

Intégration de connaissances qualitatives dans **KATEMES**

Stéphane Lapalut

► **To cite this version:**

Stéphane Lapalut. Intégration de connaissances qualitatives dans KATEMES. RR-2554, INRIA. 1995.
inria-00074126

HAL Id: inria-00074126

<https://hal.inria.fr/inria-00074126>

Submitted on 24 May 2006

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.



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Intégration de Connaissances Qualitatives dans KATEMES

Stéphane Lapalut

N° 2554

Mai 1995

PROGRAMME 3

Intelligence artificielle,
systèmes cognitifs
et interaction homme machine



*R*apport
de recherche

1995

Intégration de Connaissances Qualitatives dans *KATEMES*

Stéphane Lapalut*

Programme 3 : Intelligence artificielle,
systèmes cognitifs et interaction homme-machine

Projet ACACIA

Rapport de recherche n°2554

Mai 1995

24 pages

Résumé : Le projet ACACIA se propose entre autres de développer KATEMES, un outil d'aide à l'acquisition de connaissances, utilisant un formalisme de graphe de connaissances. Après l'identification de la nature des connaissances qualitatives, nous proposons un modèle à quatre niveaux permettant d'exprimer ces connaissances. Nous avons distingué deux niveaux qualitatifs, l'un plus proche du niveau conceptuel, l'autre plus proche d'un niveau quantitatif contenant des expressions mathématiques. Nous présentons chaque niveau du modèle et les liens entre eux sur un exemple. Nous concluons sur la pertinence de ce modèle.

Mots-clé : connaissances qualitatives, graphes de connaissances, modélisation, topoi.

* Email : Stephane.Lapalut@sophia.inria.fr

Integrating Qualitative Knowledge in *KATEMES*

Abstract: One of the ACACIA project purposes is to develop a knowledge acquisition tool, called KATEMES, based on a knowledge graph formalism. After the point out of qualitative knowledge, we embed it into a four levels model. We distinguish two qualitative levels, one close to the conceptual level, the other close to a quantitative level which maps mathematical expressions. We describe each level and the links between them before giving an example to show the relevance of this model.

Key-words: qualitative knowledge, knowledge graphs, modeling, topoi.

Intégration de connaissances qualitatives dans *KATEMES*

Stéphane Lapalut

projet ACACIA, INRIA, BP 93, 06902 Sophia Antipolis Cedex
(Stephane.Lapalut@sophia.inria.fr)

1 Introduction

1.1 Situation

Une des approches de l'acquisition des connaissances est de permettre une traduction des connaissances d'un expert sous forme de modèle. La méthodologie CommonKADS, tenante de cette approche, nous propose une panoplie de modèles permettant de décrire une organisation dans son ensemble (modèle d'organisation et modèle de tâche) et dans le détail (modèle d'expertise, modèle d'agent et modèle de communication) [11]. Par exemple, à l'aide de ces modèles nous pouvons rendre compte de l'activité d'une équipe de concepteurs travaillant sur le même produit et devant s'organiser, coopérer pour parvenir au produit final. Pour concevoir une voiture, l'un devra s'occuper de la motorisation, l'autre de la carcasse et un troisième de l'aménagement intérieur. Ces éléments étant assemblés pour donner une voiture, il existe des contraintes d'une partie sur l'autre, que les experts doivent gérer ensemble.

Dans le modèle d'expertise, l'approche CommonKADS propose trois niveaux d'organisation de la connaissance : (1) le niveau des connaissances sur le *domaine*, (2) le niveau des *inférences*, comportant des inférences élémentaires sur le domaine que l'on peut assembler en structures d'inférence et (3) le niveau des *tâches* spécifiques, avec leurs buts et les moyens de les atteindre.

Grâce à ces modèles, nous pouvons structurer la connaissance mise en œuvre dans une organisation complexe, mais le problème de l'identification et de la modélisation des connaissances d'un expert particulier demeure. L'utilisation de graphes de connaissance a été proposée pour exprimer les connaissances au niveau domaine du modèle d'expertise et les manipuler, notamment lors de la phase d'acquisition [7]. Notre travail de recherche nous a permis d'identifier et de préciser des connaissances particulières de ce niveau, les connaissances qualitatives de l'expert et de proposer un modèle intégrant leurs expressions en langue naturelle (*topoï*), leurs expressions formelles dans les principaux formalismes de la physique qualitative et leurs expressions mathématiques.

1.2 Les topoï : définition et remarques préliminaires

En linguistique, un topos exprime une relation graduelle du type «plus ceci, plus cela». Une relation «topique» entre deux propriétés P et Q, appelées champs topiques, traduira l'influence du changement de P sur l'évolution de Q. Les champs topiques peuvent recouvrir un paramètre ou une combinaison de paramètres que l'expert aura résumée, par expérience, par un topos. Un topos peut simplement lier entre elles les évolutions de deux paramètres, ou faire appel à une théorie plus complexe du domaine, dont les principes généraux auront été résumés par des topoï [8].

Par combinaison des sens de variations, nous obtenons quatre relations. Si une propriété P influence une propriété Q, on pourra avoir :

- plus P, plus Q;
- moins P, moins Q ;
- plus P, moins Q ;
- moins P, plus Q.

Nous remarquons que si nous n'avons pas d'autres informations que la relation exprimée par un topos entre deux paramètres, nous ne pouvons rien dire sur la relation réciproque. Nous touchons là le principe de causalité, objet de débat dans la communauté de la physique qualitative [26]. Le topos est une expression particulière de la relation illative, qui est à l'origine des raisonnements de l'homme (voir l'article «raisonnement» de l'encyclopedia universalis).

Pour situer les topoï par rapport à des règles de déduction de type «si... alors...», employées dans les systèmes à base de connaissances, supposons que deux propriétés P et Q prennent respectivement leurs valeurs dans les ensembles ordonnés donnés par l'expert $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ et $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, n étant un entier naturel non nul. Nous pouvons exprimer l'influence de P sur Q à l'aide de règles de production sous la forme :

SI (P à la valeur x_1) ALORS (Q à la valeur y_1)
 SI (P à la valeur x_2) ALORS (Q à la valeur y_2)

⋮
 SI (P à la valeur x_n) ALORS (Q à la valeur y_n)

que nous écrivions plus simplement et plus généralement avec les topoï :

«plus P, plus Q» et «moins P, moins Q».

Par l'utilisation de topoï, nous perdons a priori la correspondance exacte entre les valeurs de P et Q dans le cas d'ensembles finis. Dans le cas de variations continues ou d'ensembles indénombrables, les topoï permettent une expression de la dépendance, ce que ne permet pas une règle de production.

En retrouvant cette notion de topos dans différents formalismes, nous proposons un modèle les intégrant, permettant de représenter et de lier les connaissances sous-jacentes. Dans ce rapport, nous allons précisément retrouver cette notion de to-

pos dans un formalisme de graphe de connaissance, celui du groupe P.James (section 2), puis dans les trois principaux formalismes de la physique qualitative (section 3). Nous avons en particulier mis en évidence lors de la modélisation de système en physique qualitative le recours à deux vues différentes de la notion de topos. Ceci nous a permis de préciser un modèle du domaine liant un formalisme de graphes de connaissance, les principaux formalismes de la physique qualitative et les expressions mathématiques sous-jacentes (section 4).

Nous concluons ce rapport par une perspective sur la mise en œuvre de raisonnement sur le modèle présenté et le lien explicite entre des connaissances de surface (savoir-faire de l'expert) et des connaissances profondes (théorie du domaine).

2 Un formalisme de graphe de connaissance

Ce formalisme a été développé par les membres du groupe P. James à l'université de Twente [2,13,15,16,20]. Il s'inspire des graphes conceptuels de Sowa [21] et propose principalement une sémantique réduite utilisant une algèbre de chemin et des critères d'examen de la structure du graphe pour proposer des identifications, comparaisons et regroupements de concept. Le choix d'un ensemble de relations minimales et le plus général possible a été fait.

Ces graphes permettent une procédure *automatique* de structuration de connaissances à partir de textes scientifiques ; nous ne décrivons pas cette procédure (voir [2]).

