HAL
open science

Acquisition de connaissances du domaine d'un système de RàPC : une approche fondée sur l'analyse interactive des échecs d'adaptation — le système FrakaS

Amélie Cordier, Béatrice Fuchs, Jean Lieber, Alain Mille

▶ **To cite this version:**

Amélie Cordier, Béatrice Fuchs, Jean Lieber, Alain 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. 15ème atelier sur le raisonnement à partir de cas - RàPC-07, Amélie Cordier, Jul 2007, Grenoble, France. pp.57–70. inria-00189586

HAL Id: inria-00189586

https://inria.hal.science/inria-00189586

Submitted on 21 Nov 2007

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.

Acquisition de connaissances du domaine d'un système de RÀPC : une approche fondée sur l'analyse interactive des échecs d'adaptation — le système FRAKAS

Amélie Cordier[1], Béatrice Fuchs[1], Jean Lieber[2] et Alain Mille[1]

[1]LIRIS CNRS, UMR 5202, Université Lyon 1, INSA Lyon, Université Lyon 2, ECL
{Amelie.Cordier, Beatrice.Fuchs, Alain.Mille}@liris.cnrs.fr
[2]Équipe Orpailleur, LORIA UMR 7503 CNRS, INRIA, Universités de Nancy
BP 239 54 506 Vandœuvre-lès-Nancy, France Jean.Lieber@loria.fr

Résumé

Un système de raisonnement à partir de cas (RÀPC) s'appuie sur des connaissances du domaine, en plus de la base de cas. L'acquisition de nouvelles connaissances du domaine doit améliorer les résultats d'un tel système. Cet article présente une approche pour une acquisition de connaissances fondée sur les échecs du système. Le système de RÀPC considéré est supposé produire des solutions qui sont cohérentes avec les connaissances du domaine mais ces solutions peuvent être incohérentes avec les connaissances de l'expert et cette incohérence constitue une première situation d'échec. Grâce à une analyse interactive de cet échec, des connaissances sont acquises qui contribuent à remplir le fossé existant entre les connaissances du système et celles de l'expert. Un autre type d'échec apparaît quand la solution présentée par le système n'est que partielle : certaines informations additionnelles sont requises pour pouvoir exploiter cette solution. Une fois de plus, l'interaction avec l'expert entraîne une acquisition de nouvelles connaissances. Cette approche a été implantée dans un prototype, baptisé FRAKAS, et testé sur un exemple dans le domaine d'application de l'aide à la décision thérapeutique en cancérologie du sein.

1 Introduction

Un système de raisonnement à partir de cas (RÀPC [20]) est un système qui effectue des raisonnements et, par conséquent, qui s'appuie sur des connaissances. Parmi ces connaissances il y a, bien entendu, les cas sources, mais beaucoup de systèmes utilisent également d'autres sources de connaissances, telles que les « connaissances du domaine » (aussi connues sous les appellations « ontologie du domaine » ou « théorie du domaine »). Plus ces connaissances du domaine sont exactes (correctes ?) et précises (complètes ?), meilleures seront les inférences effectuées par le système de RÀPC.

Cet article présente une approche interactive pour l'acquisition des connaissances du domaine d'un système de RÀPC. Plus précisément, cette acquisition se fait lors des sessions de raisonnement à partir de cas : quand le problème cible est résolu par adaptation du cas remémoré, il est présenté à l'utilisateur qui, si son niveau d'expertise est suffisant, peut mettre en évidence le fait que la solution est insatisfaisante et pourquoi elle l'est. Par exemple, et ce sont les situations d'échecs qui nous intéressent ici, la solution peut être incohérente avec les connaissances de l'expert ou peut n'être que partielle (il manque à l'utilisateur des informations pour pouvoir exploiter entièrement cette solution). Un mécanisme interactif qui a pour objectif d'incorporer de nouvelles connaissances est décrit. Ces nouvelles connaissances sont utilisées pour réparer les adaptations ayant échoué et pour prévenir des échecs similaires lors de futurs raisonnements. Par conséquent, ce travail concerne l'étape de RÀPC appelée réparation dans [20], aussi connue sous le nom d'étape de révision dans [2] et dans [17] (mais dans un sens différent du mot révision tel qu'il est utilisé dans cet article).

Après avoir, dans la section 2, présenté les notions, notations et hypothèses sur le RÀPC, nous présenterons les principes de cette acquisition des connaissances (section 3). Ces principes ont été implantés au sein d'un

prototype baptisé FRAKAS dont la présentation à la section 4 constitue le cœur de cet article : on y montre à travers un exemple comment FRAKAS met en œuvre les principes de cette acquisition. La section 5 présente certains travaux portant sur l'acquisition des connaissances du domaine d'un système de RÀPC, en comparaison avec l'approche présentée dans cet article. Enfin, la section 6 conclut cet article et présente quelques pistes de recherches qui nous semblent intéressantes pour la poursuite de ce travail.

2 Notions de base, notations et hypothèses sur le RÀPC

On se place dans un domaine d'application particulier pour lequel les notions de problème et de solution sont bien définies. Si `pb` est un problème (resp., `sol` est une solution) alors `pb` (resp., `sol`) est une expression d'un formalisme de représentation des connaissances qui représente un problème (resp., une solution) de ce domaine. Par ailleurs, on suppose qu'il existe une relation binaire liant un problème à une solution dont la signification est « a pour solution ». Dans certaines applications du RÀPC, cette relation n'est qu'imparfaitement connue. En revanche, on dispose d'une base de cas (appelés cas sources), c'est-à-dire d'un ensemble de couples $\texttt{cas-srce} = (\texttt{srce}, \texttt{Sol}(\texttt{srce}))$ où `srce` est un problème, $\texttt{Sol}(\texttt{srce})$ est une solution et `srce` a pour solution $\texttt{Sol}(\texttt{srce})$. On note `CD` la base de connaissances codant les connaissances du domaine.

Raisonner à partir de cas, c'est résoudre un problème, appelé problème cible et dénoté par `cible`, au moyen de la base de cas. Ce raisonnement est d'habitude constitué de deux grandes étapes : la remémoration, qui a pour objectif de sélectionner un cas source jugé similaire au problème cible et l'adaptation qui a pour objectif de résoudre le problème cible en s'appuyant sur le cas source remémoré. Une troisième grande étape complète parfois les deux précédentes : c'est l'étape d'apprentissage qui peut se faire de façon automatique ou par interaction avec un expert : elle consiste à améliorer les connaissances du système (cas, connaissances du domaine) suite à la résolution par adaptation du cas remémoré.

Dans cet article, nous faisons quatre hypothèses supplémentaires qui nous semblent raisonnables pour un système de RÀPC. La première est que l'adaptation produit un résultat *cohérent* avec les connaissances du domaine (mais pas nécessairement avec les connaissances de l'expert).

La deuxième hypothèse est qu'il existe une distinction calculable entre une solution qui résout totalement un problème et une solution qui ne le résout que partiellement : celle-ci ne décrit qu'insuffisamment une solution exploitable par l'utilisateur. À titre d'exemple, la solution « Se procurer et boire une potion de passe-muraille et traverser son mur » au problème « Comment rentrer chez soi quand on a oublié ses clefs ? » sera jugée partielle si on estime que le fait de se procurer une potion de passe-muraille n'est pas évident pour l'utilisateur. Une manière d'opérer cette distinction entre les solutions partielles et celles qui ne le sont pas est de considérer qu'un sous-ensemble du vocabulaire utilisé pour représenter un cas est « abstrait » et que si ce vocabulaire est indispensable à la représentation d'une solution, alors cette solution est abstraite[1]. Dans l'exemple ci-dessus, « Se procurer quelque chose » fait partie du vocabulaire abstrait contrairement à « Aller chez la sorcière Gudule, au 666 allée des orties en fleurs, 69 001 Lyon ».

La troisième hypothèse est que chaque problème (resp., solution) codé dans le système de RÀPC représente un ensemble d'*instances* de problèmes (resp., de solutions).

