

VERS L'UTILISATION DES ONTOLOGIES POUR FORMALISER LA SEMANTIQUE DES DONNEES DE FABRICATION

Laurent Deshayes, Jean-François Rigal*

Résumé. - Aujourd'hui, avec la globalisation des marchés et des partenariats, la qualité de l'échange d'informations est devenue un enjeu majeur. Durant la dernière décennie de nouveaux langages de programmation comme XML ont produit de meilleurs outils dans l'échange et le partage de données. Néanmoins, ce sont les gens qui fournissent toujours la compréhension nécessaire pour déterminer le sens ou la signification de l'information lorsqu'elle implique un fort savoir-faire ce qui est le cas pour les procédés de fabrication. Ceci entraîne donc des interprétations sémantiques attachées à la culture individuelle de chacun. De telles difficultés d'interprétation font que de nos jours peu d'informations concernant les procédés de fabrication sont échangés le long du cycle de vie du produit. Cependant, il est indéniable que la prise en compte au plus tôt, dans les étapes de conception, des contraintes de fabrication peut considérablement réduire les coûts associés à la mise en production. L'interopérabilité entre systèmes en utilisant des modèles précis de la sémantique des informations échangées est donc le challenge de ces prochaines années. Ce papier présente les outils expérimentés au cours du projet 2IUF (Ingénierie d'Interaction pour l'Usine du Futur) - récemment financé par la région Rhône Alpes - pour étudier l'intégration des modèles d'information statiques et dynamiques. Le cas particulier des procédés d'usinage a été traité le long de ce projet. Néanmoins, ces méthodes peuvent être employées pour d'autres processus industriels. Le papier présente également les tendances scientifiques dans ces domaines pour les prochaines années.

Mots-clés : Usinage, STEP, ontologies, PLM, interopérabilité

* Laboratoire LaMCoS, INSA de Lyon, Bât Joseph Jacquard, 69621 Villeurbanne Cedex - France,

1. Introduction

Dans la fabrication mécanique, et en particulier pour l'usinage par enlèvement de matière, un objectif industriel essentiel est la détermination des paramètres de coupe optimaux avec un minimum d'essais et l'utilisation de méthodologies bien définies afin de respecter les normes de qualité. Des méthodes bien définies sont aussi utiles pour une meilleure gestion du cycle de vie du produit puisqu'ils facilitent l'intégration des étapes de production dans les étapes de conception. Comme montré par (Tichkiewitch, 1992 et 2004) cette intégration est la base d'une meilleure simulation des processus pour réduire les dépenses de mise en production d'un produit. Dans ce contexte, le projet 2IUF (Ingénierie d'Interaction pour l'Usine du Futur) - financé par la région Rhône-Alpes - a permis de conduire des recherches pour l'intégration des procédés d'usinage dans le cycle du vie du produit, tant d'un point de vue mécanicien que de celui du génie industriel. Ce papier donne une vue d'ensemble de cette recherche, de ses résultats et discute des tendances futures.

Au cours des travaux de recherche engagés dans ce projet, il a été démontré que les paramètres de coupe, tels que la profondeur de coupe, l'avance ou la vitesse de coupe, sont la source d'excitation du système d'usinage (2IUF livrables, 2003). Ils influencent directement l'état de la surface produite par l'outil et contrôlent par conséquent, pour une bonne part, les coûts d'usinage. L'optimisation d'une gamme d'usinage est un processus itératif. Il est alors intéressant d'opter pour des paramètres optimaux aussitôt que possible. Cet objectif ambitieux peut être atteint seulement en considérant dès que possible dans le cycle de vie de produit, les contraintes venant de la fabrication. Pour cela, les experts de disciplines diverses, et à fort savoir-faire, internes ou externes à la société, doivent communiquer et échanger leurs connaissances.

Jusqu'à nos jours, le niveau d'échange le plus développé concerne les données du produit avec la norme STEP (Échange des données du produit pendant son cycle de vie) (ISO 10303, 1994). Cette norme, dont l'objectif est de permettre le développement de nouveaux protocoles d'application, sur la base des ressources intégrées et en appliquant les méthodes de description et de mise en œuvre de STEP, doit permettre à long terme de représenter les données du produit depuis sa conception, jusqu'à sa réalisation et son recyclage. Bien que quelques travaux aient été réalisés pour développer des modèles STEP pour les procédés de fabrication (Deshayes et al, 2003) (Wolff et al, 2001) (ISO 14649-10, 2003), il doit être reconnu que cette approche est à présent limitée à modéliser l'information concernant la structure de produit qui est assez bien définie comme la géométrie, les dimensions et les tolérances (ISO 10303-203, 1994) (ISO 10303-214, 2001) (ISO 10303-224, 2001). Pour ce type d'information, les risques de non-sens sont relativement limités. Ce n'est pas le cas pour les informations décrivant les domaines à hauts degrés de savoir-faire. Dans ce cas, il est souvent très compliqué de représenter un schéma consensuel des données qui n'engendre pas de non-sens au moment de l'utilisation de ces mêmes données. Le cas de l'usinage s'inscrit dans un tel contexte (Deshayes et al, 2001). Et pour rester

compétitives, les sociétés ont besoin de représenter leur connaissance en utilisant des outils différents de ceux utilisés ces dernières décennies (Tichkiewitch, 1992). Pour la représentation d'un outil coupant par exemple, certains experts ne verront que la plaquette présente en bout d'outil. D'autres décriront cet outil comme une partie active constituée seulement de deux arêtes et d'un tranchant. Cette difficulté est aujourd'hui plus présente avec à la globalisation des marchés. Une société n'a plus désormais à traiter avec des partenaires locaux, mais aussi avec un savoir-faire mondial. Les risques d'ambiguïtés sont d'autant plus élevés.

Les ontologies permettent de capturer à la fois la sémantique et la syntaxe de l'information. Le but de l'ingénierie d'ontologies est de rendre explicite, pour un domaine donné, la connaissance contenue dans les logiciels techniques et d'affaire ou encore dans les procédures des sociétés (Uschold et al, 1996). Bien qu'il y ait une large variété d'approches pour la conception d'ontologies, toutes ces approches reconnaissent qu'il y a deux composants essentiels à toute ontologie : 1) un vocabulaire de termes qui se réfèrent aux objets du domaine considéré ; 2) quelques spécifications concernant la signification de ces termes, formulées sous une forme logique. Ce qui distingue les différentes approches est le degré et la façon de spécifier les relations nécessaires entre les termes. Les ontologies sont généralement représentées en employant une large variété de langages logiques lisibles et compréhensibles à la fois par les gens et les machines. La logique propositionnelle (LP) est largement utilisée pour modéliser les ontologies, mais LP manque d'expressivité pour modéliser avec concision un environnement comportant un grand nombre d'objets et de faits (Russel et Norvig, 2003). La Logique du Premier Ordre (LPO) a beaucoup plus d'expressivité et permet de modéliser davantage de relations complexes entre les objets. Le langage d'ontologie pour le WEB (OWL, *Ontology WEB Language*) (OWL, 2004) est largement utilisé ces dernières années par la communauté du WEB sémantique afin de formaliser la sémantique de l'information de manière à ce qu'elle soit compatible avec le monde Internet (« Worl Wide Web »). En comparaison de la LPO, ce langage est plus léger et basé sur un modèle taxonomique construit à l'aide d'XML. Néanmoins les travaux récents au sein du W3C (OWL, 2004) tentent à incorporer la LPO aux outils du web sémantique tel que OWL.

Dans ce contexte, la section suivante présente l'objectif des recherches du projet 2IUF ainsi que le domaine d'étude considéré. Les méthodologies générales de description des données et de leur sémantique sont présentées dans la section 3. La section 4 discute les résultats de cette approche et finalement l'article se termine par quelques remarques et conclusions.

2. Domaine d'étude du projet 2IUF

Le projet 2IUF a permis d'appliquer les techniques de l'ingénierie collaborative pour la définition d'un modèle d'information commun à un ensemble de logiciels du domaine de l'usinage. En particulier la modélisation a porté sur les procédés d'usinage par enlèvement de matière. Une étape essentielle avant toute modélisation de système est de décrire son

environnement de travail, les acteurs et les actions du système avec ces acteurs. Cette section présente les outils et méthodes utilisées pour réaliser ces étapes préliminaires et cruciales.

