

DEMARCHE OUTILLEE DE CONCEPTION INTEGREE UTILISANT UNE FORMALISATION DES CONNAISSANCES METIER

Alexandre Thibault*, Ali Siadat*, Patrick Marchand**, Patrick Martin*

Résumé. - L'un des volets de l'ingénierie intégrée consiste à concevoir simultanément le produit à fabriquer et son processus de fabrication associé. Dans cette approche, notre travail consiste à prendre en compte les contraintes de fabrication lors de la conception et de l'industrialisation du produit. Cette intégration ne peut devenir opérationnelle que par une formalisation et une exploitation des connaissances métier. Cet article présente une démarche pragmatique pour cette intégration dans le domaine de la forge. Elle s'appuie sur l'idée d'une définition progressive du produit tout en prenant en compte les contraintes liées au procédé. Les connaissances métier support de cette démarche sont formalisées sous la forme d'une ontologie.

Mots-clés : Intégration produit-process, ingénierie des connaissances, ontologie.

1. Introduction

Nous assistons de nos jours à une modification de la chaîne de conception-industrialisation due à plusieurs raisons parmi lesquelles : l'évolution et la mondialisation du marché, la réduction de la taille des séries et des délais de conception comme de réalisation, le fait que le coût d'un produit soit engagé à 80 % au niveau de la conception. Ainsi, les contraintes de fabrication (procédé, capacité, formes réalisables...) remontent le plus en amont possible au niveau des études pour concevoir une pièce bonne "fabricable" sans modification et le plus

* LGIPM, ENSAM Metz, 4, rue Augustin Fresnel 57078 Metz cedex 3, <http://www.metz.ensam.fr>.

** Centre technique des industries mécaniques, 52, Avenue Félix-Louat, BP 80067, 60304 SENLIS Cedex, <http://www.cetim.fr>

rapidement possible. Dans ce contexte d'ingénierie intégrée, la conception des moyens de production et du processus de fabrication (choix des procédés, des conditions opératoires, et de mise en œuvre) se conduit simultanément à celle du produit. Les fabricants, à partir des spécifications géométriques et technologiques définies par l'analyse fonctionnelle, sont amenés à concevoir la pièce en fonction de leurs compétences et de leurs ressources (outillages, systèmes de production) disponibles. Ainsi les données du cahier des charges transmises au fabricant ne sont plus constituées de la définition complète de la pièce à réaliser mais de contraintes imposées telles que l'encombrement, la série, les surfaces fonctionnelles. Il s'agit pour le fabricant de compléter la conception de la pièce en fonction des contraintes des procédés qu'il est susceptible d'utiliser au vu des moyens de production à sa disposition ainsi que du cahier des charges de la pièce imposé par l'analyse fonctionnelle.

L'objectif de notre approche est de proposer une méthode prenant en charge le déroulement de cette conception ainsi que de développer des outils informatiques d'aide à la conception supportant cette démarche. Cette méthode permet la gestion opérationnelle d'une phase importante dans le cycle de vie d'un produit : il s'agit du passage de la conception de la pièce à son industrialisation. Ce projet est mené au sein du laboratoire commun ENSAM-CETIM. Le domaine d'application considéré pour ces travaux est celui des pièces forgées, ainsi nous désignerons le fabricant par la locution « acteur forge ». Ce domaine pourra être étendu à l'avenir, de même que le couplage avec un système de gestion intégré pourra être envisagé. L'outil d'aide à la conception (appelé Ontoforge) s'appuie sur l'utilisation d'une ontologie pour permettre la représentation des connaissances de forge.

Dans un premier temps nous présenterons notre démarche de conception que nous proposons avant de décrire la façon de représenter les connaissances et de fournir une aide à la décision. Nous terminerons par une discussion abordant les critiques possibles et les points en cours de développement.

2. Démarche de conception

La démarche de conception présentée prend en charge le développement de la conception d'une pièce mécanique et de son processus de fabrication associé à partir du cahier des charges technique issu de l'analyse fonctionnelle et jusqu'à la définition complète d'un produit fabricable. Une approche possible est la « conception par coopération » (Boujut, 2002) où le concepteur et le fabricant se construisent une vue partagée du produit. Nous avons choisi de nous placer uniquement du côté du fabricant appelé « acteur forge » ou « utilisateur » qui se charge de compléter les spécifications techniques de la pièce ainsi que son processus de fabrication en s'appuyant sur les connaissances métier et les informations formalisées. Il ne

s'agit pas d'une approche générative (Kim, 2000) mais d'une démarche d'aide à la décision (Xuewen, 2005).