La quatrième hypothèse est qu'un problème (resp., une solution) est représenté(e) par un ensemble de descripteurs interprété de façon conjonctive : si $\texttt{pb} = \{\texttt{d}_1, \ldots \texttt{d}_n\}$, cela signifie que `pb` décrit le problème dont les instances vérifient chacun des descripteurs $\texttt{d}_i$ ($i \in \{1, \ldots n\}$). Cette hypothèse n'est pas absolument obligatoire pour notre approche, mais nous la faisons néanmoins, car elle simplifie les explications.

3 Principes

Entre les connaissances du domaine dont dispose le système de RÀPC, `CD`, et les connaissances de l'expert, il y a généralement un fossé[2]. D'après [18], ce fossé est impossible à combler entièrement pour la plupart des

[1] L'utilisation des termes « concret » (resp. « abstrait ») est un abus de langage : il faudrait parler de « variables faisant référence à des concepts concrets (resp. abstraits) ».

[2] Les connaissances du domaine sont disponibles mais ne sont pas suffisantes, il est donc nécessaire d'en acquérir de nouvelles.

applications pratiques : c'est le problème dit de la qualification. Néanmoins, on peut quand même acquérir de nouvelles connaissances du domaine grâce à l'expert.

Le principe général de l'approche présentée ici est de faire un apprentissage « au fil de l'eau » par analyse des échecs de l'adaptation. Ce que nous apppelons un apprentissage au fil de l'eau est un apprentissage qui se fait lors de l'utilisation du système : celui-ci effectue des raisonnements et l'apprentissage se fait par une acquisition de connaissances auprès de l'expert suite à ce raisonnement. C'est un apprentissage par analyse des échecs si l'interaction avec l'expert s'appuie sur le fait que, selon l'expert, le résultat est, au moins partiellement, un échec.

Deux types d'échecs ont été retenus dans cet article et conduisent à des acquisitions des connaissances particulières (quoique similaires). D'autres types d'échec existent très probablement, mais ne sont pas considérés ici.

Premier type d'échec : échec dû à une incohérence de la solution adaptée avec les connaissances de l'expert. L'expert annonce que, compte tenu de ce qu'il sait des connaissances du domaine, l'affirmation « `Sol(cible)` résout `cible` » est incohérente. Cela peut vouloir dire que la solution en elle-même est incohérente (ou irréalisable, comme par exemple le fait de transformer un œuf cuit en œuf cru) ou qu'elle est incohérente avec le contexte du problème cible (par exemple, si le problème `cible` est « Comment aller de Nancy à Lyon ? » et que sa solution est la spécification d'un chemin de Toulouse à Bordeaux).

Dans ce cas, on attend de l'expert qu'il mette en évidence (grâce à une interface bien conçue) une partie de `Sol(cible)` (idéalement, la plus « petite » possible) qui soit incohérente avec ses connaissances et l'énoncé du problème cible. Cette partie de la solution est un sous-ensemble `Inc` de l'ensemble des descripteurs de `Sol(cible)`. Une première connaissance acquise (et ajoutée à `CD`) est le fait que « `Inc` est faux ». On peut alors refaire le raisonnement avec les nouvelles connaissances du domaine.

Puis, on peut demander à l'expert une explication. Celle-ci peut être complexe et il nous semble au mieux très compliqué et au pire illusoire d'imaginer automatiser complètement cette partie (la modélisation et la formalisation des connaissances sont l'affaire des ingénieurs de la connaissance, et suppose une certaine expérience que n'a pas nécessairement un expert du domaine de l'application). En conséquence de quoi, il est proposé que l'expert rédige une explication en texte libre (ou encore oralement) et que le document qui en résulte soit utilisé ultérieurement par un ingénieur des connaissances en présence de l'expert, pour acquérir de nouvelles connaissances (qui entraîneront, en particulier mais pas seulement, que « `Inc` est faux »).

Deuxième type d'échec : échec dû à une solution qui n'est que partielle. Si la solution `Sol(cible)` proposée par l'adaptation est partielle, et donc pas pleinement satisfaisante, l'interaction avec l'expert peut permettre de la préciser. Soit IS, l'ensemble des instances de `Sol(cible)`. Si une telle instance $s \in IS$ est jugée satisfaisante par l'expert, elle constitue une solution du problème `cible`. Si au contraire, elle est incohérente avec ses connaissances expertes, on attend de l'expert qu'il mette en évidence une partie `Inc` minimale des descripteurs de s. On se ramène alors à l'acquisition des connaissances selon le premier type d'échec : on ajoute à `CD` « `Inc` est faux » et on demande à l'expert une explication, source d'acquisition des connaissances avec l'expert et un ingénieur des connaissances.

4 FRAKAS : un système pour l'acquisition de connaissances du domaine par analyse interactive d'échecs de raisonnement

FRAKAS (*FailuRe Analysis for domain Knowledge AcquiSition*) est un prototype qui implante les principes énoncés ci-dessus dans le cadre d'une représentation en logique propositionnelle.

4.1 Principes de l'adaptation utilisée

4.1.1 Formalisme utilisé

On se place dans le cadre de la logique propositionnelle sur un ensemble de variables $\mathcal{V}$. Ainsi, $\mathtt{CD}$, $\mathtt{srce}$, $\mathtt{Sol}(\mathtt{srce})$ et $\mathtt{cible}$ sont des formules propositionnelles sur $\mathcal{V}$. On partitionne $\mathcal{V}$ en $\{\mathcal{V}^c_{\mathtt{pb}}, \mathcal{V}^a_{\mathtt{pb}}, \mathcal{V}^c_{\mathtt{sol}}, \mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}}, \mathcal{V}_{autres}\}$ où $\mathcal{V}^x_{\mathtt{pb}}$ (resp., $\mathcal{V}^x_{\mathtt{sol}}$) représente les variables utilisées pour représenter des problèmes (resp., des solutions), et si $x = c$ (resp., $x = a$) alors cet ensemble ne contient que des variables dites concrètes (resp., abstraites). Un problème (resp., une solution) est une formule dont les variables appartiennent à $\mathcal{V}^c_{\mathtt{pb}} \cup \mathcal{V}^a_{\mathtt{pb}}$ (resp., à $\mathcal{V}^c_{\mathtt{sol}} \cup \mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}}$). Cette séparation entre variables de problèmes et variables de solution permet d'exprimer un cas source comme conjonction de sa partie problème et de sa partie solution : $\mathtt{cas\text{-}srce} = \mathtt{srce} \wedge \mathtt{Sol}(\mathtt{srce})$.

Une interprétation sur $\mathcal{V}$ est une fonction $\mathcal{I}$ qui à $x \in \mathcal{V}$ associe $x^{\mathcal{I}} \in \{\mathtt{vrai}, \mathtt{faux}\}$. $\mathcal{I}$ est prolongé sur l'ensemble des formules construites sur $\mathcal{V}$ de façon usuelle (p. ex., $(f \wedge g)^{\mathcal{I}} = \mathtt{vrai}$ ssi $f^{\mathcal{I}} = \mathtt{vrai}$ et $g^{\mathcal{I}} = \mathtt{vrai}$). $\mathcal{I}$ est un modèle de f si $f^{\mathcal{I}} = \mathtt{vrai}$. f entraîne g (resp., f est équivalente à g), dénoté par $f \models g$ (resp. $f \equiv g$) si $\mathtt{Mod}(f) \subseteq \mathtt{Mod}(g)$ (resp., $\mathtt{Mod}(f) = \mathtt{Mod}(g)$). f entraîne (resp., est équivalente à) g modulo $\mathtt{CD}$, dénoté par $f \models_{\mathtt{CD}} g$ (resp., par $f \equiv_{\mathtt{CD}} g$) si $\mathtt{CD} \wedge f \models g$ (resp., si $\mathtt{CD} \wedge f \equiv \mathtt{CD} \wedge g$). On note $\mathtt{Mod}(f)$ l'ensemble des modèles de f. Les instances d'un problème (resp., d'une solution) sont définies ici comme étant ses interprétations sur $\mathcal{V}^c_{\mathtt{pb}} \cup \mathcal{V}^a_{\mathtt{pb}}$ (resp., sur $\mathcal{V}^c_{\mathtt{sol}} \cup \mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}}$).

