutique*. Thèse d'Université, Conservatoire National des Arts et Métiers, 2004.
- [Napoli *et al.*, 1994] A. Napoli, C. Laurenço et R. Ducournau. An object-based representation system for organic synthesis planning. *International Journal of Human-Computer Studies*, 41(1/2) :5–32, 1994.
- [Napoli *et al.*, 1996] A. Napoli, J. Lieber et R. Curien. Classification-Based Problem-Solving in Case-Based Reasoning. Dans *Advances in Case-Based Reasoning – Third European Workshop, EWC-BR'96*, rédacteurs I. Smith et B. Faltings, LNAI 1168, pages 295–308. Springer, Berlin, 1996.
- [Napoli et Lieber, 1993a] A. Napoli et J. Lieber. Classifying Knowledge for Reusability – An Application to Organic Synthesis Planning. Dans *Proceedings of the IJCAI'93 Workshop "Reuse of designs : an interdisciplinary cognitive approach"*, Chambéry, pages 116–127, 1993.
- [Napoli et Lieber, 1993b] A. Napoli et J. Lieber. Finding Strategies in Organic Synthesis Planning with Case-based Reasoning. Dans *Proceedings of the First European Workshop on Case-Based Reasoning (EWCBR'93)*, Kaiserslautern, rédacteurs M.M. Richter, S. Wess, K.-D. Althoff et F. Maurer, pages 264–269, 1993.
- [Napoli, 1992a] A. Napoli. Représentation à objets et raisonnement par classification en intelligence artificielle. Thèse de Doctorat d'État, Université de Nancy 1, 1992.
- [Napoli, 1992b] A. Napoli. Subsumption and Classification-Based Reasoning in Object-Based Representations. Dans *Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'92)*, Vienna, Austria, pages 425–429, 1992.
- [Napoli, 1997] A. Napoli. Une introduction aux logiques de descriptions. Rapport de Recherche RR 3314, INRIA, 1997.
- [Noy *et al.*, 2000] N. Noy, R. Fergerson et M. Musen. The knowledge model of Protégé-2000 : Combining interoperability and flexibility. Dans *Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management, EKAW 2000*, October 2000.

-
- [Noy *et al.*, 2001] N. F. Noy, M. Sintek, S. Decker, M. Crubezy, R. W. Fergerson et M. A. Musen. Creating Semantic Web Contents with Protégé-2000. *IEEE Intelligent Systems*, 2(16) :60–71, 2001.
- [Okada et Kawai, 1989] T. Okada et T. Kawai. Analogical Reasoning in Chemistry. 1. Introduction and General Strategy. *Tetrahedron Computer Methodology*, 2(6) :327–336, 1989.
- [Pearl, 1984] J. Pearl. *Heuristics – Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 1984.
- [Plaza, 1995] E. Plaza. Cases as terms : A feature term approach to the structured representation of cases. Dans *Case-Based Reasoning Research and Development – First International Conference, ICCBR'95, Sesimbra, Portugal*, rédacteurs M. Veloso et A. Aamodt, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1010, pages 265–275. Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [Polaillon, 1999] G. Polaillon. *Organisation et interprétation par les treillis de Galois de données de type multivalué, intervalle ou histogramme*. Thèse d'université, Université Paris IX-Dauphine, 1999.
- [Py, 1994] M. Py. Un modèle conceptuel de raisonnement par analogie. *Revue d'intelligence artificielle*, 8 :63–99, 1994.
- [Régis, 1995] J.-C. Régis. Développement d'outils algorithmiques pour l'Intelligence Artificielle. Application à la chimie organique. Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1995.
- [Riesbeck et Schank, 1989] C. K. Riesbeck et R. C. Schank. *Inside Case-Based Reasoning*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Hillsdale, New Jersey, 1989.
- [Salotti et Ventos, 1999] S. Salotti et V. Ventos. Approche formelle du raisonnement à partir de cas dans une logique de descriptions. *Revue d'Intelligence Artificielle en Janvier 1999*, 13 :37–7, 1999.
- [Sánchez et Tettamanzi, 2005] D. Sánchez et A. G. B. Tettamanzi. Reasoning and Quantification in Fuzzy Description Logics. Dans *Proceedings of the Workshop Fuzzy Logic and the Semantic Web*, rédacteur E. Sanchez, pages 15–17, Marseille, France, 2005.