2.1 *Environnement de travail pour l'optimisation de procédés d'usinage*

D'un point de vue générique, abordé dans cet article, un procédé d'usinage peut être considéré comme un processus, c'est-à-dire un système transformant des entrées en sorties par l'intermédiaire de mécanismes et de contrôles. Pour le processus d'usinage par outil coupant les éléments et les ressources du système usinant, à la base de l'échange entre les différents agents du système, et considérés dans cette étude sont :

- L'entité primaire d'usinage. Elle correspond à la géométrie de l'opération élémentaire à réaliser pour obtenir une surface usinée.
- Les éléments d'outillage. Ils concernent les différents éléments constituant l'outil (géométrie, matériaux, composants...).
- Le matériau constituant du produit.
- La machine sur laquelle est réalisé l'usinage.
- Les paramètres du Couple Outil Matière (COM). Un COM (NF E 66-520-1, 1997) fournit les expérimentales, sur l'interaction d'un matériau d'outil avec un matériau usiné, pour la sélection des paramètres de coupe à programmer sur la machine-outil et qui correspondent.

L'application implémentée dans le projet 2IUF s'est centrée sur l'échange des informations et des terminologies permettant le choix des paramètres d'un COM. En effet, ce choix doit s'effectuer en prenant en compte une interaction très forte entre le COM et le système de la machine-outil, appelé système Pièce Outil Machine (POM). De plus, la définition de ces paramètres est intimement liée aux concepts de la gamme d'usinage qui complexifie la compréhension des terminologies par le non-initié et a fortiori par les programmes informatiques. Il est donc important de considérer également ces définitions pour faciliter l'intégration entre applications des modèles de données et de connaissances intervenant durant le cycle de vie en fabrication du produit. Les concepts de la gamme d'usinage, du COM et du POM utilisés ici sont détaillés dans (Deshayes, 2003).

Les modèles d'information du système commun de gestion des données de coupe sont réalisés sur la base des échanges effectués entre les experts considérés sur la figure 1 et sur des normes nationales et internationales. Trois experts sont considérés : un expert CFAO représentant une application de Conception et de Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO), un expert de coupe pour un logiciel de calcul des paramètres de coupe et des conditions d'usinage et enfin un expert procédé pour l'opérateur ou le directeur de commande numérique devant mettre en oeuvre le procédé d'usinage modélisé par l'expert CFAO et optimisé sur la base des échanges avec l'expert de coupe. Les flèches représentent l'échange des données entre

ces différents agents. A cela s'ajoute un système collaboratif de gestion de données techniques (El Beqqali et al, 2002) pour permettre la communication et le stockage des informations liées aux processus (ou procédés d'usinage). Dans ce travail, ce système commun est nommé Système Commun d'Usinage (SCU) dans le reste du travail. Dans ce scénario, l'expert de coupe informe le système commun des paramètres de coupe à adopter. Il analyse aussi l'information donnée par le système commun pour améliorer ou adapter la connaissance sur l'usinage et la maintenir à jour. L'expert de CFAO choisit alors les paramètres de coupe optimisés qui seront insérés dans le programme de la machine-outil afin de réaliser une entité d'usinage. Par ailleurs, il fournit au système commun l'ensemble des données de fabrication nécessaires à l'expert procédé. Ce dernier réalise sur la machine-outil, l'entité d'usinage dont les exigences ont été fournies par l'expert de CFAO. Dans de nombreux cas, lors de la mise en oeuvre, des mises au point sont nécessaires et les paramètres de coupe doivent être ajustés «en temps réel» ou en réalisant une série d'essais prototypes, tels que des essais basés sur le COM. Ainsi, pour modifier les paramètres de coupe, l'opérateur doit interroger le système commun pour trouver l'expertise adéquate émanant de la base de connaissances commune (SCU) ou d'un expert tel que l'expert de coupe.

Dans ce travail de recherche, seuls les échanges relatifs aux flèches épaisses noires ont été étudiés en détail, i.e. l'échange entre un expert de CFAO et un expert de coupe. Les diagrammes de cas et de séquences d'UML (« Unified Modelling Language » (Booch et al, 1998) ont été utilisés pour décrire respectivement les actions du SCU et les interactions de ces deux experts avec le SCU. Ces méthodologies d'analyses ont été choisies car elles se sont avérées les plus pertinentes et pouvant être applicables aux autres éléments du système. Précisons enfin que seulement les échanges de données technologiques de coupe ont été considérées et non la gestion des données économiques ou organisationnelles de la coupe telle que réalisée par certains auteurs (Ben Younes, 1994).

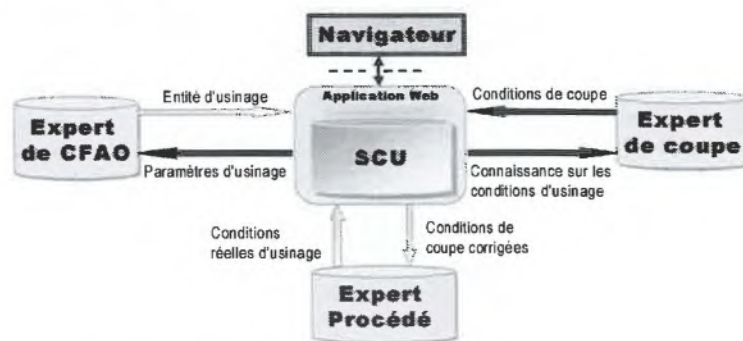


Figure 1 : Domaine d'étude du projet 2IUF

2.2 Diagramme de cas du SCU

Le diagramme de cas d'utilisation est un diagramme d'UML très utile pour représenter l'ensemble des actions réalisées par un système. Les actions représentées sur ce diagramme doivent produire un résultat intéressant pour un acteur donné. Ainsi, d'une part, le diagramme de cas représente les services rendus par le système et, d'autre part, il exprime les interactions entre les acteurs et le système qui apportent une valeur ajoutée à un des acteurs concernés. Ces interactions, non exhaustives, sont données dans le tableau 1 et ont été représentées sur le diagramme de cas d'utilisation, cf. figure 2. Bien que cette étude se centre principalement sur l'échange de l'expert de CFAO et de l'expert de coupe avec le SCU, l'expert procédé est représenté ici pour conserver à l'esprit l'aspect métier et opérationnel de l'application. Seules les fonctions principales du système sont représentées et non ses détails, car les interactions plus précises peuvent varier fortement en fonction du procédé implémenté (tel que le fraisage, le perçage, centre d'usinage à grande vitesse...). Ce niveau de détail peut néanmoins être modélisé en raffinant ce diagramme de cas.

Expert de CFAO	Utiliser la connaissance stockée sur une entité d'usinage. Sélectionner les paramètres de coupe optimaux d'un COM. Transmettre un programme de commande numérique.
Expert procédé	Utiliser un programme de commande numérique. Sélectionner des paramètres de coupe. Rechercher des paramètres de coupe corrigés. Obtenir des recommandations d'usinage. Capitaliser les conditions d'usinage et les paramètres de coupe (associés à une entité d'usinage).
Expert de coupe	Proposer des paramètres de coupe optimaux. Proposer des paramètres correctifs. Proposer des recommandations.

Tableau 1 : Liste des actions des experts avec le SCU

2.3 Diagramme de séquences pour la sélection des paramètres de coupe

Le diagramme de séquences présenté en UML sur la figure 3 représente le scénario nominal « Sélectionner les paramètres de coupe optimaux d'un COM » faisant l'objet de notre étude et utilisé par l'expert CFAO. Ce diagramme de séquences donne une description dynamique du cas d'utilisation. Il est également possible d'utiliser un diagramme d'activité pour montrer une telle dynamique. Mais un tel diagramme présente l'ensemble des activités, leurs connexions, leurs enchaînements et les boucles possibles. Nous ne considérons pas ici ce niveau

de détail qui ne ferait qu'alourdir la présentation du problème. Un ordre possible des actions du scénario « Sélectionner les paramètres optimaux d'un COM » est présenté dans le tableau 2.