Une solution $\mathtt{sol}$ est partielle s'il n'est pas possible de l'exprimer sans variable abstraite, autrement dit s'il n'existe aucune formule f telle que $\mathtt{sol} \equiv_{\mathtt{CD}} f$ et telle que aucune variable de f n'appartienne à $\mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}}$[3].

4.1.2 L'adaptation conservatrice

L'adaptation qui est effectuée par FRAKAS est l'adaptation conservatrice (AC) que nous allons décrire brièvement ici (voir [16] pour plus de détails). Cette approche de l'adaptation consiste à faire des modifications « minimales » sur le cas source afin d'être cohérent avec à la fois le problème cible et les connaissances du domaine. Elle est formalisée grâce à la notion d'opérateur de révision [3; 13] : un opérateur de révision $\circ$ associe à deux bases de connaissances ψ et μ la base de connaissances $\psi \circ \mu$ qui, intuitivement, est obtenue par changement minimum sur ψ pour être cohérente avec μ. Dans un cadre de logique propositionnelle, l'adaptation d'un cas $\mathtt{cas\text{-}srce}$ pour résoudre un problème $\mathtt{cible}$, étant donné les connaissances du domaine $\mathtt{CD}$ et un opérateur de révision $\circ$ est :

$$\mathtt{AC}_{\circ}(\mathtt{CD}, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible}) = (\mathtt{CD} \wedge \mathtt{cas\text{-}srce}) \circ (\mathtt{CD} \wedge \mathtt{cible})$$

d'où une solution $\mathtt{Sol}(\mathtt{cible})$ peut être inférée déductivement.

D'un point de vue pratique, on utilise l'opérateur de révision de Dalal, dénoté par $\circ_{\mathrm{D}}$ [8; 13], qu'on peut définir comme suit. Soit $\mathtt{dist}$ la distance de Hamming entre interprétations sur $\mathcal{V}$ ($\mathtt{dist}(\mathcal{I}, \mathcal{J})$ est le nombre de $x \in \mathcal{V}$ tels que $x^{\mathcal{I}} \neq x^{\mathcal{J}}$) et soit la formule $G^{\lambda}(\psi)$ (pour $\lambda \geqslant 0$ et ψ une formule) telle que :

$$\mathtt{Mod}(G^{\lambda}(\psi)) = \{\mathcal{J} \mid \mathcal{J} \text{ : interprétation sur } \mathcal{V} \text{ telle qu'il existe } \mathcal{I} \in \mathtt{Mod}(\psi) \text{ avec } \mathtt{dist}(\mathcal{I}, \mathcal{J}) \leqslant \lambda\}$$

Ce qui permet de définir $G^{\lambda}(\psi)$ à l'équivalence logique près[4]. Pour ψ et μ deux formules telles que la deuxième au moins est satisfiable, $\psi \circ_{\mathrm{D}} \mu$ est défini comme étant $G^{\Delta}(\psi) \wedge \mu$ où Δ est la plus petite valeur telle que $G^{\Delta}(\psi) \wedge \mu$ est satisfiable. Intuitivement, $\psi \circ_{\mathrm{D}} \mu$ est obtenu en généralisant ψ de manière minimale (le long de l'échelle $(\{G^{\lambda}\}_{\lambda}, \models)$) afin d'être cohérente avec μ.

[3] Ce test est effectué dans FRAKAS comme suit. Pour toute $\mathcal{I} \in \mathtt{Mod}(\mathtt{sol})$, soit $\mathcal{I}^-$, l'interprétation obtenue par projection de $\mathcal{I}$ sur l'ensemble des variables $\mathcal{V} \backslash \mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}}$. Puis, soit let $\mathtt{sol}^-$ une formule dont les modèles sont les $\mathcal{I}^-$, pour $\mathcal{I} \in \mathtt{Mod}(\mathtt{sol})$. Enfin, le test $\mathtt{sol} \equiv_{\mathtt{CD}} \mathtt{sol}^-$ est effectué ; $\mathtt{sol}$ peut s'écrire sans variable abstraite (i.e., $\mathtt{sol}$ n'est pas partielle) ssi ce test est positif.

[4] C'est suffisant pour nous car nous adhérons au principe de non pertinence de la syntaxe qui dit que si $f \equiv g$, un système effectuant des raisonnements artificiels sur la base de la connaissance f pourra faire les mêmes inférences — à l'équivalence logique près — que celles d'un système utilisant g à la place de f.

4.1.3 Exemple

Léon va inviter Carole et veut lui préparer un repas qui lui plaise. Son problème cible est spécifié par les caractéristiques alimentaires de Carole : celle-ci est végétarienne (dénoté par la variable *vé*) et a d'autres caractéristiques (dénotées par *au*), non détaillées dans cet exemple : $\texttt{cible} = vé \wedge au$. De son expérience en tant que hôte, Léon se rappelle qu'il a invité Simone il y a quelques temps et il pense que Simone est très similaire à Carole, du point de vue alimentaire, à part le fait qu'elle n'est pas végétarienne : $\texttt{srce} = \neg vé \wedge au$. Il a proposé à Simone un repas avec une salade (*sa*), un plat avec du bœuf (*bœ*) et un dessert (*de*), et elle était satisfaite par les deux premiers mais n'a pas mangé son dessert, ce qui a conduit Léon a retenir le cas $(\texttt{srce}, \texttt{Sol}(\texttt{srce}))$ avec $\texttt{Sol}(\texttt{srce}) = sa \wedge bœ \wedge \neg de$. Par ailleurs, Léon a quelques connaissances générales sur l'alimentation : il sait que le bœuf c'est de la viande, que la viande et le tofu sont des nourritures à base de protéines, que le tofu n'est pas de la viande et que les végétariens ne mangent pas de viande. Par conséquent, ses connaissances du domaine sont[5] :

$$\texttt{CD} \quad = \quad bœ \Rightarrow vi \quad \wedge \quad vi \Rightarrow pr \quad \wedge \quad to \Rightarrow pr \quad \wedge \quad \neg to \vee \neg vi \quad \wedge \quad vé \Rightarrow \neg vi$$

L'adaptation conservatrice donne sur cet exemple :

$$\texttt{AC}_{\circ_{\mathrm{D}}}(\texttt{CD}, \texttt{cas-srce}, \texttt{cible}) \equiv_{\texttt{CD}} \underbrace{vé \wedge au}_{\texttt{cible}} \wedge \underbrace{sa \wedge \neg vi \wedge pr \wedge \neg de}_{\texttt{Sol}(\texttt{cible})}$$

si Léon suit $\texttt{Sol}(\texttt{cible})$, il proposera à Carole un repas avec de la salade, un plat avec des protéines mais pas de viande (par exemple, un plat à base de tofu) et pas de dessert.

4.2 Étude d'un exemple traité par FRAKAS

L'exemple décrit en détail dans cette section se situe dans le cadre du projet KASIMIR dont l'objet est la gestion des connaissances et l'aide à la décision en cancérologie [10][6]. Un problème correspond à la description d'un patient atteint du cancer du sein. Une solution est une thérapie. Dans cet exemple, on note $\texttt{CD}_0$, $\texttt{CD}_1$, etc., les états successifs des connaissances du domaine.