2.1 Principe général

Du fait des données de départ imposées (le cahier des charges technique issu de l'analyse fonctionnelle), certains procédés se trouvent impossibles à mettre en œuvre. De même, chaque choix de l'acteur forge lors de la conception du produit (sur la géométrie ou sur d'autres données telles que le matériau) va avoir une répercussion sur les procédés utilisables. Ainsi, le principe de cette méthode est :

- D'une part de répercuter les contraintes non modifiables du produit liées aux exigences fonctionnelles ainsi que les choix de l'utilisateur sur les processus, procédés et moyens de fabrication utilisables.
- D'autre part de permettre à l'utilisateur de revenir facilement sur ses choix, et ceci à plusieurs niveaux possibles, tout en ayant une indication sur l'impact de ses choix (par exemple la distance entre une contrainte imposée par l'acteur forge et la limite d'un procédé).

Grâce à cette seconde étape, la prise en compte des contraintes issues des processus, procédés et moyens de fabrication est réalisée lors de la conception de la pièce. L'utilisation du concept de gamme enveloppe (union de toutes les gammes possibles) permet de représenter les gammes possibles et d'effectuer la sélection de procédés. La figure 1 illustre la démarche souhaitée.

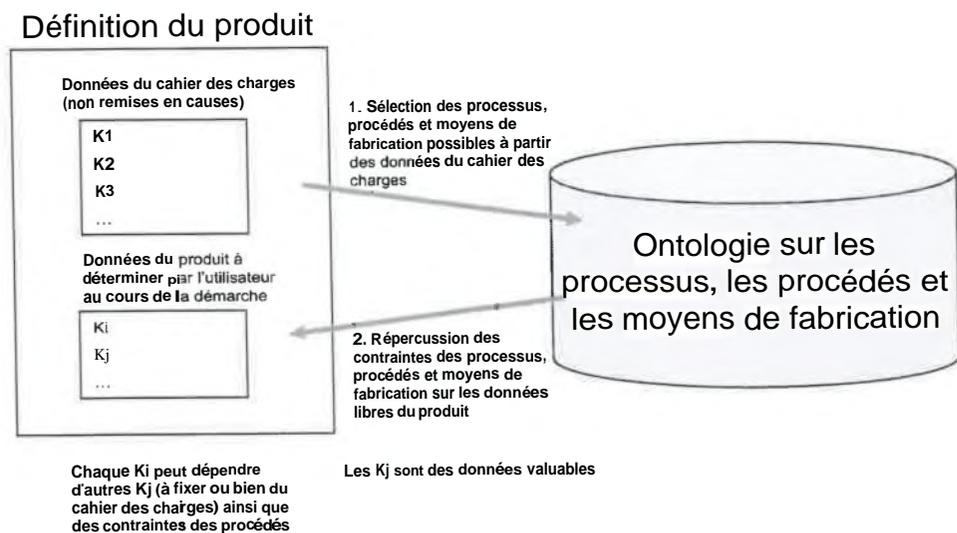


Figure 1 : Principe général.

2.2 Description détaillée de la démarche

Nous sommes donc en présence de deux ensembles de données : celles de départ, à savoir les données du cahier des charges, qui ne sont pas remises en cause, et les autres données de la pièce qui restent à définir par l'utilisateur. La démarche ne peut démarrer qu'à condition de posséder des indications (limites ou valeurs fixes) sur les données de départ qui dans notre cas d'étude (la forge) sont composées des suivantes :

- encombrement
- surfaces fonctionnelles (spécifications géométriques et qualités de surface)
- série
- taux de production
- masse
- durée de vie
- chargement appliqué

En partant de ces données, nous souhaitons déterminer la définition d'un produit fabricable c'est-à-dire : la géométrie de la pièce, le matériau et le processus de fabrication détaillé avec les ressources utilisées

Le logigramme (figure 2) décrit la méthode de manière détaillée. Voici le commentaire associé à chaque étape :

- Construire une hypothèse géométrique grossière : cette étape est réalisée par l'utilisateur, avec les connaissances de l'utilisateur, sur un outil CAO. Ne sont pas renseignées à ce niveau les informations concernant les classes de tolérances ni celles concernant les états de surface. Cette hypothèse géométrique se construit essentiellement à partir des indications sur l'encombrement, les surfaces fonctionnelles. Il s'agit d'un objet neutre (c'est-à-dire que sa modélisation importe peu, tant que l'on est capable d'en tirer les paramètres qui nous servent pour la suite).
- Première classification de type morphologique : les informations fournies sur l'hypothèse géométrique grossière sont utilisées pour effectuer une première classification : la pièce est classée dans une famille de pièce en fonction de ces caractéristiques ce qui permet de sélectionner une sous-gamme enveloppe à partir de la gamme enveloppe. Certaines possibilités sont supprimées. Les paramètres que l'on

renseigne lors de l'hypothèse géométrique grossière sont donc des paramètres dits sélectifs.