2.1 Description

Formellement, un graphe de connaissances dans une forme conceptuelle est [2,13] une paire $K=(C,R)$ avec C un ensemble de concepts et R un ensemble de relations orientées. L'ensemble T est appelé l'*univers des relations*. Les relations dans R sont notées par des triplets (c_1,r,c_2) avec $c_1,c_2 \in C$ et $r \in T$. r est appelé le *type* de la relation. Le contenu d'un concept c est l'ensemble (éventuellement vide) des concepts décrit par: $contenu(c)=\{x \mid (x,FRM,c) \in R\}$, FRM étant une relation générale, considérant c comme un *frame* si son contenu n'est pas vide (voir [15]).

Bakker constate que les matériaux d'élaboration des théories scientifiques sont les concepts. Ils font référence à des symboles et se concrétisent en objets, propriétés et valeurs (figure 1).

Les "dépendances fonctionnelles entre les propriétés de ces objets" sont considérées par Bakker comme "le corps des connaissances scientifiques". Trois relations de base sont distinguées (A et B étant des concepts):

- L'aggrégation: A PAR B , A est une propriété de B .

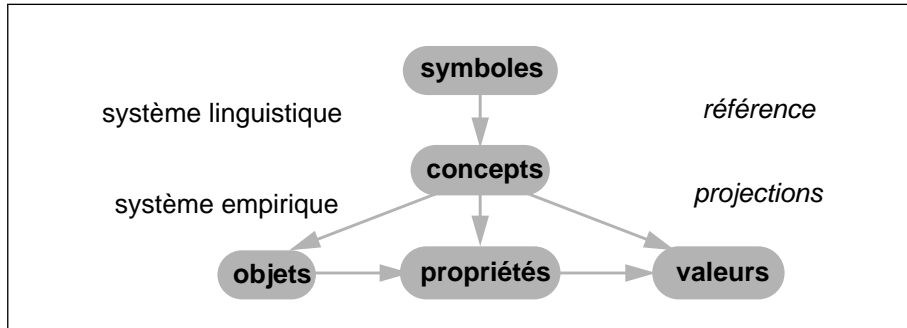


Figure 1 : Situation des concepts dans les théories scientifiques. (in [2]).

- La généralisation: $A \text{ AKO } B$, A est une sorte de B .
- La causalité: $A \text{ CAU } B$, une relation causale existe avec quatre cas:
 - $\text{CAU}++$: l'apparition ou l'augmentation de A provoque l'apparition ou l'augmentation de B .
 - $\text{CAU}+-$: l'apparition ou l'augmentation de A provoque la disparition ou la diminution de B .
 - $\text{CAU}-+$: la disparition ou la diminution de A provoque l'apparition ou l'augmentation de B .
 - $\text{CAU}--$: la disparition ou la diminution de A provoque la disparition ou la diminution de B .

Cette dernière relation élargit la notion de *topoi* [9] en considérant l'apparition (activation) et la disparition (désactivation) de concepts. Ces relations possèdent leurs inverses, respectivement HAP (a pour partie), HAK (a une sorte) et CBY (est causé par). Toutes ces relations définissent une base de départ à l'établissement d'un plus grand nombre de relations constituant une algèbre de chemins ("path algebra") comme nous le verrons (paragraphe 2.3). Une *boîte* ("framework") représente un groupe de concepts et de relations entre ces concepts possédant une cohérence interne, soit un sous-graphe fortement connexe d'un graphe de connaissance. Cette notion est rendue par la relation FPAR. Une boîte peut remplacer l'ensemble des relations FPAR arrivant sur un concept ou regrouper les propriétés attachées à un concept (figure 2).

La relation FPAR permet de rendre la notion d'abstraction. Un nœud du graphe de connaissances est soit activé, soit inactivé. Un ensemble de nœuds activés forme un sous graphe actif. Bakker définit la généralisation (resp. spécialisation) par une augmentation (resp. diminution) du niveau d'abstraction :

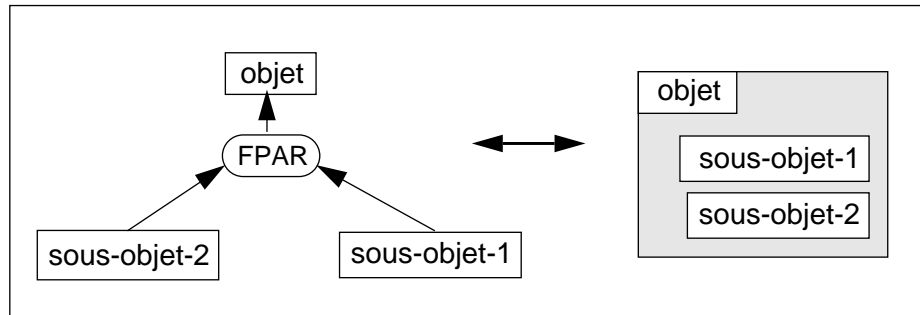


Figure 2 : Les différentes notations de la relation FPAR.

- Une augmentation (resp. une diminution) du niveau d'abstraction par une boîte f dans le graphe actif d'un graphe de connaissances $D(P,A)$, P étant l'ensemble des nœuds de concepts et A l'ensemble des arcs représentant les relations entre ces concepts, consiste en les processus suivants:
 - (a) La désactivation (resp. l'activation) de tous les nœuds $p \in P$ contenus dans f et
 - (b) L'activation (resp. la désactivation) de f seulement si f n'est pas déjà activée (resp. désactivée).

Certaines combinaisons des quatre relations ci-dessus (PAR, AKO, CAU, FPAR) provoquent des incohérences dans les graphes cycliques, par exemple par un cycle ne comportant que des relations FPAR ou PAR. Bakker restreint donc les graphes de connaissances à des graphes étiquetés acycliques orientés. Ces graphes ne comportent que des relations binaires, sauf la relation FPAR, qui oblige à la redéfinition suivante des graphes de connaissances, considérant les relations comme des nœuds dans des graphes biparties:

- Un graphe de connaissances est un graphe étiqueté acyclique orienté $D(P,A)$ avec
 - (a) P un ensemble de points représentant les concepts, les relations ou les boîtes.
 - (b) $A \subseteq P \times P$ est un ensemble d'arcs qui forment des connexions entre ces points. Un arc existe de $p_1 \in P$ à $p_2 \in P$ si:
 - (b1) p_1 représente un concept qui est à gauche d'une relation nommée p_2 .

- (b2) p_2 représente un concept qui est à droite d'une relation nommée p_1 .
- (b3) p_1 représente un élément d'une boîte et p_2 représente la relation FPAR.
- (b4) p_2 est le nom d'une boîte et p_1 représente la relation FPAR provenant de cette boîte.

2.2 Structures des graphes

Les graphes de connaissances sont utilisés par Bakker pour structurer les connaissances de documents scientifiques. La connaissance est extraite sous forme de relations entre des concepts. La tâche consiste donc principalement à analyser et à structurer ces connaissances. Cela n'est pas aisé à cause des synonymes employés par les différents auteurs pour désigner un même concept. Des différences existent selon les terminologies employées, mais aussi selon le niveau de détail des descriptions et les relations distinguées par les auteurs.