4.2.1 Spécification de l'exemple

On considère Jules, un homme atteint du cancer du sein et ayant d'autres caractéristiques que nous ne détaillerons pas ici (en particulier, le fait que la prise de décision se fait après l'opération chirurgicale qui a enlevé la tumeur et le fait que les récepteurs hormonaux sont positifs). Notons que cet exemple vient d'un cas médical réel simplifié (et avec un changement de prénom). Il correspond au problème $\texttt{cible} = \texttt{homme} \wedge \texttt{autres-carac}$. Si M_1 et M_2 sont deux ensembles d'interprétations, $\texttt{dist}(M_1, M_2)$ dénote le minimum des valeurs $\texttt{dist}(\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2)$, pour $\mathcal{I}_1 \in M_1$ et $\mathcal{I}_2 \in M_2$. Dans [16] est présenté et discuté le critère de remémoration suivant (qui suit le principe de la remémoration guidée par l'adaptabilité [22], pour l'adaptation conservatrice utilisant $\circ_{\mathrm{D}}$) : le cas source $\texttt{cas-srce}^1$ doit être préféré au cas source $\texttt{cas-srce}^2$ si $\Delta^1 < \Delta^2$, avec $\Delta^i = \texttt{dist}(\texttt{Mod}(\texttt{cas-srce}^i), \texttt{Mod}(\texttt{cible}))$ $(i \in \{1, 2\})$. On suppose qu'existe un cas source $\texttt{cas-srce} = (\texttt{srce}, \texttt{Sol}(\texttt{srce}))$ tel que $\texttt{srce} = \texttt{femme} \wedge \texttt{autres-carac}$: il correspond à une femme ayant les mêmes caractéristiques que Jules, à part son genre : ce cas source a pu être remémoré car très similaire à $\texttt{cible}$ du point de vue de $\texttt{dist}$: $\texttt{dist}(\texttt{Mod}(\texttt{CD} \wedge \texttt{cas-srce}), \texttt{Mod}(\texttt{CD} \wedge \texttt{cible})) = 1$ (la plus petite distance de Hamming non nulle) et cette distance est pertinente pour une remémoration guidée par l'adaptation conservatrice selon $\circ_{\mathrm{D}}$, ainsi que c'est montré dans [16]. La solution de ce problème est $\texttt{Sol}(\texttt{srce}) = \texttt{FEC-50} \wedge \texttt{rad-50Gy} \wedge \texttt{ovariectomie}$: le traitement correspond à une cure de FEC 50 (chimiothérapie), une radiothérapie du sein avec une dose de 50 Gy et une ovariectomie (ablation des ovaires), laquelle a un effet anti-œstrogènes et constitue de ce fait une

[5] Les connaissances culinaires présentées ici sont simplifiées et ne sauraient être considérées comme correctes, d'un point de vue culinaire.

[6] Les connaissances médicales présentées ici sont simplifiées et ne sauraient être considérées comme correctes, d'un point de vue médical.

hormonothérapie. Il existe d'autres traitements anti-œstrogènes tels que le traitement au tamoxifène et celui aux anti-aromatases. Les connaissances énoncées ci-dessus auxquelles on ajoute le fait que les hommes ne sont pas des femmes peuvent se formaliser par :

$$\begin{aligned}\mathtt{CD}_0 =&(\neg\mathtt{femme} \vee \neg\mathtt{homme}) \wedge (\mathtt{FEC\text{-}50} \Rightarrow \mathtt{chimiothérapie}) \wedge\\ &(\mathtt{rad\text{-}50Gy} \Rightarrow \mathtt{radiothérapie}) \wedge (\mathtt{ovariectomie} \Rightarrow \mathtt{anti\text{-}œstrogens}) \wedge\\ &(\mathtt{tamoxifène} \Rightarrow \mathtt{anti\text{-}œstrogens}) \wedge\\ &(\mathtt{anti\text{-}aromatases} \Rightarrow \mathtt{anti\text{-}œstrogens}) \wedge\\ &(\mathtt{anti\text{-}œstrogens} \Rightarrow \mathtt{hormonothérapie})\end{aligned}$$

De plus, nous supposons que :

$$\begin{aligned}\mathcal{V}^c_{\mathtt{sol}} =&\{\mathtt{FEC\text{-}50}, \mathtt{rad\text{-}50Gy}, \mathtt{ovariectomie}, \mathtt{tamoxifène}, \mathtt{anti\text{-}aromatases}\}\\ \mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}} =&\{\mathtt{chimiothérapie}, \mathtt{radiothérapie}, \mathtt{anti\text{-}œstrogens}, \mathtt{hormonothérapie}\}\end{aligned}$$

L'adaptation conservatrice donne

$$\begin{aligned}\mathtt{AC}_{\circ_{\mathrm{D}}}(\mathtt{CD}_0, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible}) &= (\mathtt{CD}_0 \wedge \mathtt{srce} \wedge \mathtt{Sol}(\mathtt{srce})) \circ_{\mathrm{D}} (\mathtt{CD}_0 \wedge \mathtt{cible})\\ &\equiv_{\mathtt{CD}_0} \mathtt{homme} \wedge \mathtt{autres\text{-}carac} \wedge\\ &\qquad \mathtt{FEC\text{-}50} \wedge \mathtt{rad\text{-}50Gy} \wedge \mathtt{ovariectomie}\end{aligned}$$

4.2.2 Acquisition de connaissances suite à une détection par l'expert de l'incohérence de la solution adaptée avec ses connaissances

Le résultat de l'adaptation conservatrice est alors présenté à l'expert (figure 1(a)). Celui-ci a pour charge de déterminer si elle lui semble cohérente avec ses connaissances. En l'occurrence, ce n'est pas le cas (échec du premier type) et il va cocher un ensemble de littéraux dont la conjonction est incohérente avec ses connaissances : en l'occurrence, il coche homme et ovariectomie car il sait que l'ovariectomie n'est pas réalisable sur les hommes (cf. figure 1(a)). Donc $\mathtt{Inc}_1 = \mathtt{homme} \wedge \mathtt{ovariectomie}$ est faux et on peut ajouter $\neg\mathtt{Inc}_1$ aux connaissances du domaine :

$$\mathtt{CD}_1 = \mathtt{CD}_0 \wedge \neg\mathtt{Inc}_1 \equiv \mathtt{CD}_0 \wedge (\neg\mathtt{homme} \vee \neg\mathtt{ovariectomie})$$

De plus, il est demandé à l'expert (cf. figure 1(b)) de donner une explication textuelle et il propose celle-ci :

Texte 1 : *Pour traiter les ovaires, encore faut-il qu'il y en ait, ce qui n'est pas le cas des hommes.*

La prise en compte de ce texte sera présentée plus bas.

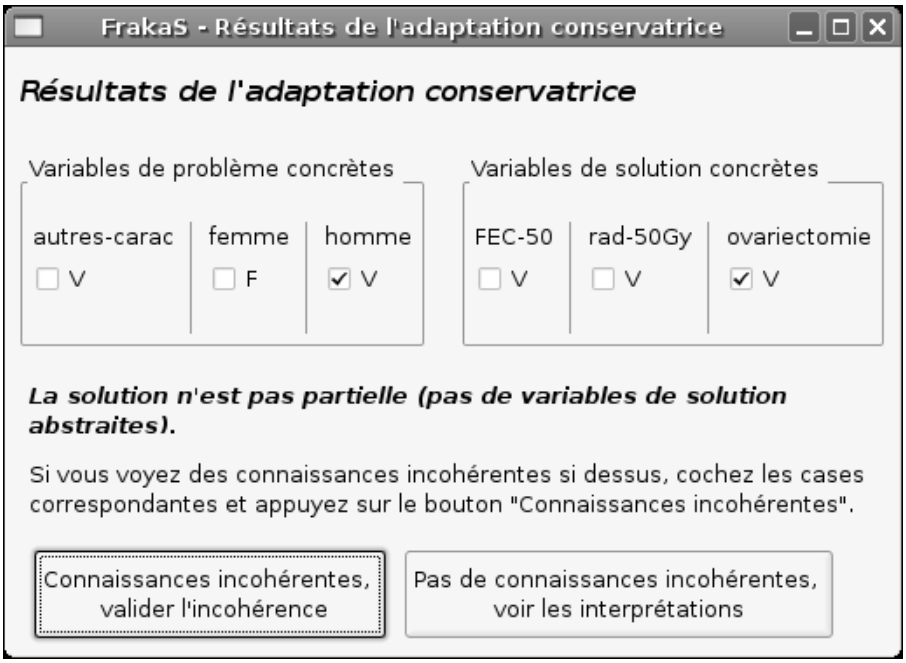
Le système va alors effectuer une nouvelle adaptation :

$$\begin{aligned}\mathtt{AC}_{\circ_{\mathrm{D}}}(\mathtt{CD}_1, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible}) \equiv_{\mathtt{CD}_1} &\mathtt{homme} \wedge \mathtt{autres\text{-}carac} \wedge \mathtt{FEC\text{-}50} \wedge \mathtt{rad\text{-}50Gy}\\ &\wedge \neg\mathtt{ovariectomie} \wedge \mathtt{anti\text{-}œstrogens}\end{aligned}$$