- Renseigner la géométrie fine et les caractéristiques mécaniques : l'hypothèse fine est constituée de la géométrie grossière (c'est-à-dire une ébauche de la pièce constituée d'un ensemble de volumes simples), de la géométrie fine (états de surface), et des caractéristiques mécaniques de la pièce à cœur et à peau. Ces données sont définies par l'utilisateur qui s'appuie pour cela sur ses connaissances ainsi que sur les indications telles que la durée de vie et le chargement appliqué.
- Classification 2 : les informations supplémentaires issues de l'étape précédente sont utilisées pour effectuer une seconde classification. Ces informations constituent une fois de plus des paramètres sélectifs.
- Déduction de plusieurs gammes : à partir de la sous-gamme enveloppe issue des deux classifications, il est possible de déduire plusieurs gammes possibles, ces différentes possibilités sont générées automatiquement, mais restent à compléter.
- Compléter les gammes et les paramètres (géométriques et autres) de la pièce obtenue : à l'issue de la déduction des alternatives de gamme, l'utilisateur est amené à les renseigner précisément ainsi qu'à compléter les alternatives de conception de la pièce associées. C'est ici qu'intervient la prise en compte des contraintes dues aux procédés mis en œuvre et que sont construites des alternatives pour les données de sortie que sont la géométrie de la pièce et le matériau. Cette étape est essentielle pour pouvoir évaluer les gammes en question, le module d'évaluation a besoin de données précises et concrètes.
- Evaluer les gammes construites : le module d'évaluation est en réalité une interface qui peut faire appel à plusieurs applications existantes pour calculer différents paramètres qui cette fois ne seront qu'indicatifs. Il peut s'agir d'indications concernant la tenue en service, comme le facteur de sécurité, ou bien concernant le coût, les capacités des ressources, des indicateurs tels que ceux présentés par Arenas (Arenas, 2004) ou encore d'autres informations pour lesquelles l'utilisateur éprouverait un besoin. Ces indications serviront ainsi d'aide à la décision et permettront à l'acteur forge de choisir en fonction de ses priorités et en connaissance de cause une alternative de gamme associée à une alternative de pièce.
- Choisir une gamme parmi celles construites : l'utilisateur en fonction de ses connaissances et de ses priorités choisit la gamme parmi celles construites, ce choix s'effectue à la lumière des indicateurs fournis lors de la précédente étape.

- Proposition des ressources associables à la gamme choisie : le choix des ressources est dissocié du choix de la gamme. En effet ce qui concerne les ressources ne doit pas être sélectif, puisque Ton considère que le délai ne fait pas partie du cahier des charges (ceci pour simplifier le problème). Avant cette étape, on effectue donc un raisonnement sur la gamme en considérant les disponibilités des ressources infinies. En revanche, comme indiqué précédemment, des paramètres indicatifs concernant les ressources peuvent être fournis par le module d'évaluation.
- Choisir les ressources : c'est à l'utilisateur de prendre la décision concernant le choix des ressources utilisées.

Après chaque activité remplie par Ontoforge ou par le module d'évaluation, il y a possibilité pour l'utilisateur de choisir s'il souhaite revenir sur une étape, et le cas échéant à quelle étape il désire reprendre la démarche.