L'identification des concepts est basée sur des mesures de similitudes entre les sous-graphes. Elles tiennent compte du nombre relatif d'arcs entrant et sortant des sous-graphes considérés. L'intégration des concepts se sert de la notion de «structure». Pour définir une «structure», nous avons besoin de quelques définitions [2]:

- **Voisin-entrant et voisin-sortant:** Un voisin-entrant (resp. voisin-sortant), d'un sous-graphe $S = \langle P_S \rangle$ d'un graphe orienté $D(P, A)$ est un point $p \in P - P_S$ pour lequel il existe $p_S \in P_S$ tel que l'arc $(p, p_S) \in A$, (resp $(p_S, p) \in A$) (voir figure 3).
- **Voisin-partagé:** Un voisin-partagé entrant (resp. sortant), p d'un sous-graphe $S(P_S, A_S)$ d'un graphe orienté $D(P, A)$ est un voisin-entrant (resp. sortant), qui est connecté avec tous les points $p_S \in P_S$ par un chemin orienté π de p à p_S , (resp de p_S à p), où tous les arcs de π excepté le premier (resp. le dernier), sont des éléments de A_S .
- **Structure-entrante:** Une structure-entrante est un sous-graphe $S = \langle P_S \rangle$ d'un graphe orienté $D(P, A)$ dans lequel tous les voisins-entrants du sous graphe C sont des voisins-entrants partagés de C .
- **Structure-sortante:** Une structure-sortante est un sous-graphe $S = \langle P_S \rangle$ d'un graphe orienté $D(P, A)$ dans lequel tous les voisins-sortants du sous graphe C sont des voisins-sortants partagés de C .
- **Structure:** Une structure est un sous-graphe $S = \langle P_S \rangle$ d'un graphe $D(P, A)$ qui est

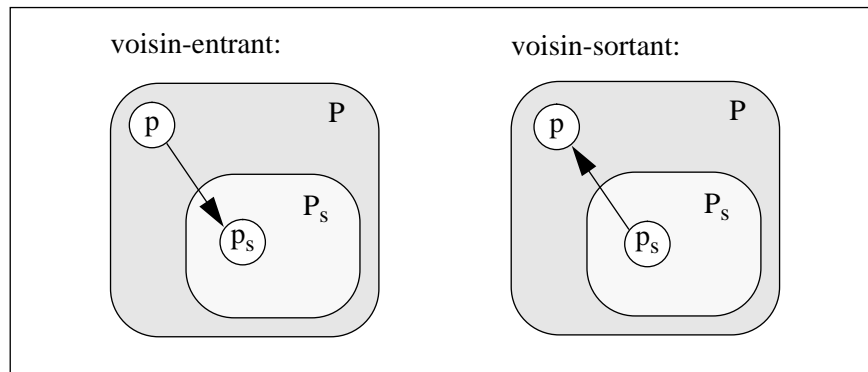


Figure 3 : Exemples de voisin-entrant et de voisin-sortant.

à la fois une structure-entrante et une structure-sortante.

Cette dernière notion sert à identifier des situations particulières dans un graphe et permet de révéler de nouveaux concepts dont la pertinence et le nom sont demandés à l'utilisateur. Toutes les structures ne recouvrent pas forcément un concept. L'exemple de la figure 4 illustre les différentes notions présentées (extrait de [2]).

Ces caractérisations de la structure d'un graphe de connaissance permettent la détection *automatique* de concepts implicites. Par l'identification de structure, on obtient un point de vue avec des concepts plus abstraits, ce qui peut permettre la détection d'incohérences ou de données manquantes par le cognitif. Ce formalisme des graphes de connaissances est intéressant par l'algèbre de chemin sur les relations qu'il propose, permettant entre autres des simplifications et des factorisations de relation. Voyons cela plus précisément.

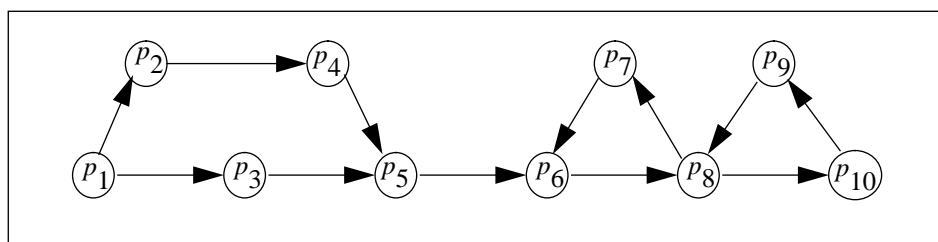


Figure 4 : Exemple d'un graphe de connaissance (voir le tableau 1 pour son interprétation).

2.3 Une algèbre de chemin

Cette algèbre fait intervenir deux opérateurs, sériel et parallèle, représentés respectivement par \otimes et \oplus (voir figure 5). Bakker impose que l'ordre des combinaisons sérielles et parallèles ne change pas le résultat, ceci pour obtenir la propriété de com-

Tableau 1 : structure du graphe de la figure 4.

Sous-Graphes	voisins-entrants	voisins-entrants partagés	voisins-sortants	voisins-sortants partagés	structure
$\langle\langle p_3 \rangle\rangle$	p_1	p_1	p_5	p_5	oui
$\langle\langle p_2, p_4 \rangle\rangle$	p_1	p_1	p_5	p_5	oui
$\langle\langle p_7, p_8, p_9 \rangle\rangle$	p_6, p_{10}	p_{10}	p_6, p_{10}	p_6	non
$\langle\langle p_6, p_7, p_8 \rangle\rangle$	p_5, p_9	p_5, p_9	p_{10}	p_{10}	oui
$\langle\langle p_3, p_5, p_6 \rangle\rangle$	p_1, p_4, p_7	p_1	p_8	p_8	non

mutativité. Cette hypothèse forte ne trouve pas immédiatement d'autre justification et semble a priori incompatible avec le principe de causalité, mis en évidence en physique qualitative. Une algèbre de chemin se définit comme suit (cf Carré cité dans [2]) :

- Une algèbre de chemin est un ensemble \mathcal{P} muni des deux opérations binaires \oplus et \otimes avec les propriétés suivantes:
- (a) L'opération \oplus est idempotente, commutative et associative.
- (b) L'opération \otimes est idempotente, commutative et associative.
- (c) L'ensemble \mathcal{P} contient un élément neutre O tel que :

- $O \oplus x = x, \forall x \in \mathcal{P}$
- $O \otimes x = x \otimes O = O, \forall x \in \mathcal{P}$.

- (d) L'ensemble \mathcal{P} contient un élément unité 1 tel que :

- $1 \otimes x = x \otimes 1 = x, \forall x \in \mathcal{P}$.

Cette algèbre de chemin définie par Bakker sur les graphes de connaissances sert lors de la phase automatique d'intégration des liens. Elle est la base, selon Bakker, du raisonnement dans ces graphes. De nouvelles relations sont nécessaires à son établissement, obtenues par combinaisons des relations déjà vues (CAU, PAR, AKO et leurs inverses). Nous donnons ici un rapide aperçu de la démarche suivie par Bakker. De plus amples développements se trouvent dans [2]. Les trois relations de départ sont idempotentes. La relation AKO est absorbée par les relations PAR et HAP :

$$\begin{aligned} A \text{ AKO } B \text{ PAR } C &\text{ donne } A \text{ PAR } C. \\ A \text{ AKO } B \text{ HAP } C &\text{ donne } A \text{ HAP } C. \end{aligned}$$

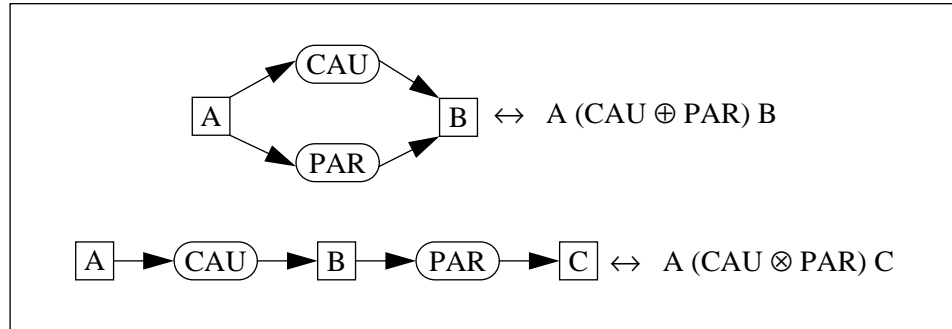


Figure 5 : Les opérateurs sériel et parallèle de l'algèbre de chemin.

La combinaison d'une relation et de son inverse donne une relation d'association notée ASS :

$$A \times B \times x^{-1} C \text{ donne } A \text{ ASS } C.$$

Elle absorbe toutes les autres relations:

$$A \text{ ASS } B \times C \text{ donne } A \text{ ASS } C, A \times B \text{ ASS } C \text{ donne } A \text{ ASS } C.$$

Avec ces sept relations (PAR, HAP, AKO, HAK, CAU, CBY, ASS) se posent des problèmes de non associativité :

$$(A \text{ CAU } B \text{ AKO } C) \text{ HAK } D \text{ donne } A \text{ CAU } B. \\ A \text{ CAU } (B \text{ AKO } C \text{ HAK } D) \text{ donne } A \text{ ASS } B.$$

Bakker émet l'hypothèse qu'un chemin tel que $A \times B \dots x^{-1} Z$ doit donner ASS Z. Pour cela il introduit les distinctions suivantes dans les relations: CAU \otimes PAR (resp. HAP) donne CAU^p (resp. CAU_p), de même pour CBY. Il distingue aussi les combinaisons de toutes les relations avec AKO et HAP de la manière suivante: x^a (resp. x_a) est le résultat de la combinaison de AKO (resp HAP) avec une des relations CAU, CBY, CAU^p, CAU_p, PAR ou HAP. Les combinaisons de x^p avec y_p et de x^a avec y_a doivent donner ASS. On obtient le tableau 2.