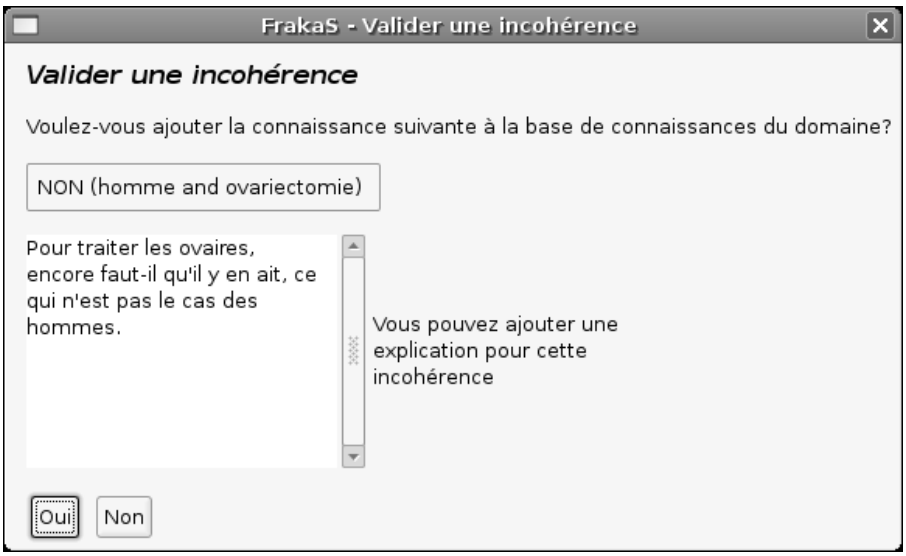
(l'adaptation conservatrice ne garde pas l'ovariectomie car elle est contradictoire avec $\mathtt{CD}_1 \wedge \mathtt{homme}$ mais conserve le traitement anti-œstrogènes).

4.2.3 Acquisition de connaissances visant à préciser une solution partielle

Le résultat de cette deuxième adaptation est alors présenté à l'expert. Celui-ci, dans un premier temps, indique que la solution est cohérente avec ses connaissances. Il n'y a donc pas d'échec du premier type mais il y en a un du deuxième type : il faudrait préciser quel type de traitement anti-œstrogènes. En effet, $\mathtt{anti\text{-}œstrogens} \in \mathcal{V}^a_{\mathtt{sol}}$ et il n'existe aucune formule f ne contenant pas la variable anti-œstrogens et qui soit équivalente à $\mathtt{AC}_{\circ_{\mathrm{D}}}(\mathtt{CD}_1, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible})$ modulo CD. Dans ce cas, l'ensemble des interprétations est présenté à l'expert qui met en évidence celles qui sont incohérentes avec ses connaissances (cf. figure 2) et,

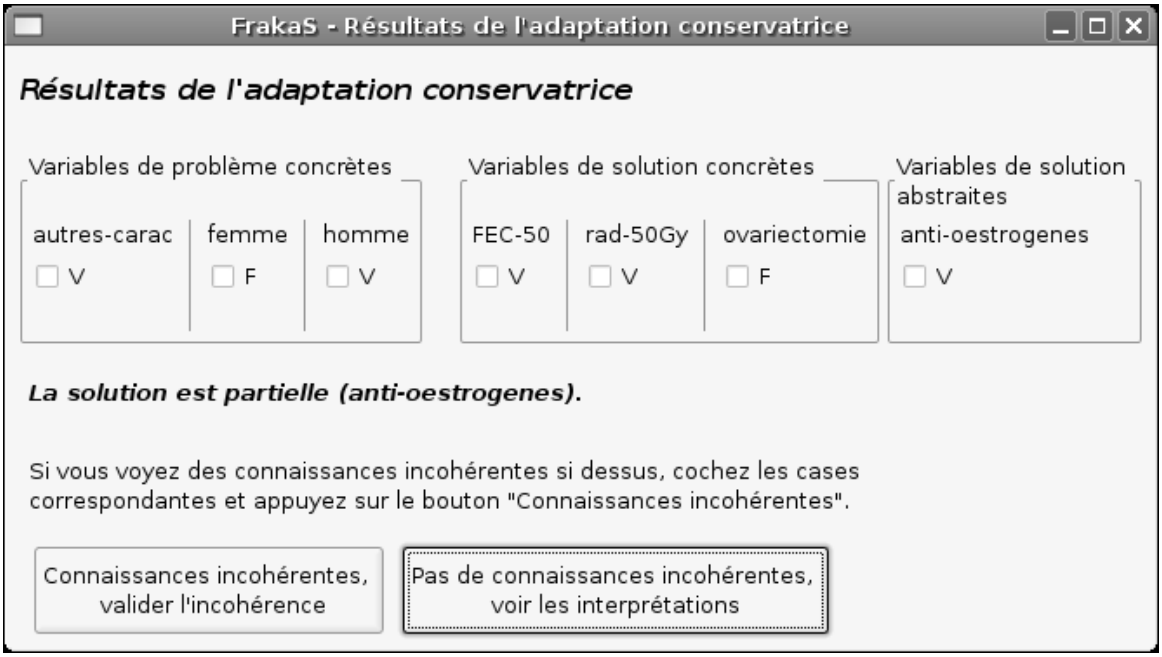


(a) Affichage de $\mathtt{AC}_{\circ_D}(\mathtt{CD}_0, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible})$.

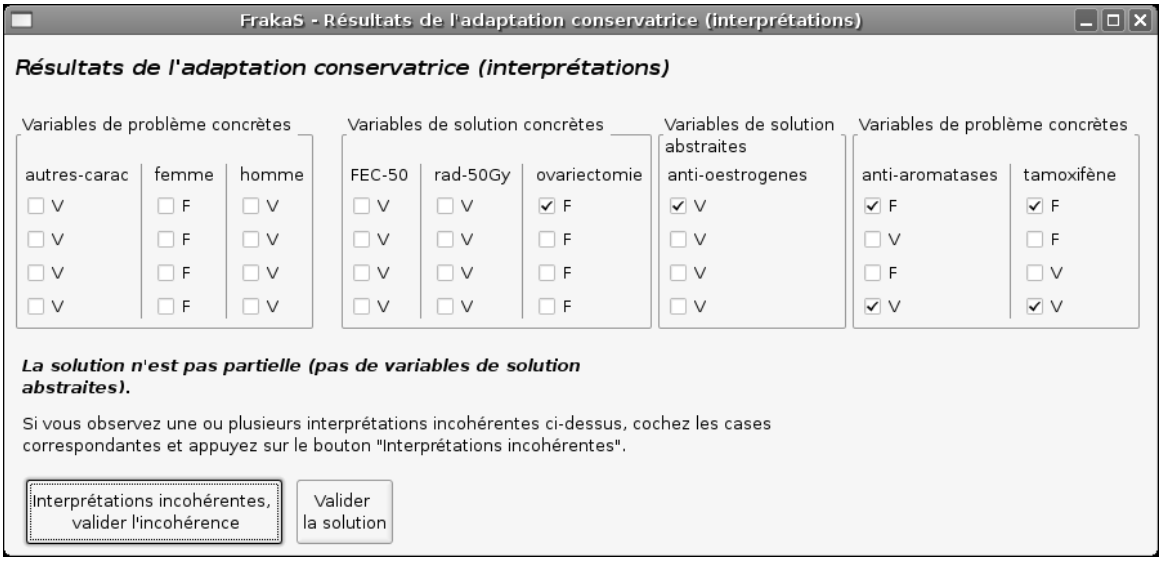


(b) L'expert valide la connaissance acquise et donne une explication.