- [Sauvagnac, 2000] C. Sauvagnac. *La construction de connaissances par l'utilisation et la conception de procédures. Contribution au cadre théorique des activités métafonctionnelles*. Thèse d'Université, Conservatoire National des Arts et Métiers, 2000.
- [Schank, 1982] R. C. Schank. *Dynamic Memory : A Theory of Learning in Computers and People*. Cambridge University Press, New York, 1982.
- [Smyth et Keane, 1996] B. Smyth et M. T. Keane. Using adaptation knowledge to retrieve and adapt design cases. *Knowledge-Based Systems*, 9(2) :127–135, 1996.
- [Smyth, 1996] B. Smyth. *Case-Based Design*. PhD thesis, Trinity College, University of Dublin, 1996.
- [Sowa, 1984] J. F. Sowa. *Conceptual Structures : Information Processing in Mind and Machine*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1984.
- [Sparfel, 1992] D. Sparfel. *La rétrosynthèse*. Ellipses, 1992.
- [Stahl et Bergmann, 2000] A. Stahl et R. Bergmann. Applying Recursive CBR for the Customization of Structure Products in an Electronic Shop. Dans *Advances in Case-Based Reasoning – Proceedings of the fifth European Workshop on Case-Based Reasoning (EWCBR-2k)*, rédacteurs E. Blanzieri et L. Portinale, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1898, pages 297–308. Springer, 2000.
- [Straccia, 2001] U. Straccia. Reasoning within Fuzzy Description Logics. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 14 :137–166, 2001.
- [Szathmary et Napoli, 2005] L. Szathmary et A. Napoli. Coron : A framework for levelwise itemset mining algorithms. Dans *Supplementary Proceedings of The Third International Conference on Formal*

- Concept Analysis – ICFCA'05, Lens, France*, rédacteurs B. Ganter, R. Godin et E. Mephu Nguifo, pages 110–113, Feb 2005.
- [Szathmary, 2006] L. Szathmary. *Symbolic Data Mining Methods with the Coron Platform*. Thèse d'université, Université Henri Poincaré Nancy 1, soutenue le 24 novembre 2006, 2006.
- [TCAN (Traitement des connaissances, apprentissage et NTIC), 2005] TCAN (Traitement des connaissances, apprentissage et NTIC). www.cnrs.fr/DEP/prg/TCAN.html. dernière consultation : mai, 2005.
- [Tixier, 2007] M. Tixier. Sémantique et composition des règles d'adaptation d'un système de raisonnement à partir de cas — Vers la construction d'une base de règles d'adaptation. Mémoire de M2R du master Sciences de la cognition et applications, spécialité TAL, Université Nancy 2 — LORIA, 2007.
- [Tresp et Molitor, 1998] C.B. Tresp et R. Molitor. A Description Logic for Vague Knowledge. Dans *Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'98)*, pages 361–365. J. Wiley and Sons, 1998.
- [Tversky, 1977] A. Tversky. Features of Similarity. *Psychological Review*, 84 :327–352, 1977.
- [Veloso, 1994] M. M. Veloso. *Planning and Learning by Analogical Reasoning*. LNAI 886. Springer Verlag, Berlin, 1994.
- [Vismara *et al.*, 1992] P. Vismara, J.-Ch. Régis, J. Quinqueton, M. Py, C. Laurenço et L. Lapied. RE-SYN – Un système d'aide à la conception de plans de synthèse en chimie organique. Dans *Actes des 12èmes Journées Internationales Intelligence Artificielle, Systèmes Experts, Langage Naturel, Avignon*, pages 305–318, 1992.
- [Vismara, 1995] P. Vismara. Reconnaissance et représentation d'éléments structuraux pour la description d'objets complexes. Application à l'élaboration de stratégies de synthèse en chimie organique. Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1995.
- [Wald, 1950] A. Wald. *Statistical Decision Functions*. Wiley, New York, 1950.
- [Zaki et Hsiao, 2002] M. J. Zaki et C.-J. Hsiao. CHARM : An Efficient Algorithm for Closed Itemset Mining. Dans *SIAM International Conference on Data Mining SDM'02*, pages 33–43, Apr 2002.