Autres produits:

$$y^p \otimes \text{HAP} = \text{ASS}, y^a \otimes \text{HAK} = \text{ASS}, \\ y_a \otimes \text{AKO} = \text{ASS}, x^p \otimes \text{PAR} = \text{ASS}, \text{ où}$$

Tableau 2 : les produits sériels

\otimes	ASS	CAU	CBY	PAR	HAP	AKO	HAK
ASS	ASS	ASS	ASS	ASS	ASS	ASS	ASS
CAU		CAU	ASS	CAU^p	CAU_p	CAU^a	CAU_a
CBY			CBY	CBY^p	CBY_p	CBY^a	CBY_a
PAR				PAR	ASS	PAR^a	PAR_a
HAP					HAP	HAP^a	HAP_a
AKO						AKO	ASS
HAK							HAK

$$x = CAU[{}^a, {}_a], CBY[{}^a, {}_a]$$

$$y = CAU[{}^p, {}_p], CBY[{}^p, {}_p], PAR \text{ ou } HAP.$$

Notons \mathcal{R} l'ensemble des relations:

$$\mathcal{R} = \{ ASS, CAU[{}^p, {}_p][{}^a, {}_a], CBY[{}^p, {}_p][{}^a, {}_a], PAR[{}^a, {}_a], HAP[{}^a, {}_a], AKO, HAK \}.$$

Notons \mathcal{P} l'ensemble de tous les sous-ensembles de combinaisons des relations de \mathcal{R} . L'opérateur \oplus se définit ainsi:

- L'opérateur somme $\oplus : \mathcal{P}(\mathcal{R}) \times \mathcal{P}(\mathcal{R})$ dans un graphe de connaissances est:

$$S \oplus T = S \cup T \text{ pour tous les } S, T \in \mathcal{P}(\mathcal{R}).$$

Cela donnera, par exemple pour A CAU B et A PAR B, A (CAU, PAR) B. Son introduction n'assure pas au triplet $\{\mathcal{P}, \otimes, \oplus\}$ une structure d'algèbre de chemin à cause, entre autre, de la non idempotence de l'opérateur \otimes et de la redondance d'informations dans les sous-ensembles de relations comme par exemple CAU^p dans l'ensemble (CAU, CAU^p , PAR). Bakker introduit la fonction *clean* de la manière suivante:

- La fonction *clean* de $\mathcal{P}(\mathcal{R}) \rightarrow \mathcal{P}(\mathcal{R})$ supprime les informations redondantes:

$$clean(S) = \begin{cases} (ASS) \text{ si } S = \{ASS\}, \text{ sinon} \\ S = (\{ x^p[{}^a, {}_a], x_p[{}^a, {}_a], x^a, x_a \mid x \in S \} \cup (ASS)) \end{cases}$$

Il définit \oplus^C et \otimes^C qui sont les applications de l'opérateur *clean* aux résultats obtenus par l'usage des opérateurs \oplus et \otimes . Il montre alors que le triplet $\{\mathcal{P}^C, \otimes^C, \oplus^C\}$ a la structure d'une algèbre de chemin. Une utilisation de cette algèbre de chemin est la génération de nouvelles relations par combinaisons de ces relations de base. Il serait intéressant de voir quelle sémantique attribuer à quelques-unes de ces combinaisons. Elle permet aussi la suppression de redondances dans les graphes de connaissances.

2.4 Conclusion

Bien que trop réduit à priori pour le transfert d'expertise, ce formalisme est intéressant par la cohérence qu'il donne au graphe. En raffinant les relations, en en introduisant de nouvelles, l'algèbre de chemin semble difficile à établir. En première approche, nous utiliserons dans notre modèle ce formalisme pour le niveau des concepts, intéressant par l'existence du lien CAU et de ses dérivés qui identifient la notion de topos.

3 Les connaissances qualitatives

Les efforts de quelques chercheurs dans les années 1980 ont conduit à l'émergence d'une branche nouvelle de l'intelligence artificielle, la physique qualitative. Après un aperçu sur ces recherches, nous nous intéresserons de plus près aux principaux formalismes du point de vue de l'acquisition des connaissances, soit de la nature et de la modélisation des connaissances utilisées. Nous établirons des parallèles entre chaque théorie en identifiant, en particulier, la notion de *topoi* dans les formalismes examinés.

3.1 La physique qualitative

3.1.1 Historique

P. Hayes [14] avec ses deux manifestes de la physique «naïve» a posé les bases de départ : constituer une théorie physique captant les connaissances de sens commun de l'homme sur le monde. Depuis, trois théories principales ont été établies par J. deKleer [6], K. Forbus [10] et B. Kuipers [17]. Des implémentations ont montré la validité de ces approches, notamment le programme «QSIM» de B. Kuipers, à la base de nombreuses réalisations [24,25,27].

Des théories sur des aspects particuliers comme «l'analyse aux limites» («exageration») [25], «l'analyse des liens» [23] ou encore l'analyse qualitative temporelle [27] ont été formulées et explorées.

3.1.2 Les trois théories prépondérantes.

Elles sont toutes constituées d'après le schéma modélisation/prédiction/interprétation. Les modélisations s'effectuent selon un de ces trois points de vue:

- centrée sur les *composants* (de Kleer [6]),
- centrée sur les *processus* (Forbus [10]),
- centrée sur les *contraintes* (Kuipers [17]).

La prédiction met en œuvre le modèle d'un système. Un mécanisme génère les états successifs du système selon des *règles de transition*. Des *règles de priorité* permettent d'ordonner les transitions entre chaque état suivant possible. Enfin, des *règles de terminaison* déterminent la fin de la génération.

Le temps est représenté de plusieurs manières. Dans tous les cas, un état qualitatif donné traduit un équilibre du système à un instant donné. L'évolution du système, soit le passage d'un état à un autre, s'effectue par le changement instantané de la valeur d'une des variables du système. La gestion des états possibles par l'application des règles de transition pose le problème de la validité physique de la succession des états obtenus. Si le modèle est «physiquement valide», on ne devrait, en accord avec les théories mécaniques dont on s'occupe, avoir qu'un seul état possible à chaque transition. La difficulté de prendre en considération dans le modèle toutes les variables nécessaires pour ne pas avoir d'ambiguïté fait que nous obtenons à l'issue de la génération un graphe des états du système où toutes les évolutions décrites ne sont pas physiquement réalisées. Des filtres permettent d'écarter ces états non «physiquement valides».

L'interprétation permet d'exploiter le graphe obtenu pour décrire l'évolution du système considéré. Ce genre de simulation s'utilise pour l'enseignement du fonctionnement de système complexe, comme un réacteur nucléaire. Elle permet aussi d'appréhender rapidement et sans calcul complexe l'évolution de système physique en ingénierie [27].

Nous allons nous intéresser plus en détail aux règles causales de chacune des trois approches précitées, traduisant sous diverses formes les topoï de la linguistique. Ils traduisent entre autres des dépendances causales entre des paramètres (voir [9]).

3.2 La modélisation qualitative.

Nous allons considérer les variables qualitatives et les relations entre elles dans chacune des trois approches citées.

3.2.1 L'approche basée sur les composants.

L'espace des valeurs qualitatives est constitué de trois symboles, 0 + -, qui représente le signe de la quantité considérée. Pour une variable quantitative P, on note [P] sa valeur qualitative et δP la valeur qualitative de sa dérivée, c'est-à-dire son signe.

de Kleer définit des équations de «confluence», reliant diverses variables qualitatives entre elles. Par exemple, l'équation différentielle $dx/dt-dy/dt=0$ se traduira par la confluence $\delta x-\delta y=0$. Seules les informations sur les sens de variation des variables d'une même équation subsistent. Nous pouvons aisément traduire un topos avec cette notation. Par exemple «plus x, moins y» se traduira par $\delta x=-\delta y$.