FIG. 1 – Première solution présentée à l'expert (a) et son retour sous la forme de cases cochées (a) et d'une explication textuelle (b).



(a) Affichage de $\mathtt{AC}_{\circ_D}(\mathtt{CD}_1, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible})$ que l'expert juge cohérent avec ses connaissances.



(b) Affichage des interprétations de $\mathtt{AC}_{\circ_D}(\mathtt{CD}_1, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible})$ et retour de l'expert sur les interprétations qu'il rejette.

FIG. 2 – Deuxième solution présentée à l'expert et son retour (seule la partie avec les cases cochées est affichée ici, pas la saisie d'une explication textuelle).

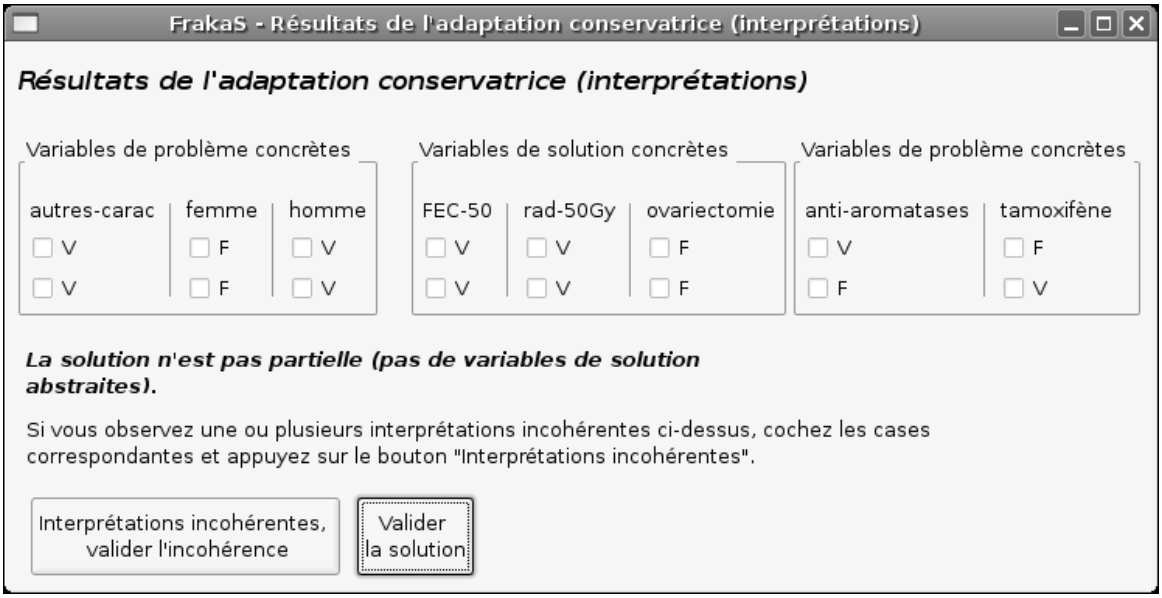


FIG. 3 – Troisième solution présentée par l'expert, qui la valide.

pour chacune d'entre elles, donne un sous-ensemble de littéraux dont la conjonction $\texttt{Inc}$ est incohérente avec ses connaissances. En l'occurrence, 2 des 4 interprétations (la 1ère et la 4ème sur la figure) sont incohérentes. La première donne :

$$\texttt{Inc}_{2.1} = \neg\texttt{ovariectomie} \wedge \neg\texttt{tamoxifène} \wedge \neg\texttt{anti-aromatases} \wedge \texttt{anti-œstrogens}$$

Et l'expert l'explique par :

> **Texte 2 :** *Les seuls moyens possibles et autorisés dans mon unité de soin pour un traitement anti-œstrogènes sont l'ovariectomie, le tamoxifène et les anti-aromatases.*

FRAKAS ajoute $\neg\texttt{Inc}_{2.1}$ aux connaissances du domaine :

$$\begin{aligned}\texttt{CD}_2 &= \texttt{CD}_1 \wedge \neg\texttt{Inc}_{2.1}\\ &\equiv \texttt{CD}_1 \wedge (\texttt{anti-œstrogens} \Rightarrow (\texttt{ovariectomie} \vee \texttt{tamoxifène}\\ &\qquad\qquad \vee \texttt{anti-aromatases}))\end{aligned}$$

L'autre interprétation incohérente avec les connaissances de l'expert donne $\texttt{Inc}_{2.2} = \texttt{tamoxifène} \wedge \texttt{anti-aromatases}$ qu'il explique par :

> **Texte 3 :** *Bah non ! On ne donne pas à un patient à la fois du tamoxifène et des anti-aromatases, voyons !*

Et $\neg\texttt{Inc}_{2.2}$ est ajouté à $\texttt{CD}_2$:

$$\texttt{CD}_3 = \texttt{CD}_2 \wedge \neg\texttt{Inc}_{2.2} \equiv \texttt{CD}_2 \wedge (\neg\texttt{tamoxifène} \vee \neg\texttt{anti-aromatases})$$

L'adaptation conservatrice donne alors (cf. figure 3) :

$$\begin{aligned}\texttt{AC}_{\circ_D}(\texttt{CD}_3, \texttt{cas-srce}, \texttt{cible}) \equiv_{\texttt{CD}_3} &\texttt{homme} \wedge \texttt{autres-carac} \wedge \texttt{FEC-50} \wedge \texttt{rad-50Gy}\\ &\wedge \neg\texttt{ovariectomie} \wedge (\texttt{tamoxifène} \oplus \texttt{anti-aromatases})\end{aligned}$$

(où $\oplus$ est le symbole du ou exclusif) qui est validé par l'expert (pas d'échec de type 1) et s'écrit sans utiliser de variables abstraites de solution (pas d'échec de type 2). Cette formule admet deux interprétations : la première recommande le tamoxifène et la seconde, des anti-aromatases.

4.2.4 Prise en compte des textes d'explications

Les trois textes donnés par l'expert peuvent servir de sources pour acquérir de nouvelles connaissances du domaine à ajouter à $\mathtt{CD}_3 = \mathtt{CD}_0 \wedge \neg\mathtt{Inc}_1 \wedge \neg\mathtt{Inc}_{2.1} \wedge \neg\mathtt{Inc}_{2.2}$. Notons que cette nouvelle acquisition des connaissances ne se fait pas au fil de l'eau, mais en-dehors de l'utilisation du système de RÀPC, lors d'opérations de maintenance des connaissances.

Prise en compte du premier texte. Dans ce texte, un ingénieur des connaissances averti peut, en dialoguant avec l'expert, établir les connaissances suivantes :

- Un homme ne possède pas d'ovaires ($f_1 = \mathtt{homme} \Rightarrow \neg\mathtt{possède\text{-}ovaires}$) ;
- Si on doit subir une ovariectomie, cela suppose qu'on possède des ovaires ($f_2 = \mathtt{ovariectomie} \Rightarrow \mathtt{possède\text{-}ovaires}$) ;
- Les femmes ayant subi une ovariectomie ne possèdent pas d'ovaires ($f_3 = \mathtt{antécédent\text{-}ovariectomie} \Rightarrow \neg\mathtt{possède\text{-}ovaires}$).

f_1 et f_2 formalisent le texte 1. f_3 est issu d'une réponse de l'expert à la question suivante posée par l'ingénieur des connaissances : « Y a-t-il des femmes qui ne possèdent pas d'ovaires ? » On a alors :

$$\mathtt{CD}_4 = \mathtt{CD}_3 \wedge f_1 \wedge f_2 \wedge f_3$$

On peut noter que $\mathtt{CD}_0 \wedge f_1 \wedge f_2 \models \mathtt{CD}_0 \wedge \mathtt{Inc}_1 = \mathtt{CD}_1$: f_1 et f_2 expliquent $\mathtt{Inc}_1$ qui doit donc être conséquence de leur conjonction. Mais la connaissance supplémentaire f_3 permettra de résoudre le problème $\mathtt{cible}' = \mathtt{femme} \wedge \mathtt{antécédent\text{-}ovariectomie} \wedge \mathtt{autres\text{-}carac}$ par adaptation du même cas source :

$$\begin{aligned}\mathtt{AC}_{\circ_{\mathrm{D}}}(\mathtt{CD}_4, \mathtt{cas\text{-}srce}, \mathtt{cible}') \equiv_{\mathtt{CD}_4} & \mathtt{femme} \wedge \mathtt{antécédent\text{-}ovariectomie} \wedge \\ & \mathtt{autres\text{-}carac} \wedge \mathtt{FEC\text{-}50} \wedge \mathtt{rad\text{-}50Gy} \wedge \\ & \neg\mathtt{ovariectomie} \wedge (\mathtt{tamoxifène} \vee \mathtt{anti\text{-}aromatases})\end{aligned}$$