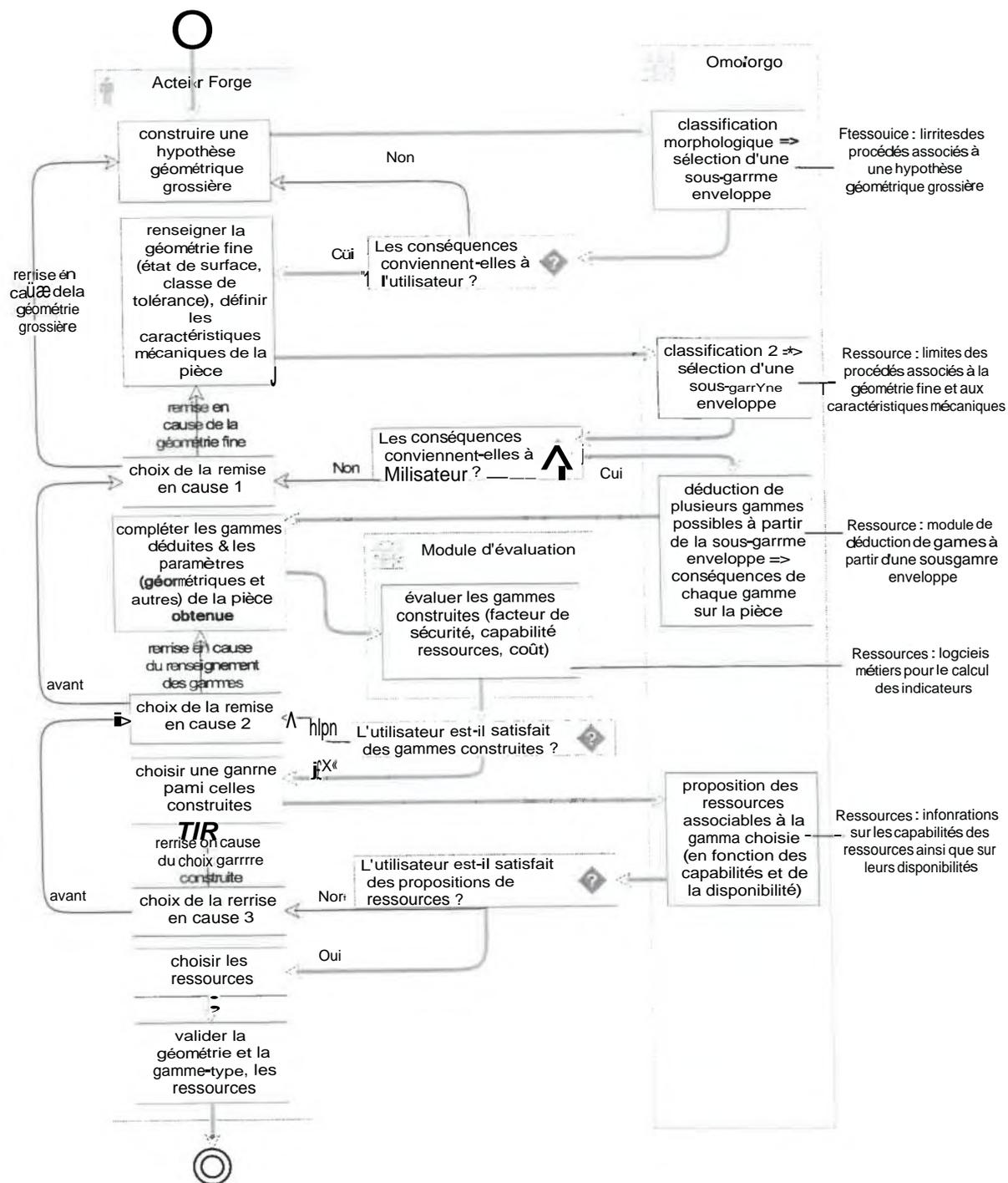


Figure 2 : Démarche détaillée.

3. Aide à la décision et représentation des connaissances

Des approches d'aide à la décision par sélection des procédés selon leur domaine de validité ont déjà été développées (Ashby, 2004 ; Lovatt, 1998 ; Ischii, 1991) cependant, tout comme Zdrahal qui propose une sélection des procédés par classification dans une ontologie (Zdrahal, 1999), la sélection se base sur une conception de pièce complètement définie. Ce que nous proposons dans notre approche est une sélection progressive, en considérant au départ une gamme enveloppe rassemblant toutes les possibilités de gamme, et une élimination progressive des branches inutilisables selon les choix de l'utilisateur et les contraintes imposées.

Le but est non pas de déterminer une unique gamme mais d'effectuer le choix du procédé le plus tard possible afin de se réserver plusieurs possibilités que Ton pourra évaluer.

Pour supporter cette aide à la décision qui doit être évolutive, nous avons choisi de représenter les connaissances nécessaires dans une ontologie et d'utiliser la classification en tant que raisonnement générique. L'évolution et la mise à jour des connaissances passent par la modification de l'ontologie.

4. Utilisation d'une ontologie et de la classification

La classification que nous utilisons et qui peut être réalisée par un raisonneur tel que Racer consiste à déduire la ou les classes auxquelles une instance appartient.

4.1 *Classification pour le choix de ressources*

Nous allons illustrer la classification en prenant l'exemple suivant : on considère une pièce ayant certaines caractéristiques géométriques, et on souhaite savoir si cette pièce est fabricable ou non par l'atelier dont on a renseigné les machines. Présentons tout d'abord l'exemple modélisé en OWL (Ontology Web Language) (Antonioni, 2004 ; Sugumaran, 2002).

Plusieurs vues sont nécessaires pour montrer une ontologie dans sa totalité : une vue taxinomique, une vue montrant les relations entre les différentes classes et enfin une vue explicitant les restrictions portées par les différents concepts. La figure 3 montre la hiérarchie taxinomique (basée sur la relation « est un ») des concepts.