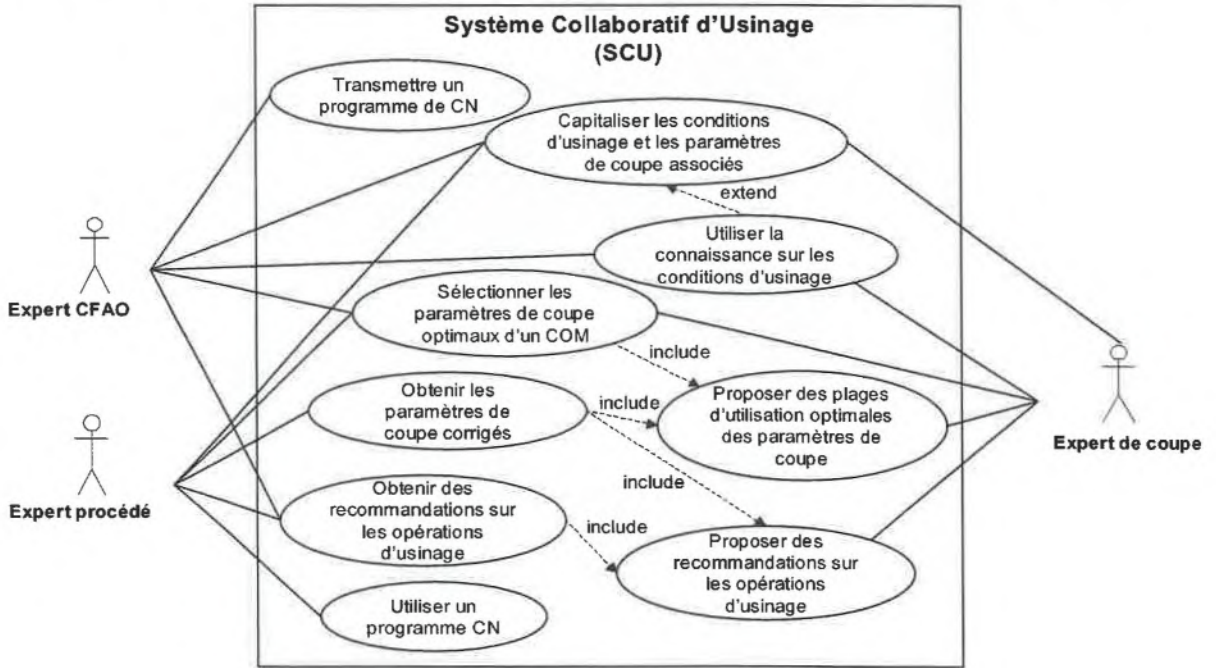


Figure 2 : Diagramme des cas d'utilisation représentant les actions entre les acteurs (experts) et le SCU

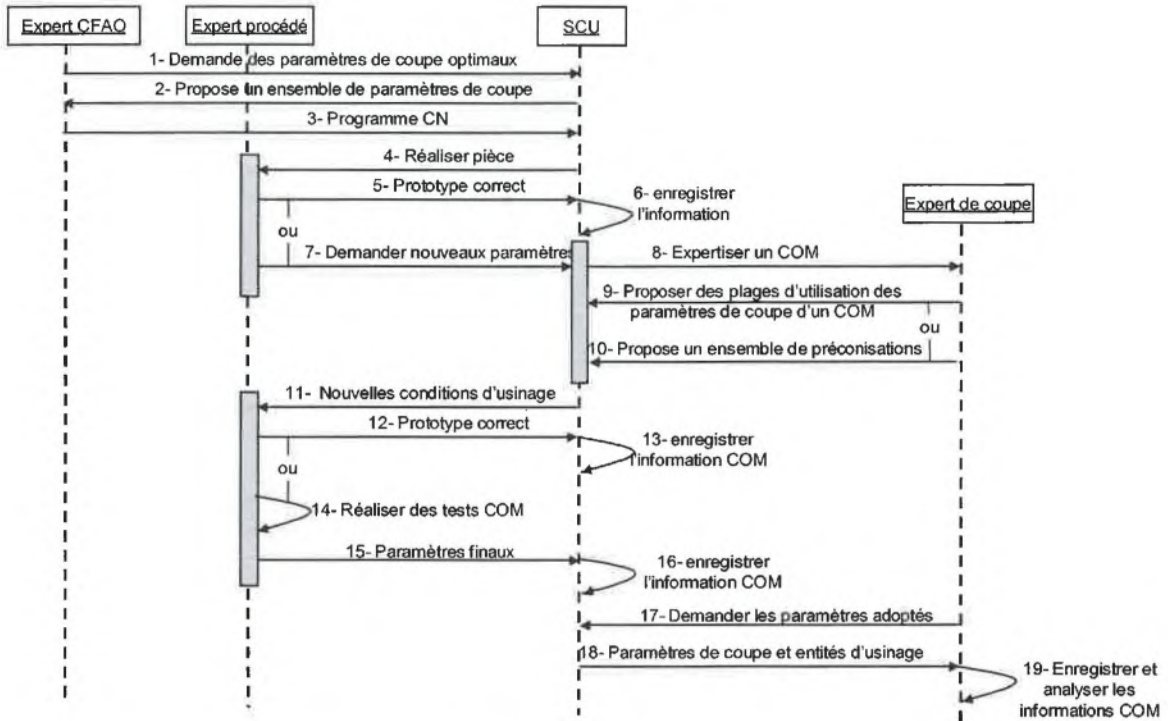


Figure 3 : Diagramme de séquence montrant les interactions entre les experts et le SCU

Action de l'acteur	Actions du Système Collaboratif d'Usinage (SCU)
1. L'expert de CFAO demande à sélectionner un ensemble de paramètres optimaux de coupe (correspondant à une entité d'usinage précise)	2. Le SCU propose un ensemble de paramètres de coupe à l'expert de CFAO.
3. L'expert de CFAO envoie le programme de CN à utiliser pour usiner la pièce	4. Le SCU demande à l'expert procédé d'exécuter le programme sur une Machine Outil à Commande Numérique (MOCN)
5. Le premier prototype de la pièce est obtenu en respectant les spécifications de qualité. L'expert procédé indique au SCU que l'entité usinée est correcte 7. Les spécifications ne sont pas respectées. L'expert procédé demande de nouveaux paramètres de coupe au SCU.	6. Le SCU enregistre les paramètres de coupe adoptés pour réaliser l'entité d'usinage sélectionnée 8. Le SCU demande une expertise à l'expert d'usinage sur le COM considéré
9. L'expert de coupe propose au SCU des plages d'utilisation de chacun des paramètres de coupe d'un COM donné	11. Le SCU propose à l'expert procédé de nouvelles conditions de coupe optimales.

10. Ou il propose au SCU un ensemble de recommandations sur les conditions d'usinage à adopter	
12. L'expert procédé teste les nouvelles conditions d'usinage. Si les spécifications sont respectées, l'expert procédé les valide auprès du SCU 14. Ou l'expert procédé réalise un ensemble de tests de COM pour définir les paramètres d'usinage optimaux	13. Le SCU enregistre l'information sur le COM
15. Lorsque les paramètres de coupe optimaux sont établis, l'expert de coupe envoie cette information au SCU	16. Le SCU enregistre ces nouvelles conditions de coupe
17. L'expert de coupe demande au SCU les nouveaux paramètres ou les conditions d'usinage choisis	18. Le SCU renvoie à l'expert de coupe l'information capitalisée.
19. L'expert de coupe enregistre et analyse l'information de coupe (COM) pour mettre à jour sa base de connaissances et enrichir ses modèles physiques.	

Tableau 2 : Bilan des actions des acteurs et du SCU

Cet ordre correspond à un point de vue général et peut être différent pour un autre cas d'utilisation. L'ensemble ordonné des actions est présenté dans un tableau de deux colonnes. Une telle représentation permet de séparer les actions des acteurs et de celles du système. Un numéro placé avant chaque action identifie l'ordre de l'action et décrit le scénario suivant. L'expert de CFAO interroge le SCU sur les paramètres de coupe satisfaisant le processus de coupe simulé. Le système collaboratif répond avec une valeur pour chaque paramètre et un programme pour la machine-outil à Commande Numérique (CN) est alors produit par l'expert de CFAO. Ce programme est alors envoyé vers l'expert de processus pour produire un premier prototype de la pièce. Plus précise est la connaissance du système sur les paramètres de coupe à adopter, plus précise sera la réalisation de ce prototype. Si le prototype satisfait les spécifications de conception, le SCU stocke cette information et finalement les modifications faites par l'opérateur sont enregistrées dans le programme CN. Sinon, des paramètres correctifs sont demandés au SCU qui consulte alors l'expert de coupe pour des précisions sur les paramètres du COM à adopter. Basé sur cette approche expérimentale, l'expert de coupe est alors capable de fournir des paramètres correctifs pour la machine-outil. Un nouveau prototype peut alors être produit. S'il ne satisfait pas entièrement les spécifications, des expériences complémentaires ou des analyses mécaniques plus poussées portant sur les capacités de la machine-outil elle-même sont nécessaires. Dans ce cas les plages du COM sont adaptées au système d'usinage considéré.

L'interaction entre le système d'usinage et le COM est présentée plus en détail dans (Deshayes, 2003).