On remarque qu'une confluence découle d'une équation quantitative. On ne pourra alors établir le modèle d'un système qu'à partir de la théorie physique sous-jacente formalisant son fonctionnement.

3.2.2 La théorie qualitative des processus.

Forbus représente une variable qualitative M par un quadruplet $\{A_m(M), A_s(M), D_m(M), D_s(M)\}$ avec

- $A_m(M)$ l'ordre de grandeur de M,
- $A_s(M)$ le signe de M,
- $D_m(M)$ l'ordre de grandeur de la dérivée de M,
- $D_s(M)$ le signe de sa dérivée.

Les signes prennent valeur dans l'ensemble $\{-1, 0, +1\}$. Les relations entre ces variables sont de deux natures : des relations de proportionnalité, notées pour deux variables qualitatives Q_1 et Q_2 , $Q_1 \propto_{Q+} Q_2$ (resp. $Q_1 \propto_{Q-} Q_2$) s'il existe une fonction monotone croissante (resp. décroissante) entre Q_1 et Q_2 . L'existence d'une fonction non déterminée entre Q_1 et Q_2 se note par $Q_1 \propto Q_2$. En réduisant l'existence d'une fonction entre deux variables à une relation de proportionnalité, nous exprimons aussi une relation de type topos. Un deuxième type de relation permet de représenter les dépendances entre une variable Q et un paramètre numérique n, noté $1+(Q, n)$ (resp. $1-(Q, n)$), si la croissance du paramètre fait croître la variable (resp. décroître). Une relation indéterminée entre les deux se note $1\pm(Q, n)$.

Dans ce formalisme comme dans le précédent, on peut exprimer la notion de topoï de manière explicite. Cette notion, traduisant un lien causal précis, est le centre de la simulation qualitative, permettant le calcul de variation, donc la propagation de l'effet d'une modification de valeur de variable en variable. La troisième approche

propose un formalisme plus général, considérant non plus le concept de variable qualitative, mais celui de fonction qualitative.

3.2.3 Les contraintes de type topoï dans QSIM.

Un des buts de Kuipers était de clarifier et de formaliser une analyse mathématique qualitative [17]. de Kleer avait initié sa définition en posant les notions de continuité et de dérivabilité pour les équations de confluence. Kuipers part de système d'équations différentielles qu'il transpose en système de contraintes qualitatives. Le langage de description utilise des prédicats logiques du premier ordre.

Kuipers définit un système comme un ensemble de fonctions du temps à valeurs discrètes, appelées valeurs de transition. Les prédicats manipulent ces fonctions. En particulier, nous avons les prédicats M^+ et M^- , définis ainsi:

- M^+ (resp. M^-) est un prédicat d'arité deux, de deux fonctions f et g ,
- $M^+(f, g)$ (resp. $M^-(f, g)$) est vrai ssi il existe une fonction H dérivable de dérivée strictement positive (resp. négative), telle que $f = H \circ g$ pour les domaines considérés de f et g .

On remarque que $M^+(g, f) \Leftrightarrow M^+(f, g)$ et $M^-(f, g) \Leftrightarrow M^-(g, f)$.

Nous avons là un point de vue plus général que dans les deux formalismes précédents, celui des fonctions. On peut par exemple se ramener à la proportionnalité qualitative vue précédemment en notant les fonctions f et g par une variable qualitative résultat. Les deux prédicats M^+ et M^- sont des expressions particulières de topoï, symétriques et ne donnant aucune information causale. Les dépendances ainsi exprimées trouvent une justification explicite dans les équations de la théorie du domaine considéré, mais n'intègrent pas d'expertise spécifique, qu'un expert utiliserait par exemple pour comprendre et résoudre le fonctionnement d'un circuit électronique.

3.3 Conclusion.

Nous avons montré comment représenter des topoï dans les trois principaux formalismes de la physique qualitative. Ces théories précisent le lien entre les expressions quantitatives et qualitatives. Cela nous révèle les liens entre un niveau conceptuel, issu d'un niveau linguistique, et un niveau qualitatif que nous allons préciser et distinguer selon la connaissance sous-jacente aux topoï exprimés dans ce niveau.

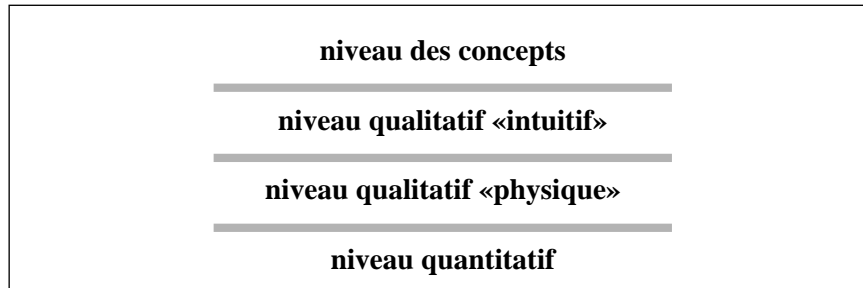


Figure 6 : Les quatre niveaux du modèle proposé.

4 Le modèle proposé.

4.1 Présentation.

Notre modèle d'intégration de connaissances qualitatives dans des graphes de connaissances se décompose en quatre niveaux (voir figure 6). Cette hiérarchie structure la connaissance et s'inspire de celle proposée par Brachman [3] tout en différenciant les connaissances qualitatives et quantitatives. Brachman préconise pour chacun des niveaux l'établissement de sa *neutralité*, caractérisant l'indépendance par rapport à ce niveau des choix au niveau supérieur, de son *adéquation*, sa capacité à expliciter le niveau au dessus de lui, et enfin de sa *sémantique*. Le respect des deux premiers points amène à expliciter les liens entre les niveaux, ce que nous allons voir après avoir précisé le contenu de chacun d'eux.

4.2 Description des niveaux.

4.2.1 Le niveau des concepts.

Ce niveau permet une première formalisation des connaissances exprimées en langue naturelle. Il utilise un formalisme de graphe de connaissance. Selon ce formalisme et le support des connaissances (interviews, textes scientifiques, exposés, etc.), le travail du cognicien sera différent. Nous avons pour l'exemple pris celui du groupe P. James. Utilisable dans le cas de texte scientifique, il minimise l'intervention du cognicien [2]. Il décrit l'agencement des concepts en utilisant des relations primitives, celles de l'algèbre de chemin décrite au paragraphe 2.3 (voir figure 7) mise en œuvre dans une procédure automatique implantée dans l'outil KISS [2].

A ce niveau, l'adéquation et la neutralité référerait à la phase de recueil de l'expertise. Nous ne pouvons aborder ces points sans sortir de l'objet de ce rapport ; nous devrions envisager la méthodologie d'acquisition elle-même, en particulier la verbalisation de la connaissance de l'expert. La sémantique de ce niveau est celle du

formalisme de graphe de connaissance utilisé, ici donnée par les relations de l'algèbre de chemin.

4.2.2 Les niveaux qualitatifs.

La distinction de deux niveaux qualitatifs est le point principal du modèle. Elle prend en considération qu'une équation qualitative comme une confluence (paragraphe 3.2.1) traduit une équation mathématique (quantitative) précisément connue par l'expert. Souvent, la connaissance explicite d'une relation entre deux variables n'est pas donnée ni nécessaire. Dans le cas d'une confluence, nous avons une approche «par le bas», du plus spécifique au plus général et dans le deuxième cas, si la connaissance de l'équation quantitative n'est pas explicite, une approche «par le haut», descendant du général au particulier. Pour permettre ces deux vues sur les relations entre des variables du système, nous avons distingué un niveau qualitatif «physique» pour la première approche, où on traduit des équations quantitatives en confluences, et un niveau qualitatif «intuitif» où le sens de variation relatif entre deux variables est exprimé. Nous allons voir dans les liens proposés entre chaque niveau l'intérêt de disposer de deux niveaux de description des connaissances qualitatives.