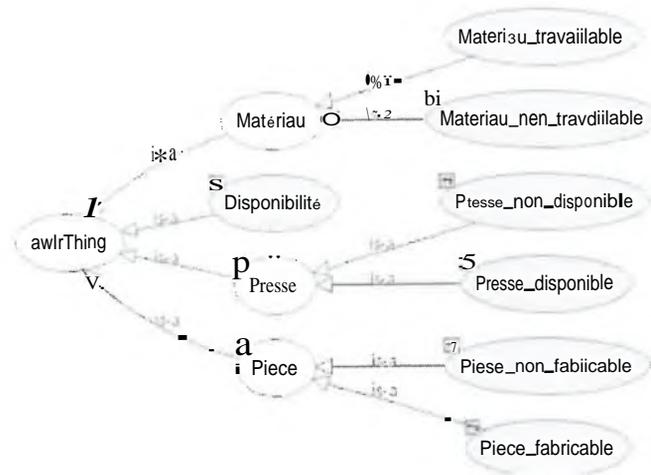


Figure 3 : Hiérarchie taxinomique.

Sur la figure 4 est présentée une autre vue de l'ontologie, explicitant les relations entre les différents concepts.

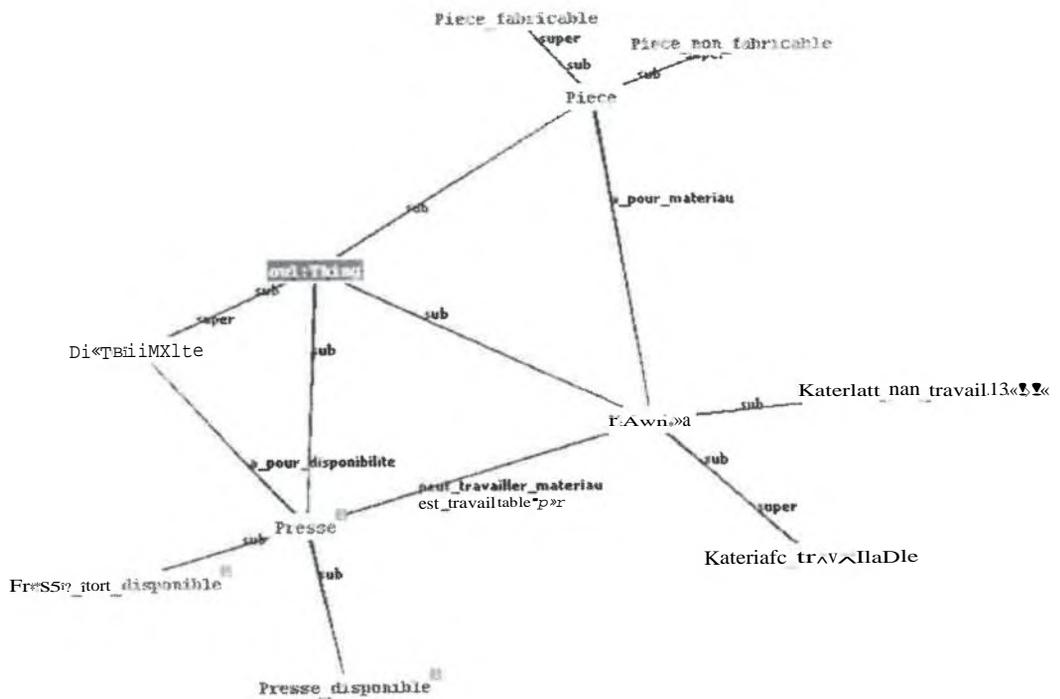


Figure 4 : Relations entre les concepts.

Après avoir défini la taxinomie ainsi que les relations entre les concepts, il est possible de déclarer des restrictions sur ces relations et de représenter ainsi les connaissances métier. Ces restrictions servent à définir des conditions nécessaires et/ou des conditions nécessaires et suffisantes pour être instance d'un concept.

Les concepts *Matériau*, *Presse* et *Piece* sont des concepts primitifs, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent que des conditions nécessaires. Les autres concepts sont des concepts définis, il existe pour ceux-ci au moins une condition nécessaire et suffisante. C'est grâce à cela que la classification est possible.

Le tableau 1 présente quelques exemples des conditions nécessaires et suffisantes pour les différents concepts définis.

1. <i>Matériau_travaillable</i>	3 <i>Matériau</i> \Leftarrow <i>est_travaillable_par_presse</i> <i>Presse_disponible</i>
2. <i>Matériau_non_travaillable</i>	3 <i>Matériau</i> \exists <i>est_travaillable_par_presse</i> <i>Presse_non_disponible</i>
3. <i>Pressejonjüisponible</i>	3 <i>Presse</i> \exists <i>a_pour_dispanibiüte</i> <i>En_pannej</i>
4. <i>Presse_disponible</i>	\square <i>Presse</i> \exists <i>a_pour_disponibilitè</i> <i>{En_service}</i>
5. <i>Piece_non_fabricable</i>	3 <i>Piece</i> \Leftarrow <i>a_pour_materiau</i> <i>Matériau_non_travaillable</i>
6. <i>Piece_fabricable</i>	\square <i>Piece</i> \exists <i>a_pour_materiau</i> <i>Matériau</i> J <i>ravaillable</i>

Tableau 1 : Conditions nécessaires et suffisantes des concepts définis.