Prise en compte du deuxième texte. Du deuxième texte, on peut d'abord tirer le fait que si un traitement anti-œstrogènes est proposé, alors, c'est nécessairement une ovariectomie, un traitement au tamoxifène ou aux anti-aromatases :

$$f_4 = \mathtt{anti\text{-}œstrogens} \Rightarrow (\mathtt{ovariectomie} \vee \mathtt{tamoxifène} \vee \mathtt{anti\text{-}aromatases})$$

Cependant, cela n'ajoute rien à ce qui était déjà acquis : $f_4 \equiv \neg\mathtt{Inc}$. Est-ce à dire pour autant que ce deuxième texte est inutile ? Que nenni ! Au contraire, il précise que cette connaissance f_4 (ou $\neg\mathtt{Inc}_{2.1}$) est *contextuelle* : elle est vérifiée dans le cadre de l'unité de soin de l'expert mais une discussion avec celui-ci mettra en évidence qu'il existe d'autres types de traitements anti-œstrogènes (tels que l'ovariolyse chimique). Par conséquent, il importe de prendre garde à ne pas transférer inconsidérément cette connaissance dans un autre contexte.

Prise en compte du troisième texte. Une traduction immédiate du texte 3 est $f_5 = \neg\mathtt{tamoxifène} \vee \neg\mathtt{anti\text{-}aromatases}$ mais cela n'ajoute pas de nouvelles connaissances : $f_5 \equiv \neg\mathtt{Inc}_{2.2}$.

4.3 Algorithme de FRAKAS

Entrée : un problème `cible`, une base de cas et des connaissances du domaine `CD`

début (algorithme)
  La remémoration avec le problème `cible` retourne le cas $(\mathtt{srce}, \mathtt{Sol}(\mathtt{srce}))$.
  $\mathtt{Sol}(\mathtt{cible}) \leftarrow \mathtt{Adaptation}(\mathtt{CD}, (\mathtt{srce}, \mathtt{Sol}(\mathtt{srce})), \mathtt{cible})$
  / Prise en compte des échecs du premier type */*
  tant que l'expert trouve que $\mathtt{cible} \wedge \mathtt{Sol}(\mathtt{cible})$ est incohérent avec ses connaissances
    L'expert met en évidence l'échec `Inc` et un texte explicatif.
    $\mathtt{CD} \leftarrow \mathtt{CD} \wedge \neg\mathtt{Inc}$

Le texte explicatif est stocké pour une acquisition des connaissances ultérieure.
$\texttt{Sol}(\texttt{cible}) \leftarrow \texttt{Adaptation}(\texttt{CD}, (\texttt{srce}, \texttt{Sol}(\texttt{srce})), \texttt{cible})$
fin (tant que)
/ Prise en compte des échecs du premier type */*
si $\texttt{Sol}(\texttt{cible})$ n'est pas partielle **alors** sortir
tant que l'expert trouve une inconsistence dans certaines interprétations de $\texttt{cible} \wedge \texttt{Sol}(\texttt{cible})$
pour toute interprétation inconsistente $\mathcal{I}$
L'expert met en évidence l'échec $\texttt{Inc}$ et un texte explicatif
$\texttt{CD} \leftarrow \texttt{CD} \wedge \neg\texttt{Inc}$
Le texte explicatif est stocké pour une acquisition des connaissances ultérieure.
fin (pour)
$\texttt{Sol}(\texttt{cible}) \leftarrow \texttt{Adaptation}(\texttt{CD}, (\texttt{srce}, \texttt{Sol}(\texttt{srce})), \texttt{cible})$
fin (tant que)
fin (algorithme)

5 Discussion et travaux proches

En accumulant des problèmes résolus, le RÀPC permet, en présence d'une théorie faible ou incomplète, de proposer des hypothèses de solution à de nouveaux problèmes. Néanmoins, ces solutions peuvent ne pas convenir faute de connaissances suffisantes, conduisant à un échec de raisonnement. Ainsi, de nombreux travaux se sont intéressés à la composante apprentissage dans les systèmes de RÀPC qui a été étudiée selon de multiples perspectives. Une de ces perspectives caractérise les conteneurs de connaissances ciblés pour l'apprentissage [19] : les cas, les connaissances de similarité, les connaissances d'adaptation, les connaissances du domaine. Une autre perspective caractérise la source de connaissances utilisée pour l'apprentissage [24]. Certaines approches utilisent uniquement les connaissances présentes dans les conteneurs, notamment celles qui s'appuient sur l'apprentissage automatique afin d'y expliciter des connaissances cachées [12; 7; 9]. D'autres au contraire visent à acquérir des connaissances qui ne sont pas déjà présentes dans le système par interaction avec l'environnement [5; 15].

FRAKAS relève de cette dernière catégorie. L'apprentissage se déroule pendant l'utilisation du système et vise à acquérir des connaissances du domaine. Lorsque la solution adaptée est évaluée elle peut s'avérer inapte à résoudre le problème posé : il s'agit alors d'un échec de raisonnement qui fait l'objet d'un processus d'apprentissage à partir d'échec. L'expert intervient pour identifier les parties de solution incohérentes dont la négation constitue une nouvelle connaissance qui est alors intégrée à la connaissance du domaine.

Parmi les approches apparentées, on peut citer le système CHEF [11], un planificateur de recettes de cuisine à partir de cas. Dans CHEF, un plan adapté est vérifié à l'aide d'un modèle causal, et si un échec est détecté, une explication est générée afin de rechercher les connaissances adéquates permettant de corriger l'erreur. Puis l'apprentissage permet l'anticipation ultérieure de cet échec en mémorisant le plan obtenu. Ce travail a ouvert la voie, outre à la planification à partir de cas, à toute une lignée de travaux s'appuyant sur les explications pour rechercher des causes d'échec, proposer des corrections associées de la solution du cas et modifier les connaissances ayant mené à l'échec. Le système METAAQUA [6] associe des explications à des échecs pour déterminer les stratégies d'apprentissage adéquates. CREEK [1] propose des modèles de raisonnement et d'apprentissage fondés sur les explications dans des systèmes riches en connaissances et [23] étudie exhaustivement l'importance des explications dans le processus d'apprentissage artificiel (et aussi humain). Dans FRAKAS, l'étape de révision est mise à profit pour détecter des contradictions d'une solution avec les connaissances de l'expert. L'interaction avec l'expert permet de mettre en évidence les connaissances erronées. Un parallèle peut être établi entre FRAKAS et le principe de bouclage de pertinence [21] en recherche d'information où la pertinence des informations est renforcée ou affaiblie en fonction du retour de l'utilisateur.

6 Conclusion et perspectives

Cet article présente une approche pour l'acquisition de connaissances du domaine fondée sur des échecs d'un système de RÀPC. Nous nous restreignons au cadre où un tel système donne des solutions cohérentes avec ses connaissances du domaine, comme c'est le cas en particulier s'il s'appuie sur une adaptation conservatrice. Deux types d'échec sont envisagés. Un échec du premier type est caractérisé par une contradiction de la solution inférée par le système de RÀPC avec les connaissances de l'expert (quoiqu'il soit en cohérence avec les connaissances du domaine). Une analyse de cet échec permet alors de mettre en évidence les descripteurs menant à cette contradiction et ainsi d'enrichir les connaissances du domaine. Un échec du deuxième type est caractérisé par le fait que la solution n'est que partielle : il manque des informations pour pouvoir l'utiliser. Si une analyse des instances de solution permet de mettre en évidence que certaines d'entre elles sont contradictoires, cette analyse permet d'acquérir de nouvelles connaissances. Enfin, l'explication textuelle fournie par l'expert est une source pour acquérir de nouvelles connaissances, voire pour préciser le contexte de certaines unités de connaissances. Cette approche a été implantée dans FRAKAS, un prototype qui s'appuie sur une représentation en logique propositionnelle.