Notons l'importance de l'échange d'informations concernant les paramètres de coupe et les conditions d'usinage dans leur ensemble. En effet, le choix des conditions de coupe est crucial pour satisfaire au plus juste les spécifications attendues. Notons également que l'exploitation d'un COM n'a de sens que dans un contexte donné correspondant à une entité d'usinage, à des matériaux usiné et usinant, et à des contraintes machines et géométriques. Une exploitation précise d'un COM ne peut être réalisée qu'en considérant l'ensemble de cet environnement. Il n'est pas toujours évident que les paramètres de coupe définis dès la première étape soient corrects. De plus, la capitalisation des paramètres effectivement adoptés, s'effectuant aux actions 17 et 18, est importante pour l'auto-capitalisation des données d'un COM. L'objectif est de ne plus réaliser l'ensemble des essais COM lors d'un nouvel usinage dans des conditions techniques similaires. Par exemple, si une opération à réaliser fait intervenir des matériaux usinés et usinant identiques à un cas précédent, mais avec des géométries d'outil et une entité d'usinage légèrement différente, les paramètres optimaux peuvent être obtenus à partir des données préalablement capitalisées. Cette approche intègre donc un objectif d'auto-capitalisation des données de COM qui est crucial au management des données techniques de production. Peu de travaux de formalisation de ces données ont été réalisés dans le passé. Les normes existantes, telles que (NF E 66-520-1, 1997), s'intéressent essentiellement à la description des démarches expérimentale pour l'obtention de ces informations. Les deux sections suivantes décrivent des méthodes et des technologies du génie industriel permettant de formaliser les données dites « métier » car elles sont généralement reliées à un fort savoir-faire, capital intellectuel de tout système de fabrication.

3. Méthodes pour l'intégration syntactique et sémantique des données

Tel que montré par S. Ray (Ray, 2002), et représenté sur la figure 4, l'approche de l'intégration des systèmes est divisée en quatre niveaux : 1) élaborer une structure de données normalisée. Basés sur cette structuration, les systèmes tendent alors à 2) développer des sémantiques formelles afin de comprendre les terminologies employées. Basés sur ces deux évolutions, facilitant la compréhension commune, les systèmes peuvent alors 3) évoluer en s'auto-décrivant. Enfin, les systèmes sont aptes à 4) s'auto-intégrer. Il est à noter que l'évolution vers les niveaux élevés entraîne vers des domaines de plus en plus intelligents. Actuellement seul le premier stade de l'évolution a été largement implémenté, surtout avec la norme STEP (ISO 10303, 1994). Le deuxième niveau a débuté, sous une forme normalisée dans les années 1990, avec le projet PSL (ISO/DIS 18629, 2004) (Uschold et al, 1996] et sous d'autre formes avec différents chercheurs (Catron et Ray, 1991) (Tate, 1998). La communauté du WEB sémantique propose également un langage (OWL, 2004) pour décrire les ontologies sous formes taxonomiques. Concernant les applications impliquant un fort savoir-faire, tel que les procédés

d'usinage, il n'est pas toujours aisé de représenter les informations sous la forme d'une taxonomie. Pour cette raison, les modèles sémantiques développés ici l'ont été sur la base de la logique du premier ordre (LPO) qui semble être plus adapté au problème de l'usinage.

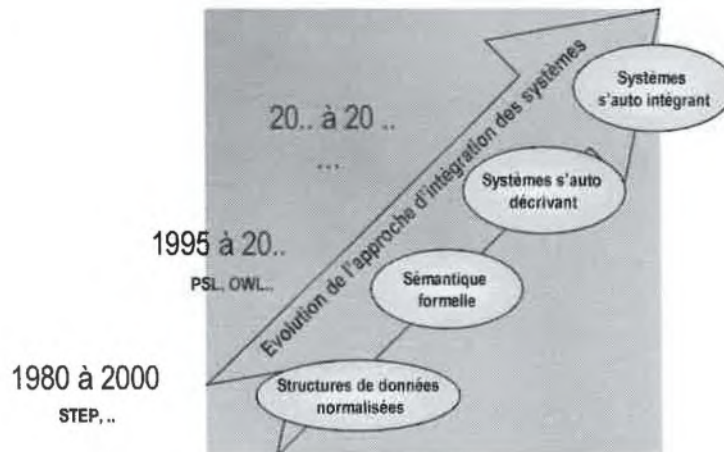


Figure 4 : L'échelle d'intégration des systèmes, d'après (Ray, 2002)

3.1 Méthodologie pour l'élaboration de structures de données « normalisées »

Le premier niveau d'intégration débute par l'élaboration d'un schéma global pour identifier les données d'usinage et relier les différentes normes existantes (ou en cours de normalisation). Afin de garder un certain pragmatisme, l'approche s'est limitée à l'étude des données des deux experts précédemment cités : un expert de CFAO et un expert de coupe. Pour réaliser une base pour une plate-forme d'ingénierie collaborative, il est nécessaire de construire un modèle normalisé tenant compte des données communes des différents experts. Ce modèle doit laisser la possibilité à chacun des experts de spécialiser ces données par rapport à son propre schéma. Pour développer ce modèle normalisé, la méthodologie de développement des protocoles d'applications (ISO 10303-11, 1994) de la norme STEP a été utilisée, cf. figure 5. Les données et les activités de chacun des experts sont analysées. Les résultats de cette analyse sont deux modèles appelés AAM et ARM. Le Modèle d'Activité d'Application (AAM) décrit les activités, les processus et les flux de données de l'application. Le Modèle de Référence d'Application (ARM) est la représentation finale des besoins de l'application en utilisant les méthodes et les terminologies choisies par le groupe de développement. A partir de ces deux modèles, les ressources intégrées de STEP sont spécialisées pour satisfaire les besoins du modèle ARM correspondant. Le résultat de cette spécialisation est le Modèle Interprété de l'Application (AIM) formalisé en utilisant le langage de modélisation EXPRESS. En utilisant les modèles AIM de chacun des experts et les normes du domaine de l'usinage, un modèle générique est construit (Deshayes *et al*, 2003) (Deshayes, 2003). Le modèle de données générique est écrit en EXPRESS-G et comporte les informations suivantes : le modèle de structure de produit, le modèle matériau,

le modèle géométrique, le modèle COM et un modèle du processus de coupe. Ces modèles sont présentés plus en détails dans (Deshayes *et al*, 2003).

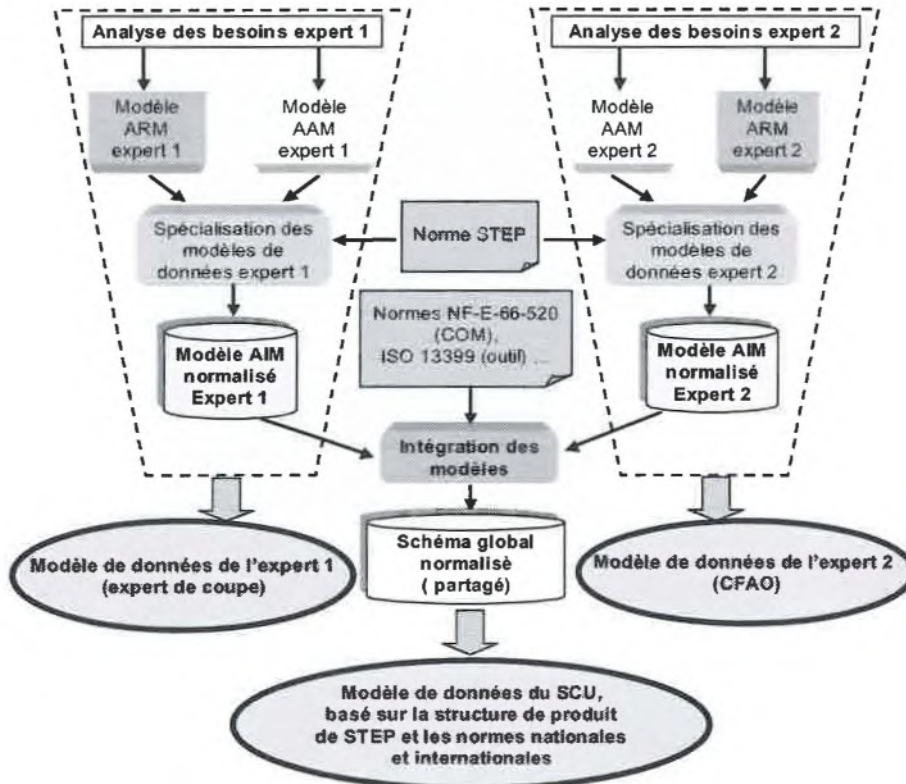


Figure 5 : Méthode pour l'élaboration de modèles de données sur la base de la norme STEP

Ainsi ce modèle générique assure le stockage et le partage des données communes aux différentes applications. Dans notre étude, l'objectif n'était pas de proposer un modèle complet en EXPRESS, car la construction d'un tel modèle nécessite une large équipe de développement pour assurer des définitions consensuelles, ce qui ne pouvait être reproduit en laboratoire. Néanmoins, l'approche s'est basée sur un grand nombre de normes afin de palier à ce problème et l'application de cette méthode s'est avérée très utile pour identifier les objets, les faits et quelques relations entre eux, et par la suite ces informations ont permis de concevoir les ontologies. Notez que les modèles ont été écrits dans l'EXPRESS, mais d'autres langages comme UML ou XML ont tendance à être plus appropriés à la modélisation des données. L'expérience montre que ces deux derniers langages de modélisation sont plus faciles d'interprétation et donc facilitent les échanges avec une communauté plus large.