\square *Presse* : signifie qu'une instance de la classe *Presse-disponible* doit être aussi une instance de la classe *Presse*.

\exists *ajpour-disponibilitè {En-service}* : signifie que si une instance de la classe *Presse-disponible* possède une relation *a_pour-disponibilité*, alors cette dernière est forcément associée à l'instance "*En-service*".

Il est nécessaire de préciser que les propriétés *ajpour-disponibilité* et *ajpourjnateriau* sont dites "fonctionnelles" c'est-à-dire qu'elles n'admettent qu'une unique valeur (une unique instance de la classe *Disponibilité*, de la classe *Matériau*). A l'inverse, la propriété *est_travaillable_par* ainsi que son inverse ne le sont pas, elles acceptent une liste d'instances (en effet, une presse peut travailler plusieurs matériaux, un matériau peut être travaillé par plusieurs presses). Pour la conception d'une ontologie, et son application à la classification, il est préférable d'utiliser des propriétés fonctionnelles. En effet, dans le cas où une propriété non

fonctionnelle intervient dans une restriction de type « quelque soit » pour la condition nécessaire et suffisante d'une classe, aucune instance ne sera jamais classifiée dans cette dernière. Ceci est dû à l'hypothèse du monde ouvert (on suppose que ce qui n'est pas déclaré est potentiellement vrai). Voici une illustration qui met en évidence cette subtilité dont il faut être conscient :

Supposons que nous définissions la classe *Materiau_non_travaillable* : ce sont les instances de la classe *Matériau* pour lesquelles toutes les relations du type *est_travaillable_par_presse* pointent sur des instances de la classe *Presse_non_disponible*. Or cette propriété n'étant pas fonctionnelle, on ne sait pas combien de relations de ce type sont présentes. Ainsi dans le cadre de l'hypothèse du monde ouvert, on ne peut affirmer que toutes les relations de cette instance sont conformes à la restriction. Du coup on ne peut classifier des instances dans cette classe (il n'y aurait pas de problème dans le cas d'une propriété fonctionnelle ou bien dans le cas d'une restriction de type « il existe » : par exemple pour qu'une instance soit classifiée dans la classe *Materiau_travaillable*, il suffit qu'elle possède une relation avec une instance de la classe *Presse_disponible*).

La figure 5 présente un exemple de cette subtilité : l'instance "Acier" ne possède qu'une relation avec "Presse2" qui *ajjour-disponibilité* "En-panne". La relation entre Acier et Presse n'est pas déclarée mais selon l'hypothèse du monde ouvert, elle peut exister, ainsi on ne peut pas conclure qu'Acier est une instance de la classe *Materiau_non_travaillable* définie précédemment. MaPiecet *a_pour_materiau* Acier, on ne peut donc non plus statuer sur son type.

En revanche, la classe *Materiau_travaillable* définie à l'aide d'une restriction de type « il existe » est tout à fait fonctionnelle : les instances Cuivre et Alu possèdent au moins une relation avec une presse disponible, elles sont donc classifiées dans la classe *Materiau_travaillable*.