Dans le niveau qualitatif intuitif (voir figure 8), nous raffinons la simple relation de dépendance, le lien CAU de l'algèbre ce chemin, en distinguant trois catégories de liens selon la nature de la relation mathématique :

- **LOG**(x,y) si y varie logarithmiquement en fonction de x .
- **POL** _{n} (x,y) si y varie selon un polynôme de degré n (n entier), en fonction de x .
- **EXP**(x,y) si y varie exponentiellement en fonction de x .

Nous n'avons pas traité dans cette première approche les problèmes posés par les ensembles de définition des fonctions sous-jacentes de ces relations. En particulier, ils demandent à être précisés à l'emploi des liens LOG, et pour les liens POL dans le cas de fonctions décroissantes. Cette décroissance peut se traduire par un coefficient négatif pour le monôme prépondérant d'un polynôme, par exemple $y=-x$, ou par des exposants négatifs, par exemple $y=1/x$. Nous noterons POL^+ (resp. POL^-) une relation recouvrant un polynôme dont le monôme de plus haut degré serait positif (resp. négatif). En indice, nous noterons l'exposant de ce monôme, par exemple $\text{POL}^+ 2$.

Diverses fonctions mathématiques usuelles peuvent se caractériser qualitativement avec ces trois relations. Dans le tableau 3, nous donnons le résultat, noté $R(x,z)$, des compositions entre deux de ces relations, notées $R(x,y)$ et $R(y,z)$.

Pour les compositions ne donnant pas une des relations de départ, nous donnons la formule explicite.

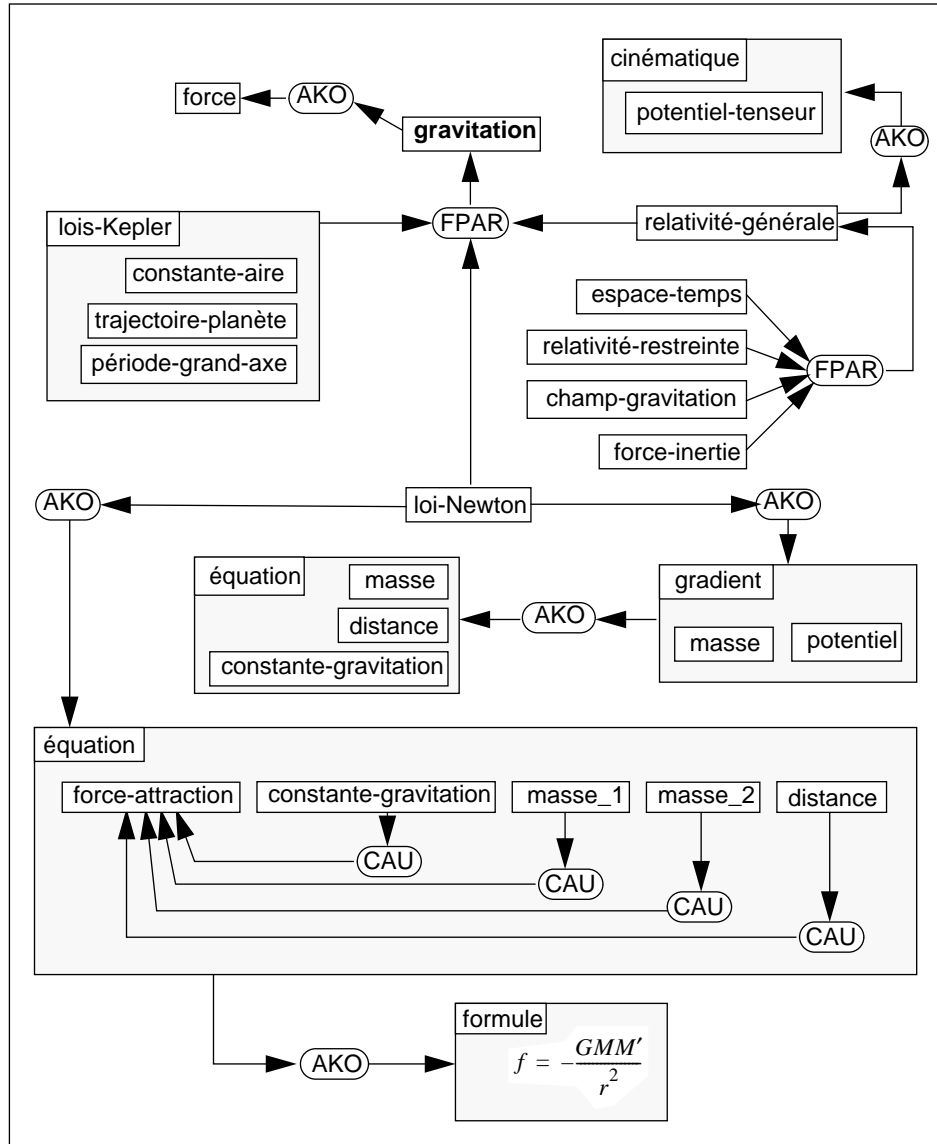


Figure 7 : Exemple d'un graphe de connaissance du concept de gravitation (source : article «gravitation» de l'Encyclopédia Universalis).

Tableau 3 : compositions des liens du niveau qualitatif intuitif.

R(x,y)	R(y,z)	EXP	POL ⁺ _m	POL ⁻ _m	LOG
EXP		EXP	EXP	POL ⁻ ₁ o EXP	POL ⁺ ₁

Tableau 3 : compositions des liens du niveau qualitatif intuitif.

$R(x,y)$	$R(y,z)$	EXP	POL^+_m	POL^-_m	LOG
POL^+_n		EXP	POL^+_{mn}	POL^-_{mn}	LOG
POL^-_n		$POL^+_{-1} \circ EXP$	POL^-_{mn}	POL^+_{mn}	$LOG \circ POL^-_n$
LOG		POL^+_1	LOG	$POL^-_m \circ LOG$	LOG

Les trois relations introduites raffinent le lien causal CAU du niveau des concepts. Nous avons par là même la neutralité et l'adéquation de ce niveau par rapport au précédent. Sa sémantique a été donnée ci-dessus par la définition de ces trois liens.

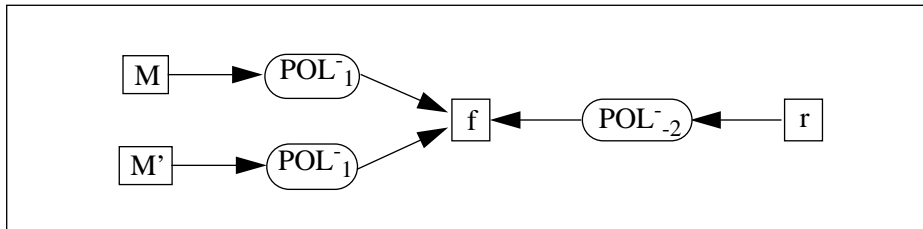


Figure 8 : Exemple de la loi de Newton (voir figure 7) exprimée au niveau qualitatif intuitif (M et M' sont les masses inertes des deux corps matériels considérés, r leurs distance et f l'intensité de la force d'attraction résultante).

Le niveau suivant, qualitatif physique, utilise les confluences de de Kleer pour préciser ces liens qualitatifs. Nous nous retrouvons alors dans le cadre de l'analyse qualitative défini par de Kleer, puis raffinée et étendue par Kuipers. Sa sémantique est fournie par l'analyse qualitative (voir [6,17]). La neutralité et l'adéquation de ce niveau par rapport au niveau qualitatif intuitif précédent demandent quelques précisions. En effet, l'établissement de ce niveau procède à partir de données mathématiques issues du niveau quantitatif, le niveau suivant dans le modèle. La distinction entre les deux sortes de connaissances qualitatives identifiées, qui nous ont menées à ce modèle, nous permettent ci-après de conclure sur sa neutralité puis sur son adéquation.

La neutralité s'obtient si les choix faits au niveau qualitatif intuitif ne contraignent pas ceux faits à ce niveau qualitatif physique. En effet, les confluences, établies à partir d'équations quantitatives, sont indépendantes des liens qualitatifs précédemment définis. Ceci respecte aussi la spécificité de ce niveau par rapport au niveau qualitatif intuitif. L'adéquation semble antagoniste avec la neutralité ainsi obtenue. La distinction faite de deux sortes de connaissances qualitatives, analogue à deux points de vue distincts sur les variables qualitatives, l'un référant à l'expérience de l'expert, l'autre à la théorie du domaine, nous fournit implicitement cette adéquation.