3.2 Méthodologie pour la représentation de la sémantique des données

Ici, la sémantique des données se réfère à l'ontologie du concept véhiculé par les données. Une ontologie exprime, pour un domaine particulier, les termes (entités, objets, classes,

attributs) et les relations parmi eux. Elle fournit des définitions formelles et précises à l'aide d'axiomes dont le rôle doit contraindre les interprétations des termes et des relations. Une ontologie permet de représenter une variété très riche de relations structurelles et non-structurelles comme la généralisation, l'héritage, l'agrégation et l'instantiation. Il est donc primordial d'utiliser une méthode de conception rigoureuse afin de réduire les erreurs de modélisation.

Comme l'a montré (Gruber, 1993), la méthodologie d'élaboration d'une ontologie est un processus très complexe qui dépend de plusieurs critères. Peu d'auteurs ont donné une méthodologie générique. La méthode de capture d'ontologies IDEF 5 (IDEF, 2005) est sûrement la plus complète. D'autres auteurs proposent des méthodologies d'analyse très proche (Uschold et Gruninger, 1996) (Ciocoiu et al, 2001) dans le domaine de l'ingénierie. Ces méthodologies sont généralement constituées de cinq étapes principales :

- Organisation et définition du domaine d'étude : il s'agit d'établir le sujet, les points de vue et le contexte du projet de développement de l'ontologie,
- Collection des données : il s'agit de collecter les données « brutes » nécessaires à la construction de l'ontologie,
- Analyse des données : pour faciliter l'extraction des ontologies, il faut adapter les outils d'analyse à des domaines souvent très différents,
- Développement des ontologies initiales : il s'agit de développer une première série d'ontologies à partir des données recueillies. Cette étape est compliquée en terme de communication entre les participants. De plus, peu d'outils graphiques sont disponibles pour représenter les ontologies,
- Raffinement et validation des ontologies. Cette étape doit être réalisée de manière itérative entre les divers participants. Cette validation est la plus coûteuse en temps.

Ce lourd travail de développement doit être réalisé par la confrontation des équipes des divers domaines considérés. La méthode IDEF 5, bien que proposant de nombreux outils documentaires, reste très difficile à mettre en oeuvre. Elle entraîne une forte mobilisation des experts. Dans les domaines correspondant à des métiers une très grande quantité de termes doivent être collectés et cela rend la modélisation très complexe. Dans PSL (Gruninger et Menzel, 2003) la capture d'ontologies commence par l'identification des concepts clés et des relations du domaine des processus de fabrication. Les objets manipulés par l'ontologie sont d'abord identifiés et représentés par des constantes et des variables. Ensuite, les propriétés de ces objets et leurs relations sont affinées à travers la définition d'axiomes et de prédicats.

Les terminologies définies dans le modèle de données conceptuel précédemment créé sont collectées puis analysées pour proposer des définitions littérales. Ces définitions sont analysées de manière itérative par l'équipe de développement jusqu'à obtenir un consensus. Dans cette

phase, certaines définitions devront être abandonnées si aucun consensus n'est trouvé. Lorsque le consensus est établi, ces définitions sont représentées en KIF (« Knowledge Interchange Format » (Genesereth et Fikes, 1992)). Il s'agit alors de proposer une première modélisation des concepts en utilisant un langage logique simple basé sur la logique du premier ordre. Ces concepts en KIF permettent de faire ressortir les relations entre les concepts primitifs puis de proposer un modèle formel de ces relations. Ces relations et concepts atomiques sont également analysés de manière itérative par l'équipe de développement jusqu'à obtenir des relations suffisamment consensuelles. Dès que cette étape est réalisée, les axiomes peuvent être écrits en KIF, puis comparés avec les concepts primitifs afin de vérifier leur cohérence. Les ontologies du domaine étudié sont alors créées.

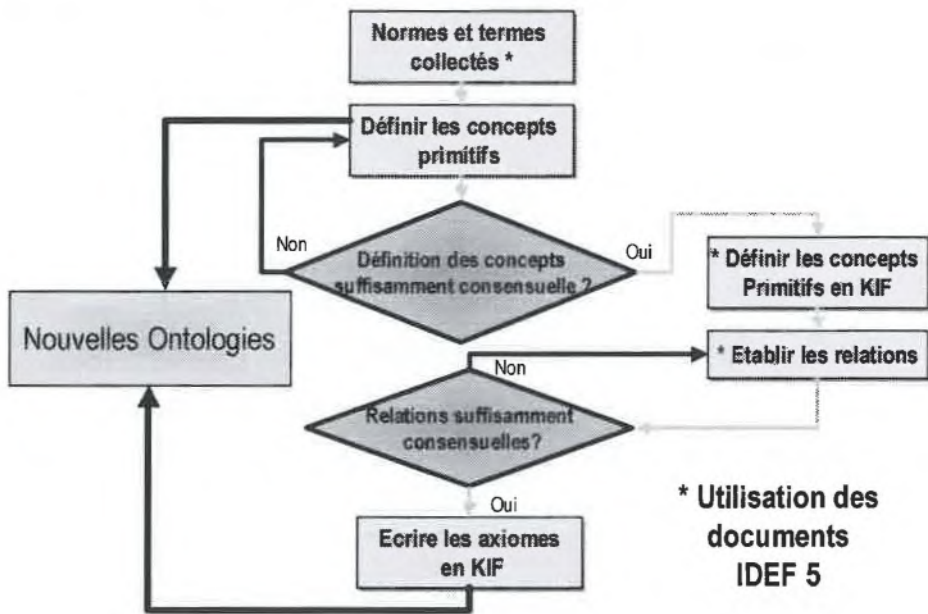


Figure 6 : Processus itératif pour la conception d'ontologies

Le processus de modélisation demande une forte mobilisation de l'équipe de développement et une rigueur très stricte pour écrire les ontologies. Les documents mis à disposition aux membres de l'équipe sont de la forme de ceux présentés dans (Deshayes, 2003) et ont pour objectif de faciliter l'échange des concepts. L'objectif de ce travail n'est pas de représenter tous les concepts d'un domaine, mais d'établir les concepts primitifs, d'établir des ontologies de ces concepts, puis dans des étapes ultérieures recommencer le processus de développement pour créer de nouvelles ontologies en utilisant ces primitives.

Nous avons utilisé cette démarche pour analyser les concepts du domaine de l'usinage et établir les concepts primitifs. Ces nouvelles ontologies sont construites sur la base des ontologies primitives développées par le projet PSL (« Process Specification Language » Gruninger et Menzel, 2003). Elles constituent une proposition d'extensions à PSL pour la modélisation des

ontologies du domaine de l'usinage. Les ontologies Développées pendant cette recherche et leur documentation sont détaillées dans (Deshayes, 2003).

4. Exemples et problématique d'intégration des deux types de modèles

4.1 Modèle de données

La figure 7 présente les relations entre les schémas de données développés au cours de ce travail. L'ensemble de ces modèles a été construit sur la base du modèle structure de produit de STEP, permettant ainsi de garder les liens avec les parties de STEP et d'assurer une certaine normalisation des données facilitant l'intégration avec les modèles existants. Concernant les produits utilisés dans ce modèle, seules les ressources utilisées en tournage ont été représentées. Les modèles développés sont :

- Un modèle d'outil, basé notamment sur la norme (ISO 13399, 2004),
- Un modèle COM, basé sur la norme française (NF E 66 520, 1997) et sur les résultats expérimentaux présentés dans (Deshayes, 2003),
- Un modèle de processus d'usinage développé pour les besoins du projet et basé sur (Wolff et al, 2001),
- Un modèle matériau, ce modèle fournit les informations sur la composition et les propriétés mécaniques à la fois du matériau usinant et du matériau usiné.