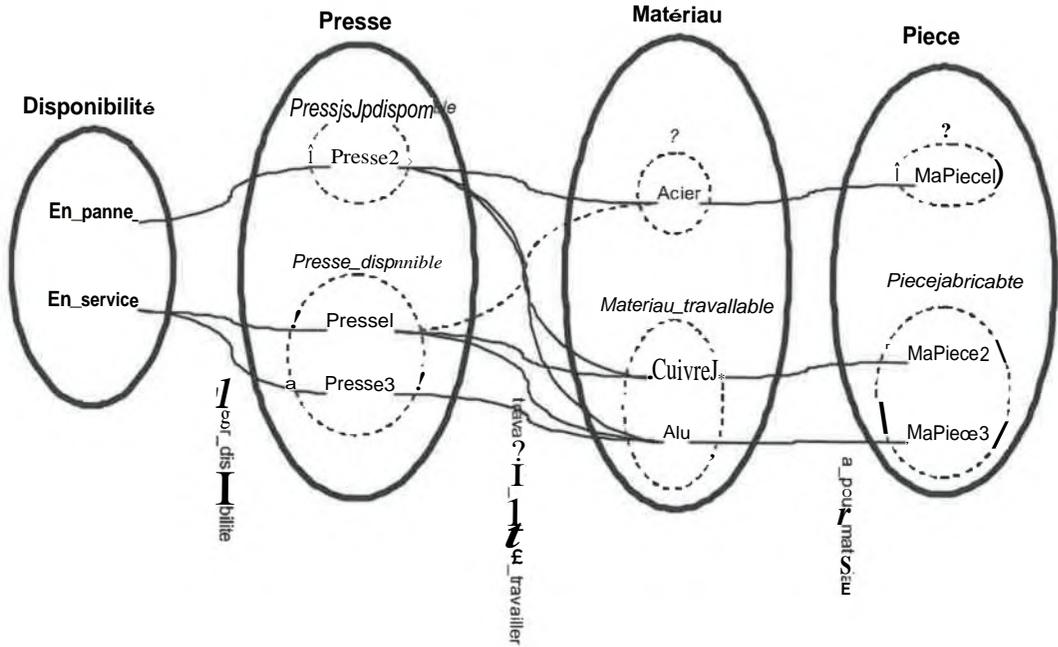


Figure 5 : Illustration de la classification.

4.2 Classification pour le choix des procédés

Sur le même principe que précédemment, on classe tout d'abord les pièces dans des familles de pièce en fonction de leurs caractéristiques (sur la figure 6 nous ne considérons que le paramètre dépouille pour simplifier la représentation). Une seconde classification est ensuite opérée qui permet de classifier les instances d'opération dans des classes définies signifiant l'impossibilité de réaliser la pièce selon certains procédés. C'est ainsi que l'on élimine des branches de la gamme enveloppe.

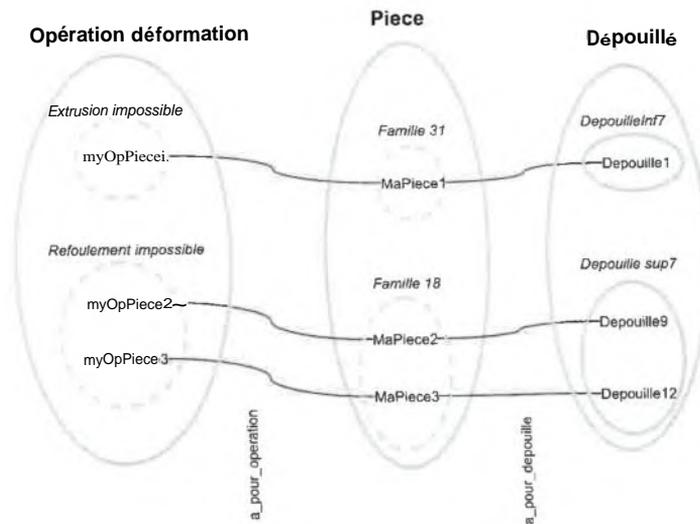


Figure 6 : Illustration de la classification sur les gammes enveloppe.

5. Discussions

5.1 Sur la démarche de conception

Contrairement aux approches existantes, nous commençons notre méthode sur une définition minimale de la pièce afin de conduire simultanément la conception détaillée et l'industrialisation. L'objectif est de se réserver le plus d'alternatives possibles que l'on évalue avant de prendre une décision. Ainsi contrairement à une approche telle que celle de Zdrahal, on ne cherche pas à déterminer une unique solution possible au fur et à mesure des classifications.

Deux problèmes peuvent survenir : soit l'ensemble des alternatives est trop large et leur évaluation est coûteuse en temps, soit l'ensemble des alternatives est vide du fait des contraintes trop lourdes imposées par le cahier des charges de départ ou l'acteur forge. Le fait de pouvoir revenir sur n'importe quelle étape de la démarche est un moyen de résolution possible de ces difficultés. Une autre possibilité serait également de pouvoir remettre en cause les connaissances formalisées dans l'ontologie, ce qui n'est pas encore pris en compte dans notre démarche.

5.2 Sur l'utilisation d'une ontologie

L'information que l'on retire du traitement présenté au point 4 est le résultat d'une classification. L'obtention de ce résultat serait également possible par une démarche algorithmique. L'intérêt d'une ontologie réside dans le fait qu'elle vérifie la cohérence des

connaissances et permet l'évolution de celles-ci. Modifier un algorithme suppose qu'il faut toucher au code, recompiler, mettre à jour. La modification d'une ontologie en revanche est beaucoup plus simple et la classification est effectuée par un raisonneur générique. Si de nouveaux paramètres sont à prendre en compte pour une vérification sur la pièce, ou si de nouvelles vérifications sont nécessaires, il suffit d'ajouter les structures adéquates dans l'ontologie. Ainsi, la conception intégrée qui met en œuvre des connaissances qui évoluent inévitablement avec le progrès des technologies, pourra être assurée de manière continue. Nous avons ainsi séparé la formalisation des connaissances de leur traitement.