Elle est un des points déterminant l'intérêt de ce modèle par la mise en relation de connaissance de nature différente, relevant toutes de la notion de topoï (voir le paragraphe 3.2).

Pour l'exemple précédent, cela nous donne la confluence suivante:

$$[f][r] - [M][M'] = 0$$

4.2.3 Le niveau quantitatif.

Ce niveau explicite les équations mathématiques de la théorie concernant le domaine modélisé. Il donne leur expression exacte, procurant la possibilité de conduire des calculs si un raisonnement dans les niveaux supérieurs requiert des informations précises sur des variables, que nous ne pourrions obtenir que par ce calcul. Elles sont aussi la trace du lien entre l'expertise modélisée et un modèle physique existant. Nous avons là la possibilité d'inclure des connaissances théoriques dans le modèle.

La formule de l'exemple précédent est :

$$f = \frac{GMM'}{r^2}$$

4.3 Les liens entre les niveaux du modèle.

4.3.1 Les liens entre les niveaux des concepts et qualitatif intuitif.

Nous proposons la définition d'un type de lien, FPARq, reprenant l'idée du lien FPAR de l'algèbre de chemin. Il rattache les variables qualitatives aux concepts les définissant au niveau conceptuel (voir figure 9). Selon le degré de description du niveau conceptuel, un paramètre est attaché à un concept précis ou un ensemble de variable est attaché à un concept plus général .

4.3.2 Les liens entre les deux niveaux qualitatifs.

Entre ces deux niveaux, nous trouvons une interface entre deux points de vue différents sur les connaissances qualitatives, l'un théorique pour le niveau qualitatif physique, l'autre empirique, pour le niveau qualitatif intuitif (voir figure 10). Ils traduisent la distinction entre les connaissances profondes (niveau qualitatif physique) et les connaissances de surface (niveau qualitatif intuitif) de l'expert [5,22].

Au niveau qualitatif physique, nous retrouvons les variables du niveau qualitatif intuitif, mais organisées dans des équations de confluence. Le passage d'un niveau à l'autre traduit un changement de point de vue sur les variables du système. Du point de vue «intuitif», nous avons une organisation des variables donnée par celle des concepts au niveau conceptuel, plus proche du sens commun ; du point de vue du

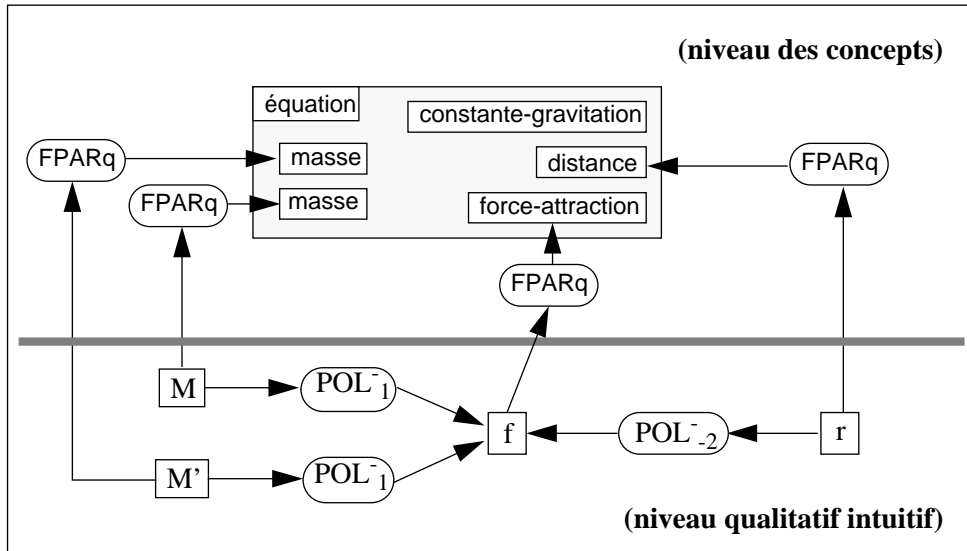


Figure 9 : Liens entre le niveau des concepts et le niveau qualitatif intuitif.

niveau physique, nous avons la version qualitative d'équations mathématiques issues de la théorie du domaine.

Une variable du niveau intuitif est reliée à son homologue du niveau physique. L'ensemble des liens entre ces deux niveaux donne l'intersection des ensembles des variables de chaque niveau. Dans le cas d'un modèle exhaustif, on retrouve les mêmes variables d'un niveau à l'autre.

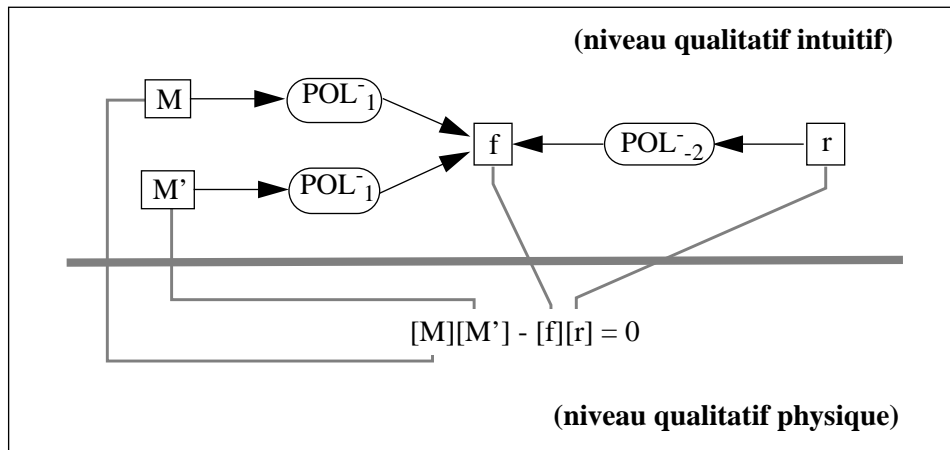


Figure 10 : Liens entre les deux niveaux qualitatifs.

4.3.3 Le niveau qualitatif physique et le niveau quantitatif.

L'analyse qualitative définie par de Kleer et Kuipers [6,17] nous fournit le passage du niveau mathématique au niveau qualitatif physique (voir figure 11). Le passage inverse ne peut se faire que par le recours aux informations du niveau qualitatif intuitif. Un ensemble de relations de ce niveau peut permettre d'identifier dans la théorie du domaine une formule mathématique, p.e. une loi, explicitant ces relations. On établit alors la confluence correspondante en identifiant les variables entre les deux niveaux qualitatifs. Ceci permet de valider et de préciser, ou d'invalider le choix de l'équation au niveau quantitatif.

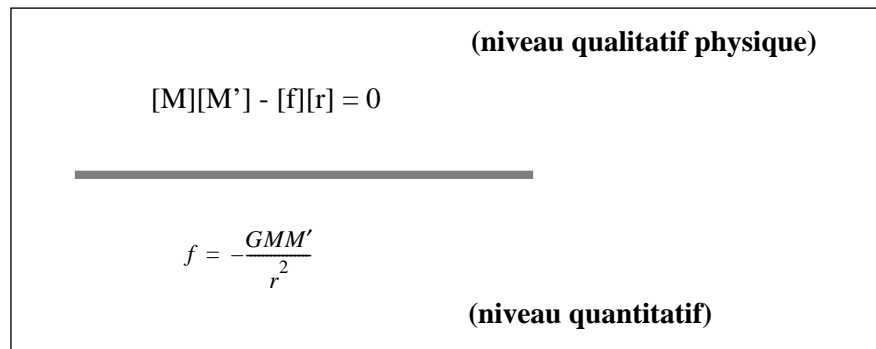


Figure 11 : Liens entre le niveau qualitatif physique et le niveau quantitatif.

5 Conclusion.

En retrouvant la notion de topoï dans un formalisme de graphe de connaissance, puis dans les trois principaux formalismes de la physique qualitative, nous avons pu proposer un modèle à quatre niveaux permettant de lier un topos avec les connaissances sous-jacentes, en particulier la théorie du domaine d'expertise considéré. Nous avons ainsi fait le lien entre des connaissances de surface exprimées sous forme de topoï et les connaissances profondes qu'elles recouvrent. En distinguant deux types de connaissances qualitatives dans les formalismes de la physique qualitative, nous avons cerné précisément un point de jonction entre l'expérience d'un expert, exprimée sous forme de topoï, et la théorie de son domaine d'expertise.