Les modèles ont été écrits en EXPRESS-G. Certains d'entre eux ont été traduits en modèle de base de données (El Beqqali, 2002) pour faciliter l'implémentation du système coopératif.

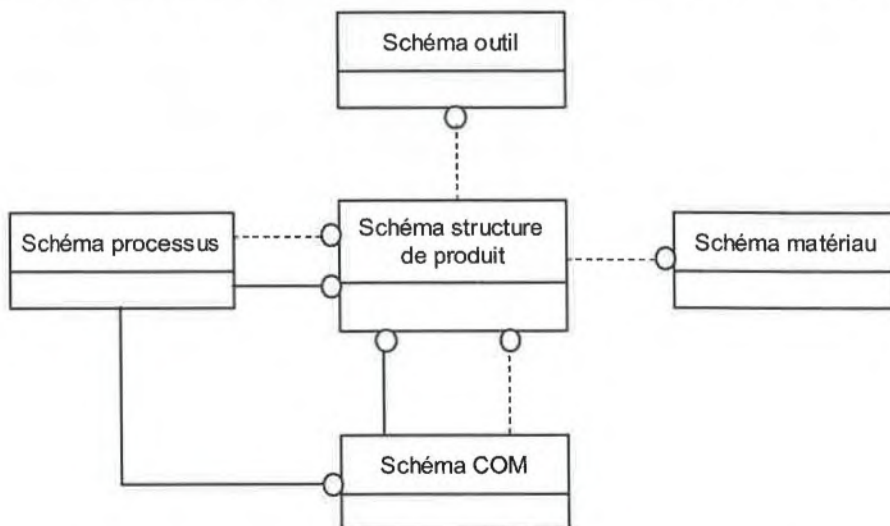


Figure 7 : Liens entre les schémas de données du projet 2IUF, modélisé en EXPRESS-G, et basé sur le schéma structure de produit défini par la norme STEP

Ici l'exemple porte sur le modèle de données du COM. Comme défini précédemment, un COM doit permettre de faciliter le choix des paramètres optimaux d'une opération de coupe pour usiner une surface d'une pièce, constituée d'un certain matériau, avec un outil. Le modèle illustré sur la figure 8 représente la structure de données du COM. L'entité *COM* donne l'information générale du couple outil-matière (outil et matériau usiné) concerné. Dans ce modèle, l'entité *COM* se réfère à l'entité *Zone_de_travail_COM* qui représente les paramètres limites (entité *Paramètres_Limites*) d'un COM. Les paramètres limites d'un COM définissent la plage d'utilisation de chacun des paramètres de coupe, c'est-à-dire le minimum et maximum de chaque paramètre de coupe du procédé choisi. En tournage, ces paramètres limites concernent la vitesse de coupe, V_{cmin} et V_{cmax} , l'avance de l'outil, f_{min} et f_{max} , la profondeur de passe, a_{pmin} et a_{pmax} , et la durée de vie de l'outil, T_{min} et T_{max} . Les valeurs ne représentent qu'une frontière générale qui comprend un ou plusieurs optimums pour le procédé concerné. Notons qu'il n'est pas toujours possible de fixer simultanément ces paramètres à leurs valeurs optimales (Deshayes et al, 2005). L'entité *Zone_de_travail_COM* se réfère également à l'environnement initial avec lequel les essais de caractérisation de cette zone ont été réalisés. Par exemple, ils peuvent l'être avec ou sans lubrification. Cette information est importante notamment pour transposer des résultats d'usinage à sec (sans lubrification) avec des usinages sous lubrification. La durée de vie de l'outil, la qualité et l'intégrité de la surface usinée peuvent être modifiées par l'environnement.

Les relations avec le schéma du processus d'usinage sont représentées par les entités *Processus_de_coupe* et *Paramètres_de_coupe*. Un processus de coupe utilise un ensemble de paramètres de coupe, a_p , f et V_c en tournage, qui sont choisis dans la zone de travail d'un COM. Rappelons qu'un COM (Couple Outil Matière) représente l'interaction entre l'outil et la pièce usinée. L'outil et la pièce sont des produits au sens de STEP et ainsi un COM doit pointer vers leur définition respective, représenté par l'entité *Définition_de_Produit* du schéma structure de produit défini dans (ISO 10303-43, 1994). Notons que cette relation est effectuée avec l'entité *Zone_de_travail_COM* car en pratique les informations sur les outils et la pièce sont utilisées à partir de cette entité. Enfin, puisque le COM est une relation entre définitions de produits, il est modélisé comme une sous classe de la relation de définition de produit définie dans STEP (entité « Product definition relationship »).

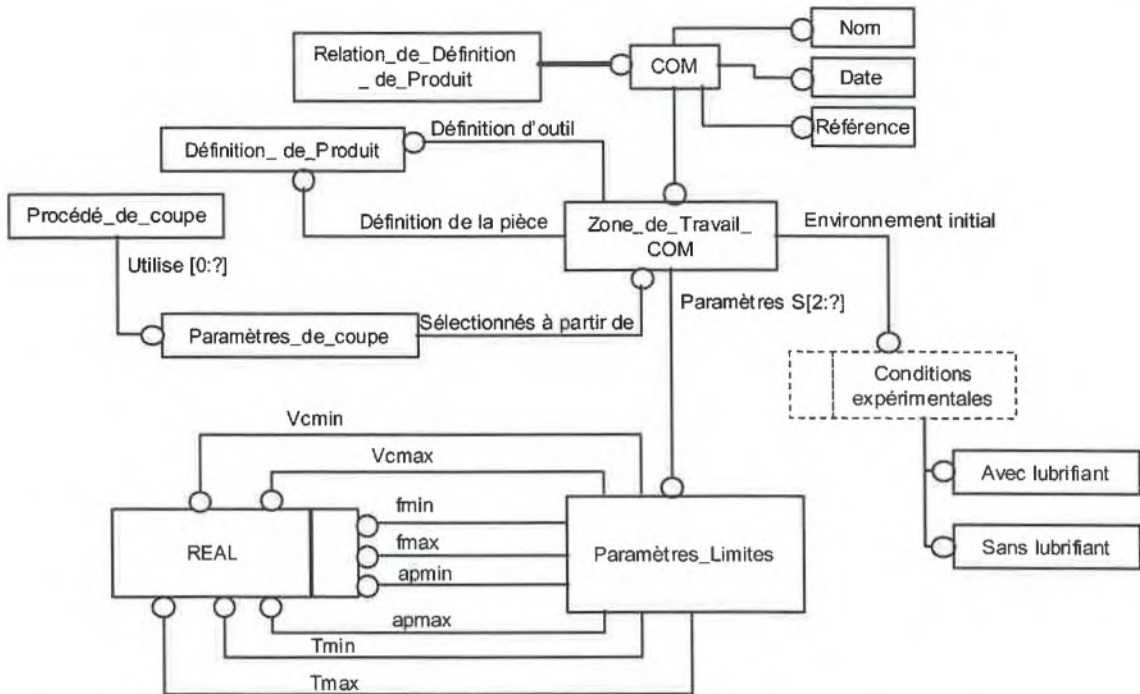


Figure 8 : Structure de données représentées en EXPRESS-G pour les informations COM

4.2 Modèle sémantique

Comme indiqué à la section 3.2, le rôle des ontologies est de décrire plus précisément les entités et relations définies dans les schémas de données. Ici, le schéma du COM représenté sur la Figure est le domaine du discours pour la conception de l'ontologie COM. L'ontologie est formée d'axiomes qui définissent les règles d'interprétation des objets et relations du modèle. Les exemples indiqués ici ne portent que sur la définition des paramètres de coupe qui sont en fait les sorties et entrées nécessaires à tout expert souhaitant simuler ou optimiser un usinage. Les ontologies développées dans ce travail l'ont été en accord avec la norme définissant le langage de spécification de processus, PSL (ISO/DIS 18629-1, 2004), afin d'utiliser les fortes potentialités de raisonnement de ce langage. En outre, PSL permet une meilleure intégration des données procédés avec tout logiciel modélisant les processus manufacturiers (CFAO ou logiciels pour la création de gammes d'usinage). Les ontologies ont toutes été décrites en utilisant la logique du premier ordre avec le formalisme défini dans KIF (Genesereth et Fikes, 1992).