Peu de projets similaires ont été menés jusqu'à présent dans un domaine d'ingénierie, on peut citer le projet Kasimir (D'Aquin, 2004), ou encore les projets présentés par Davies et Fensel (Davies, 2003 ; Fensel, 2004). Ainsi on ne connaît pas encore exactement le comportement, les performances d'une approche telle que la nôtre dans une situation réelle. Le développement d'un *plug-in* de l'éditeur d'ontologie Protégé a été entamé avec pour but de prendre en charge facilement les étapes de classification. Au cours du développement, plusieurs points bloquants ont pu être mis en évidence, notamment celui de l'utilisation des littéraux.

Il est en effet jusqu'à présent impossible de faire intervenir des littéraux dans les restrictions. Cependant ce problème peut être contourné en créant des classes d'intervalles.

D'autre part, il est possible d'exprimer également des connaissances sous formes de règles à l'aide du langage SWRL (*Semantic Web Rule Language*) (Horrocks, 2005) intégré au langage OWL mais il n'existe pas encore de raisonneur prenant en charge ce langage.

6. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté une démarche de conception répondant aux besoins de la conception intégrée, c'est-à-dire permettant de concevoir dans le même temps la pièce ainsi que son processus de fabrication associé en forge. Cette méthode ne peut être opérationnelle qu'en s'appuyant sur les informations et les connaissances métier. Un outil associé à cette méthode permettra de la mettre en œuvre et de faire évoluer facilement les connaissances (dans le cas d'ajout ou de modification des connaissances de forge). Un *plug-in* de l'éditeur d'ontologie Protégé est actuellement en cours de développement. Cet outil proposera une aide à « l'acteur forge » en automatisant les tâches de traitement telles que la classification, et en permettant d'éditer et de faire évoluer les connaissances sur lesquelles sont basés ces traitements.

7. Bibliographie

Antoniou G. et F. Van Harmelen. *A Semantic Web Primer*, The MIT Press, ISBN 0-262-01210-3, 2004.

- Arenas J.M., M.A. Sebastian and C. Gonzales. Parametric classification based on technico-economic approaches to optimize the design and manufacturing of hot forged parts. *Journal of Materials Processing Technology*, vol 150, pages 223-233, 2004.
- Ashby M.F., Y.J.M. Bréchet, D. Cebon et L. Salvoc. Selection strategies for materials and processes. *Materials and Design*, vol 25, pages 51-67, 2004.
- Boujut J-F et P. Laureillard. A co-operation framework for product-process integration in engineering design. *Design Studies*, vol 23, pages 497-513, 2002.
- D'Aquin M., S. Brachais, J. Lieber et A. Napoli. KASIMIR: Gestion de connaissances décisionnelles en cancérologie. *Proceedings de 2ème colloque du groupe de travail C2EI*, décembre 2004.
- Davies J., D. Fensel et F. Van Harmelen. *Towards the semantic web*, John Wiley & sons, ltd, ISBN 0-470-84867-7, 2003.
- Fensel D. *Ontologies: a silver bullet for knowledge management and electronic commerce*, Springer-Verlag, ISBN 3-540-00302-9, 2004.
- Horrocks I., P.F. Patel-Schneider, S. Bechhofer et D. Tsarkov. OWL rules: A proposal and prototype implementation. *Journal of web semantics*, vol 3, pages 23-40, 2005.
- Ishii K., S. Krizan, C.H. Lee et R.A. Miller. HyperQ/Process - An Expert System for Manufacturing Process Selection. *Proceedings of the 6th Int Conf on AI applications in Engineering*, pages 405-422, Oxford, 1991.
- Kim D.Y. et J.J. Park. Development of an expert system for the process design of axisymmetric hot steel forging. *Journal of Materials Processing Technology*, vol 101, pages 223-230, 2000.
- Lovatt A.M. et H.R. Shercliff. Manufacturing process selection in engineering design. *Material and Design*, vol 19, pp 205-230, 1998
- Sugumaran V. et V.C. Storey. Ontologies for conceptual modelling: their creation, use, and management. *Data & Knowledge Engineering*, vol 42, pages 251-271, 2002.
- Xuewen C., Z. Siyu, C. Jun et R. Xueyu. Research of knowledge-based hammer forging design support system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 27, pages 25-32, 2005.
- Zdrahal Z., M. Valasek et J. Cermak. Selecting Manufacturing Technology: A Knowledge Modelling Approach. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol 26, pages 405-422, 1999.