Le travail présenté dans cet article en est encore à son début. Plusieurs directions de recherches sont envisagées. Dans un premier temps, FRAKAS doit être amélioré pour être utilisable en situation réelle l'exemple principal de ce papier est un scénario d'utilisation de FRAKAS que nous avons conçu en simplifiant une situation médicale réelle. En pratique, pour le projet KASIMIR, il faudrait confronter le système avec des cancérologues (assistés d'informaticiens). Cela suppose également un travail sur l'ergonomie de l'interface et une optimisation de différents points du code de FRAKAS. De plus, il serait intéressant d'étudier la possibilité d'une sélection des variables pertinentes, afin de diminuer la complexité et de faciliter le travail de l'expert. Enfin, puisque le système KASIMIR est fondé sur une logique de descriptions (voir [4]), il sera nécessaire soit d'implanter des procédures de traduction entre la logique propositionnelle et cette logique de descriptions (ces procédures sont nécessairement approximatives) soit d'implanter une nouvelle version de FRAKAS, fondée sur ce formalisme de représentation des connaissances.

Par ailleurs, il faudra étudier plus avant le cas des échecs du deuxième type. En effet si, dans notre exemple, l'interaction avec l'expert a permis de le traiter, cela ne sera pas systématiquement le cas. Si on imagine, par exemple, qu'il existe un grand nombre de traitements anti-œstrogènes, $\texttt{a}\text{œ}_1$, $\texttt{a}\text{œ}_2$, ... $\texttt{a}\text{œ}_n$, il sera fastidieux de les énumérer tous et donc d'obtenir la connaissances $\texttt{anti-œstrogens} \Rightarrow \texttt{a}\text{œ}_1 \vee \texttt{a}\text{œ}_2 \vee \ldots \vee \texttt{a}\text{œ}_n$. Il semble plus raisonnable que le système d'adaptation donne un résultat du genre « traitement anti-œstrogènes, par exemple au tamoxifène ou aux anti-aromatases ».

Enfin, une hypothèse sous-jacente dans ce travail est que les connaissances du domaine sont, à tout moment, cohérentes avec les connaissances de l'expert. Il se peut que cela ne soit pas le cas : CD peut être « approximativement vrai » (vrai dans la plupart des situations mais pas dans toutes). Dans ce cas, quand on ajoute une nouvelle connaissance f à CD, il se peut très bien que $\texttt{CD} \wedge f$ soit contradictoire. Par conséquent, il faudrait détecter une telle contradiction (ce qui n'est pas difficile). Mais on peut aller plus loin et proposer de fusionner ces deux bases de connaissances, en utilisant un opérateur de fusion (voir, par exemple [14]). En particulier, si on considère que CD peut être révisée mais que f doit être conservée, on peut utiliser un opérateur de révision, à la place de la simple conjonction : au lieu de faire $\texttt{CD}_{i+1} = \texttt{CD}_i \wedge f$, on fera $\texttt{CD}_{i+1} = \texttt{CD}_i \circ f$. Cela peut arriver si l'utilisation de FRAKAS mène d'abord à la connaissance approximative $\neg\texttt{Inc}$ puis à la formule f qui modélise l'explication textuelle donnée par l'expert. Ce point reste à étudier en détail.

Références

[1] A. Aamodt. *A Knowledge-Intensive, Integrated Approach to Problem Solving and Sustained Learning*. Doctoral dissertation, University of Trondheim, Norway, 1991.

[2] A. Aamodt et E. Plaza. Case-based Reasoning : Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *AI Communications*, 7(1) :39–59, 1994.

[3] 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.

[4] F. Baader, D. Calvanese, D. McGuinness, D. Nardi, et P. Patel-Schneider, editors. *The Description Logic Handbook*. Cambridge University Press, cambridge, UK, 2003.

[5] A. Cordier, B. Fuchs, et A. Mille. Engineering and Learning of Adaptation Knowledge in Case-Based Reasoning. In *Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management (EKAW-06)*, pages 303–317, 2006.

[6] M. T. Cox et A. Ram. Introspective multistrategy learning : On the construction of learning strategies. *Artificial Intelligence*, 112 :1–55, 1999.

[7] S. Craw, N. Wiratunga, et R. C. Rowe. Learning adaptation knowledge to improve case-based reasoning. *Artificial Intelligence*, 170(16–17) :1175–1192, 2006.

[8] M. Dalal. Investigations into a theory of knowledge base revision : Preliminary report. In *AAAI*, pages 475–479, 1988.

[9] M. d'Aquin, F. Badra, S. Lafrogne, J. Lieber, A. Napoli, et L. Szathmary. Case Base Mining for Adaptation Knowledge Acquisition. In *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)*, pages 750–755. Morgan Kaufmann, Inc., 2007.

[10] 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.

[11] K. J. Hammond. Explaining and Repairing Plans That Fail. *AI Magazine*, 45(1–2) :173–228, 1990.

[12] K. Hanney et M. T. Keane. Learning Adaptation Rules From a Case-Base. In I. Smith et B. Faltings, editors, *Advances in Case-Based Reasoning – Third European Workshop, EWCBR'96*, LNAI 1168, pages 179–192. Springer Verlag, Berlin, 1996.

[13] H. Katsuno et A. Mendelzon. Propositional knowledge base revision and minimal change. *Artificial Intelligence*, 52(3) :263–294, 1991.

[14] S. Konieczny, J. Lang, et P. Marquis. DA^2 merging operators. *Artificial Intelligence*, 157(1-2) :49–79, 2004.

[15] D. B. Leake, A. Kinley, et D. C. Wilson. Learning to Integrate Multiple Knowledge Sources for Case-Based Reasoning. In *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'97)*, pages 246–251, 1997.

[16] 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.

[17] R. Lopez De Mantaras, D. McSherry, D. Bridge, D. Leake, B. Smyth, S. Craw, B. Faltings, M. L. Maher, M. T. Cox, K. Forbus, M. Keane, A. Aamodt, et I. Watson. Retrieval, reuse, revision and retention in case-based reasoning. *Knowledge Engineering Review*, 20(3) :215–240, 2005.

[18] J. McCarthy. Epistemological Problems of Artificial Intelligence. In *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'77), Cambridge (Massachussetts)*, pages 1038–1044, 1977.

[19] M. M. Richter. The Knowledge Contained in Similarity Measures. Invited Talk of the First International Conference on Case-Based Reasoning, (ICCBR'95), 1995.

[20] C. K. Riesbeck et R. C. Schank. *Inside Case-Based Reasoning*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Hillsdale, New Jersey, 1989.

[21] J. J. Rocchio. *Document Retrieval Systems – Optimization and Evaluation*. PhD thesis, Harvard University, March 1966.

[22] B. Smyth et M. T. Keane. Experiments On Adaptation-Guided Retrieval In Case-Based Design. In M. Veloso et A. Aamodt, editors, *Case-Based Reasoning Research and Development – First International Conference, ICCBR'95, Sesimbra, Portugal*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1010, pages 313–324. Springer Verlag, Berlin, 1995.

[23] F. Sørmo, J. Cassens, et A. Aamodt. Explanation in Case-Based Reasoning –Perspectives and Goals. *Artificial Intelligence Review*, 24(2) :109–143, 2005.

[24] W. Wilke, I. Vollrath, K.-D. Althoff, et R. Bergmann. A Framework for Learning Adaptation Knowedge Based on Knowledge Light Approaches. In *Proceedings of the Fifth German Workshop on Case-Based Reasoning*, pages 235–242, 1997.