Un paramètre de coupe peut être considéré comme un objet conditionnel utilisé par une activité pour produire un objet manufacturé. Il doit être valide pour l'activité et doit être inclus dans une plage de valeurs (délimitée par une valeur minimale et maximale du paramètre en question) liée à l'activité considérée. Il est important de noter la forte relation entre les paramètres de fabrication et l'activité en elle-même. Par exemple, pour une opération de fraisage, la plage de la vitesse de coupe sera différente de celle d'une opération de tournage ainsi

que sa définition technique (i.e. sa sémantique). Un premier ensemble d'ontologies, relativement génériques, ont été définies pour tout paramètre de fabrications, que ce soit les paramètres du COM ou d'autres paramètres manufacturiers tels que les tolérances de fabrications.

<p>Un paramètre d'activité ?p1 est "inferiorEq" (inférieur ou égal) à un paramètre d'activité ?p2 si et seulement si ?p1 est inférieur à ?p2 ou si ?p1 est égal à ?p2.</p>	<pre>def relation inferiorEq (?p1 ?p2) := (and (activityParameter ?p1) (activityParameter ?p2) (or (inferior ?p1 ?p2) (= ?p1 ?p2)))</pre>
<p>Un paramètre d'activité ?p2 est "IncludedBetweenEq" (Inclus entre ou égal) les paramètres d'activité ?p1 et ?p3 si et seulement si ?p1 est inférieur ou égal à ?p2 et si ?p2 est inférieur ou égal à ?p3.</p>	<pre>def relation includedBetweenEq (?p1 ?p2 ?p3) := (and (inferiorEq ?p1 ?p2) (inferiorEq ?p2 ?p3))</pre>
<p>La vitesse d'avance f d'une opération de tournage est incluse entre une valeur de vitesse d'avance minimale et une valeur maximale.</p>	<pre>(forall (?f) (implies (feed_rate ?f) (includedBetweenEq ?min ?f ?max)))</pre>
<p>Les paramètres de coupe peuvent être modifiés entre occurrences d'opérations de tournage.</p>	<pre>(forall (?occ ?f ?ap ?n) (implies (and (turning_operation ?occ) (feed_rate ?f) (rotating_speed ?n) (depth_of_cut ?ap)) (and (state ?f) (state ?ap) (state ?n))))</pre>

Tableau 3 : Exemples d'axiomes pour l'ontologie COM

Le tableau 3 donne quelques exemples d'ontologies développées pour la spécification des paramètres d'usinage. L'objet considéré ici est le paramètre de fabrication qui est considéré comme un paramètre d'activité (ou de processus) au sens de PSL. La relation (1) représente la relation inférieure ou égale et est nommée « *inferiorEq* ». Les variables ?p1 et ?p2 sont des prédicats de la relation *inferiorEq*. Dans la relation *inferiorEq*(?p1 ?p2), ?p1 et ?p2 sont des paramètres d'activité et ?p1 est inférieur ou égal à ?p2. Cette relation est importante car elle est suffisamment générique pour servir de primitive à la construction d'axiomes additionnels et plus élaborés tels que réalisés pour les axiomes (2) et (3). L'axiome (3) définit la plage de vitesse d'avance sur la base de l'axiome (2) ; un moteur d'inférence sera alors capable de faire la déduction vers la relation (1) et comme cette ontologie satisfait les définitions de PSL, elle peut alors être intégrée à l'ensemble des processus manufacturiers.

Enfin, l'ontologie (4) indique que pour une instance d'une opération d'usinage, une vitesse d'avance, une vitesse de coupe et une profondeur de passe sont utilisées et que chacun de ces paramètres procédé peut posséder différents états. En effet, du fait de l'usure de l'outil ou encore de la prise en compte de la dynamique de la machine-outil, les valeurs de ces paramètres

peuvent être modifiées d'une instance d'usinage à une autre afin de satisfaire constamment des fonctions d'optimisation. Cela peut même se produire pour la même géométrie de pièce usinée si le cycle de vie de la machine-outil et de l'outillage est considéré. Là encore, l'utilisation du terme « state » émanant de l'ontologie PSL donne un fort pouvoir d'expressivité aux ontologies développées. Le lecteur intéressé trouvera des informations sur ces ontologies dans (Deshayes, 2003) et (Ciocoiu et al, 2001).

4.3 *Problématique d'Intégration*

L'intégration de ces deux modèles est une étape cruciale qui doit être soigneusement organisée afin d'éviter l'utilisation exponentielle de faits, de concepts et de relations. Sous le projet 2IUF, l'intégration de ces deux modèles n'a pas été complètement implémentée, mais l'approche présentée dans la Figure a été choisie. Un système expert utilise des connaissances spécifiques qui sont généralement la propriété intellectuelle d'une entité (une société, un service particulier, ou un groupe de sociétés). À l'opposé, le SCU utilise des modèles d'usinage plus communs - tels que des modèles mécanistiques, ou la description des machines outils ou des outillages, ou encore la sélection des paramètres de coupe - qui sont acceptés comme étant partageable. Chaque modèle est alors considéré comme un domaine d'étude pour la conception d'ontologies et permet d'identifier les entités et relations primitives qui peuvent à leur tour servir à la conception d'ontologies plus élaborées telles que montrées à la sous section 4.2. En usinage ces modèles sont généralement compliqués à modéliser ce qui a poussé grand nombre de chercheurs à utiliser des modèles stochastiques et du domaine de l'intelligence artificielle pour certains aspects de l'usinage. C'est aussi une des raisons pour laquelle une formalisation aussi précise que possible des connaissances émanant de ces domaines est nécessaire afin d'être en mesure de simplifier ces démarches de modélisation. Néanmoins une telle tâche nécessite d'utiliser des outils de formalisation qui ne sont pas encore validés pour les domaines à fort savoir-faire comme l'usinage.

Ainsi, il a été choisi d'utiliser les outils d'interopérabilité disponibles pour modéliser les données de sorties des modèles d'usinage. Les modèles de données restent encore, à court terme, les modèles les plus efficaces. Ils représentent la connaissance statique, ou les faits statiques, des modèles de processus. Ce sont les modèles statiques du SCU. D'autre part, comme nous l'avons mentionné précédemment, les modèles sémantiques représentent la connaissance associée aux modèles de données. Parce que la représentation des connaissances peut être mise à jour ou modifiée avec les modèles de processus d'usinage, ce type de représentation est considéré être dynamiquement ajustable et représente donc la dynamique des modèles d'informations. Ce sont les modèles dynamiques du SCU tels que représentés sur la figure 9.

Finalement, et tel que montré sur la figure 9, la représentation formelle de ce monde sémantique, par l'utilisation d'outils de modélisation du WEB sémantique (OWL) ou des langages plus sophistiqués basés sur la logique du premier ordre tel que PSL, permet l'utilisation d'un système de raisonnement constitué d'un moteur de requêtes sur les modèles de

données et d'un moteur d'inférence. Ces deux moteurs d'analyse sont interconnectés. Ce système de raisonnement a la fonction majeure d'analyser, à l'aide des règles de raisonnement définies par les modèles statiques, la cohérence des données produites par les modèles d'usinage avec la requête initiale et, éventuellement de proposer des solutions de correction au système expert. Bien sûr, les données statiques répondant à la requête du système expert sont également fournies. Une telle inférence est très utile afin de réduire le non-sens par le système expert au moment d'interpréter les données. Le système expert concerné peut alors modifier ses requêtes vers le SCU ou vers le moteur d'inférence en tenant compte des informations statiques et dynamiques fournies par le SCU.