Nous nous sommes placé naturellement dans le niveau domaine du modèle d'expertise de la méthodologie CommonKADS. Nous avons aussi remarqué qu'un topos est un cas particulier de relation illative, base du raisonnement chez l'homme. Le modèle proposé décrit de la connaissance, mais ne précise pas son usage. Une telle description trouverait sa place au niveau des inférences du modèle d'expertise de CommonKADS. Elle fournirait par exemple des mécanismes élémentaires pour passer d'un niveau à un autre, selon les informations connues et la tâche en cours.

Dans le cadre de l'acquisition des connaissances, le modèle dans son état actuel permet déjà au cogniticien de préciser la connaissance empirique de l'expert à l'aide de la théorie du domaine, tout en fournissant les outils de la physique qualitative qui permettent une modélisation par étape de cette connaissance. Plutôt que de passer directement de la verbalisation de l'expertise à ses fondements théoriques, notre modèle propose une identification des *topoi*, puis leur formalisation directe en relation de proportionnalité (voir 3.2.2) en identifiant les variables qualitatives (niveau qualitatif intuitif). Parallèlement, la théorie du domaine (niveau quantitatif) permet au cogniticien l'établissement des confluences et la précision de toutes les variables qualitatives (niveau qualitatif physique). La mise en correspondance des relations qualitatives obtenues de par l'expertise et de par la théorie du domaine devient alors possible et établit la jonction des deux niveaux qualitatifs. Ceci permet aussi une forme de validation de la connaissance, en comparant les variables utilisées ou non, ainsi que les relations les liant dans chacun des deux niveaux qualitatifs. Les hypothèses et les simplifications faites par l'expert seront mises en évidence, et permettront une meilleure précision de l'expertise modélisée.

La relative simplicité des expressions qualitatives peut aussi amener l'expert à intervenir lui-même dans la construction du modèle, notamment pour le passage de la théorie du domaine au niveau qualitatif physique. Les différentes étapes du modèle peuvent s'utiliser pour identifier des connaissances de l'expert qui n'auraient pas trouvé d'expression correspondante dans le niveau qualitatif physique. Les traductions de relations du niveau qualitatif intuitif en confluences permettent d'orienter une recherche des formules correspondantes dans la théorie du domaine. Les correspondances ainsi trouvées devront être validées par l'expert. De la même manière, en faisant remonter les relations du niveau qualitatif physique au niveau qualitatif intuitif, voire au niveau linguistique (expression de *topoi*), le cogniticien peut questionner l'expert de manière plus précise.

Finalement, le modèle proposé permet au cogniticien une meilleure compréhension et un approfondissement des connaissances de l'expert. Les inférences et les raisonnements possibles sur la connaissance modélisée restent à préciser.

Bibliographie

- [1] B.J. Wielinga B. Bredeweg. *Integrating qualitative reasoning approaches*. In *ECAI '88*, Munich, Allemagne, 1988, pp. 195-201.
- [2] R.D. Bakker. *Knowledge Graphs: representation and structuring of scientific knowledge*. PhD thesis, University of Twente, 1987.
- [3] R.J. Brachman. *Associative Network*. ACADEMIC PRESS, New York, 1979.
- [4] G. Caplain. *Quelques réflexions sur la physique qualitative*. Cahier du CERMA, 10, juin 1989.
- [5] J. Charlet. *Acquisition des connaissances et raisonnement dans un système expert de seconde génération*. «9èmes Journées Internationales sur les Systèmes Experts et leurs Application», Avignon, France, Mai-Juin 1989, pp. 175-191.
- [6] J. de Kleer and J.S. Brown. *A qualitative physic based on confluences*. *Artificial Intelligence*, (24):7-83, 1984. Also in [26].
- [7] R. Dieng, O. Corby and S. Labidi. *Expertise conflicts in Knowledge Acquisition*. In *Proceedings of the Banff Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge Based Systems (KAW'94)*, Banff, Canada. January 30-February 4, 1994.
- [8] R. Dieng, O. Corby and S. Lapalut. *Acquisition and exploitation of gradual knowledge*. To appear in *Knowledge Acquisition*, 1995.
- [9] R. Dieng and B. Trousse. *3DKAT, a dependency-driven dynamic knowledge acquisition tool*. In *3th International Symposium on Knowledge Engineering*, Madrid, 1988, pp. 85-93.
- [10] K.D. Forbus. *Qualitative process theory*. *Artificial Intelligence*, (24):85-168, 1984. Also in [26].
- [11] ESPRIT Project P5248 KADS-II. *The Common KADS model set. KADS-II/M1/DM1.1b/UvA/018/5.0*, décembre 1993.
- [12] P. Fouché. *Un panorama de la physique qualitative*. In *Avignon-89*, 1989, pp. 89-106.
- [13] C. Hoede and H. Berg. *A knowledge graph of knowledge representation theory*, Technical Report 980, Faculty of Applied Mathematics, University of Twente, Enschede, The Netherlands, June 1991.
- [14] P. Hayes. *The seconde naive physics manifesto*. In *Formal Theories of the Com-*

-
- mon-Sense World, pages 1-36, J.R. Hobbs and R.C. Moore editors, Ablex, Norwood, NJ, 1985. Also in [26].
- [15] P. James. *Structuring knowledge using knowledge graphs*. In 5th EKAW, Crieff Hydro, Scotland, 1991, pp. 128-139.
- [16] P. James. *Knowledge Graphs*. Linguistique Instrument in Knowledge Engineering, R.P. van de Riet and R.A. Meersman (Eds), Elsevier Science Publishers B.V., 1992, pp. 97-117.
- [17] B.J. Kuipers. *Qualitative simulation*. Artificial intelligence, (29):289-33, 1986. Also in [26].
- [18] C.A. Kulikowski. *Artificial Intelligence, modeling and simulation*. In IMACS 88, 1988, pp. 5-15.
- [19] S. Lapalut. *Un modèle d'acquisition des connaissances qualitatives en conception pour KATEMES*. Rapport de DEA, Université de Caen, 1992.
- [20] H.J. Smit. *Consistency and Robustness of Knowledge Graphs*. PhD thesis, University of Twente, 1991.
- [21] J.F. Sowa. *Conceptual Structures, information processing in mind and machine*. Addison-Wesley System programming series, 1984.
- [22] L. Steels. *Knowledge Systems*. Draft edition published for review purpose, VUB Brussels, 1992.
- [23] J. Top and H. Akkermans. *Process as components on the primitives of a qualitative scientific physics*. In ECAI 90, Stockholm, Suede, 1990, pp. 643-648.
- [24] D.S. Weld. Comparative analysis. Artificial Intelligence, (36):333-74, 1988. Also in [26].
- [25] D.S. Weld. Exageration. In Proceedings of AAAI-88, pages 291-5, Saint-Paul, Minn, 1988. Also in [26].
- [26] D.S. Weld. *Readings in qualitative Reasoning about Physical Systems*. D.S. Weld and J. de Kleer (Eds), San Mateo, CA, Morgan Kaufmann , 1990.
- [27] B.C. Williams. *Qualitative analysis of MOS circuits*. Artificial Intelligence, 24:281-346, 1984. Also in [26].
- [28] B.C. Williams and J. de Kleer. *Qualitative reasoning about physical systems: a return to roots*. Artificial Intelligence, (24):1-9, 1991.



Unité de recherche INRIA Lorraine, technopôle de Nancy-Brabois, 615 rue du jardin botanique, BP 101, 54600 VILLERS-LÈS-NANCY
Unité de recherche INRIA Rennes, IRISA, Campus universitaire de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex
Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes, 46 avenue Félix Viallet, 38031 GRENOBLE Cedex 1
Unité de recherche INRIA Rocquencourt, domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, LE CHESNAY Cedex
Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis, 2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 SOPHIA-ANTIPOLIS Cedex

Éditeur

INRIA, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105 LE CHESNAY Cedex (France)

ISSN 0249-6399