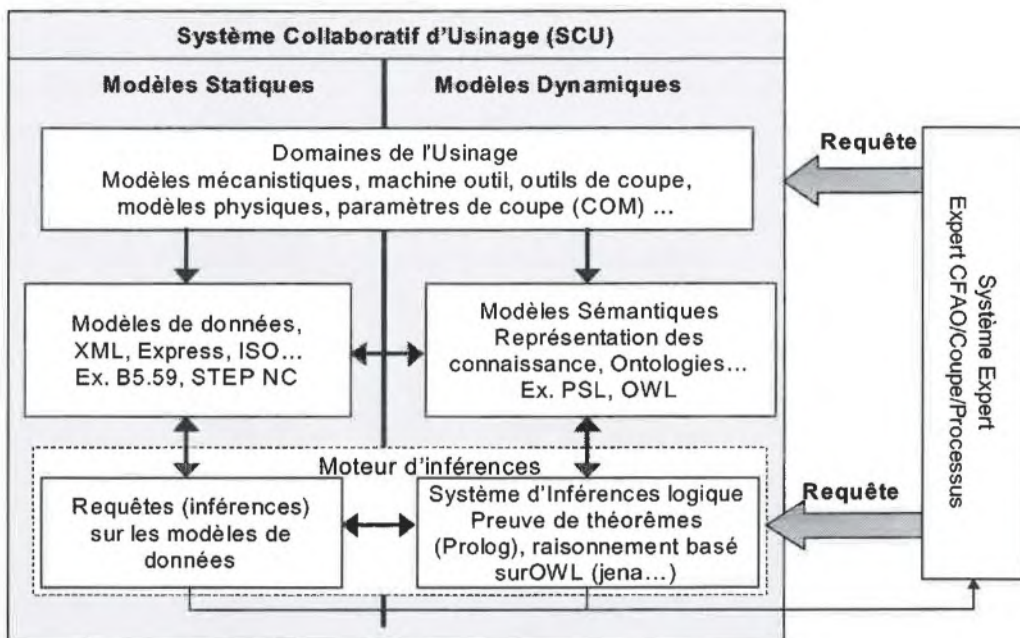


Figure 9 : Problématique de l'intégration des modèles statiques et dynamiques pour le SCU

5. Conclusion

Le projet 2IUF a porté sur la modélisation des données et des connaissances en usinage avec une préoccupation de bâtir des modèles communs à une large communauté d'entreprises de l'usinage. Les modèles d'UML décrivant les cas d'utilisation du SCU et le digramme de séquence présentant les interactions avec les acteurs du système se sont avérés très utiles pour la définition du domaine d'étude. De plus ces modèles peuvent être détaillés jusqu'au niveau de précision choisi par l'équipe de modélisation.

Dans le cadre du projet 2IUF le cas d'utilisation concernant la sélection des paramètres optimaux d'un COM a été implémenté. Des méthodes formelles pour représenter la structure des données et leur sémantique associée ont été choisies. Les schémas de données ont été élaborés sur la méthode proposée dans STEP. Concernant la modélisation de la sémantique des

données nous nous sommes basés sur la méthode IDEF 5. A l'aide de ces méthodes, un modèle de données générique a été établi basé sur le modèle de structure de produit de STEP, sur des standards nationaux et internationaux aussi bien que sur quelques applications industrielles. En particulier, le modèle couple outil matière largement utilisé pour l'optimisation des procédés d'usinage a été considéré dans ce schéma de structure de produit. Ces modèles ont été utilisés pour développer des ontologies sur la base du langage PSL pour spécifier et contraindre, par une représentation formelle en logique du premier ordre, l'utilisation des objets et des relations définies pour un modèle de données représentant un domaine du discours.

Une telle approche, impliquant des modèles statiques (modèles de données) et dynamiques (modèles sémantiques) doit maintenant être améliorée pour évaluer les résultats réels dont pourraient bénéficier les systèmes industriels. La fabrication tirera d'importants bénéfices de la modélisation des connaissances par des ontologies utilisant des langages formels. Mais il est encore prématuré de dire quand cela sera vraiment effectif et surtout quelles seront les normes, les outils de modélisations, les méthodes d'essai, et les langages à utiliser pour capturer et échanger la sémantique. L'un des enjeux de la prochaine décennie dans ce domaine est de tester les différentes approches avec un souci de formalisation sur la base de ces deux structures d'informations statique et dynamique. De tels modèles permettront, à long terme, d'optimiser la préparation des usinages et ainsi de réduire considérablement les coûts de fabrications.

6. Bibliographie

- 2IUF Deliverables, D1.1, D1.2, D1.3' and D1.3'', 2003, Rapports internes du projet Rhône Alpes 2IUF.
- Ben Younes J., 1994, Modélisation des ressources en fabrication mécanique. Application au choix des outils coupants dans un environnement orienté objet. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1994 176p.
- Catron B., Ray S., 1991, ALPS: A Language for Process Specification. *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 4, No. 2, p. 105-113.
- Ciocioiu, M., Gruninger M., and Nau, D., 2001, Ontologies for integrating engineering applications. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 1, p. 45-60.
- Deshayes L., Dartigues C., P. Ghodous, Rigal J.-F., 2003, Distributed and standard system for cutting data management. *CERA Journal*, Vol. 11, n° 1, p. 27-36.
- Deshayes L. & Rigal J.-F., 2001, Capitalisation des connaissances dans un contexte d'ingénierie coopérante pour la gestion des données de coupe. *In: Dynamique des connaissances en conception, Journées PRIMECA, Grenoble*, p. 15 - 22.
- Deshayes, L., 2003, Méthodologie d'étude de la coupe, liaison entre Couple Outil Matière et Pièce Outil Machine. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 271 p.

- Deshayes, L., Welsch, L., & al, 2005, Smart Machining Systems: Issues and Research Trends. In: proceedings of the 12th CIRP life cycle engineering seminar, Grenoble, France, 3-5 Avril 2005
- El Beqqali O., Deshayes L., Badir H., Pichat E., Ghodous P., 2002, Engineering data base based on the Portal web and XML. In: 2nd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, December 18-21, Marrakesh, Maroc.
- Genesereth, M.R., Fikes, R. E., 1992, Knowledge Interchange Format, Version 3.0, Reference Manual. Logic Group Report Logic-92-1, Computer Science Department, Stanford University, Stanford, California
- Gruber T. R., 1993, Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. International workshop on Formal Ontology, Padova, Italy.
- Gruninger, M. and Menzel, C., 2003, Process Specification Language: Principles and Applications. *AI Magazine*, Vol. 24, p. 63-74.
- IDEF, 2005, IDEF Family of Methods, Février. 2005, <http://www.idef.com>
- ISO 10303, 1994, STEP Product Data Representation and Exchange. International Organization for Standardization, Subcommittee 4, NIST.
- ISO 10303-11, 1994, STEP Product Data Representation and Exchange. Part 11, Description Methods: The EXPRESS Language Reference Manual. International Organisation for Standardisation, Subcommittee 4, NIST.
- ISO 10303-43, 1994, STEP Product Data Representation and Exchange, Part 43, Integrated Generic Resources: Representation Structures. International Organisation for Standardisation, Subcommittee 4, NIST.
- ISO 10303-203, 1994, Product Data Representation and exchange – AP 203 : Configuration controlled design. International Organization for Standardization.
- ISO 10303-214, 2001, Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 214: Application protocol: Automotive mechanical design process. International Organization for Standardization, Geneva, 2001.
- ISO 10303-224, 2001, Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining feature. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 13399, 2004, Cutting tool data representation and exchange. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 14649-10, 2003, Industrial automation systems and integration – physical device control - Data model for computerized Numerical Controllers - Part 10: General Process Data. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO/DIS 18629-1, 2004, Industrial automation systems and integration – Process Specification Language: Part 1: Overview and Basic Principles. ISO TC184/SC4/JWG8 N232. Voir site web: <http://www.mel.nist.gov/psl/> (Février 2005).

- NF E 66-520-1, 1997. Working zones of cutting tools – Couple Tool-material – part 1: general presentation. AFNOR, ISSN 0335-393.
- OWL, 2004, Web Ontology Language, W3C, voir <http://www.w3.org/2004/OWL/> (Février 2005)
- Ray S., 2002, Interoperability standards in the semantic web. *Journal of Computing and Information Science in Engineering, Trans. ASME*, Vol. 2, p. 65-69.
- Russel S., Norvig P., 2003, *Artificial Intelligence A Modern Approach*, second edition. ISBN 0-13-790395-2, 1080 p., pp.194 – 319 (Chapitres 7 et 8).
- TATE A., 1998, *Roots of SPAR – Shared Planning and Activity Representation*. The Knowledge Engineering Review Cambridge University Press, Vol. 13, No. 1, p. 121-128.
- Tichkiewitch, S., 1992, Modélisation pour la conception et processus d'intégration. Symposium international, Design in 2000 and Beyond, Strasbourg – France, p. 381-389.
- Tichkiewitch, S., 2004, A Virtual Research Lab for a knowledge community in production (VRL-KCIP), proceedings of the 5th IDMME conference, Bath U.K.
- Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I, 1998, *The Unified Modelling Language User Guide*. Addison-Wesley Professional, 1st edition, 482 p.
- Uschold M. & Gruninger M., 1996, Ontologies: Principles, Methods, and Applications. *Knowledge Engineering Review*, 1996, Vol. 11, p. 96-137.
- Wolff, V.; Rigal, J.-F; Ghodous, P.; Martinez, M., 2001, Design and Machining data integration. International conference on emerging technologies and factory automation, IEEE, p. 483 – 491.