

Approche inductive pour la spécification d'un système PLM générique

JULIEN LE DUGOU^{1,2}, ALAIN BERNARD¹, NICOLAS PERRY³, JEAN-CHARLES DELPLACE²

¹ IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes

² Centre Technique des Industries Mécaniques

³ LGM²B, Université de Bordeaux 1

Résumé — Depuis plusieurs années, l'ingénierie numérique a pris de plus en plus d'importance dans la stratégie des entreprises de l'industrie mécanique. Notre proposition est une approche inductive qui permet la spécification d'un système PLM (Product Lifecycle Management) dédiée aux petites et moyennes entreprises (PME) dans le domaine de l'industrie mécanique. Cette approche vise à fournir une aide pour le calcul des coûts, le développement et l'industrialisation des produits. Elle est fondée sur la capitalisation, la réutilisation et l'extension de connaissances expertes. Cette recherche débute par une immersion dans trois PME pour en extraire les principaux besoins en termes de travail collaboratif et de gestion des données techniques. Sur la base de chacune des propositions de solution effectuées dans ces entreprises, une solution générique est développée au niveau conceptuel. Dans ce papier, nous allons présenter notre processus inductif sur la base de trois études de cas et une synthèse pour la spécification d'un système PLM générique dans le contexte d'une entreprise étendue du domaine de l'industrie mécanique.

Mots clés — Product Lifecycle Management (PLM), Méta-modèle, Entreprise étendue

I. INTRODUCTION

Le Centre technique des industries mécaniques a mené une enquête en 2007 auprès des entreprises de la mécanique sur le thème de l'ingénierie numérique et du travail collaboratif [1]. Cette enquête révèle entre autre que seules 5% des PME de moins de 100 personnes utilisent un système de type PLM pour gérer leurs données produit. Or, plus de 70% de ces mêmes PME considère comme importants la réutilisation des connaissances, l'échange d'information en interne et en externe, le stockage sécurisé des informations et le suivi des modifications [2]. Ce sont justement les fonctionnalités qui sont présentes dans les outils logiciels PLM. Il existe donc des freins bloquants qui empêchent ces entreprises de franchir massivement le pas.

Nous allons donc essayer de lever ces verrous en appliquant une démarche inductive qui va permettre dans un premier temps d'identifier ces verrous, puis dans un second temps mettre en place les concepts qui permettront de les lever.

La section 2 de ce papier introduit les études scientifiques qui serviront de point de départ à notre approche. Nous présenterons notre démarche de recherche dans la section 3. La section 4 décrit les différentes immersions en entreprises. Cette phase d'immersion sera conclue par une synthèse en vue des spécifications d'un méta-modèle générique et d'une méthode d'implantation d'un système PLM pour entreprise étendue.

II. ETAT DE L'ART

Dans ce paragraphe nous allons tout d'abord examiner le concept du PLM et les travaux qui s'y rapportent de manière générale, puis nous zoomerons sur les intégrations des différents métiers intervenant lors des étapes du cycle de vie du produit.

A. Le concept PLM

Le PLM est avant tout une stratégie d'entreprise [3]. Il s'agit de gérer toutes les données relatives à un produit, sur l'ensemble de son cycle de vie, et ce pour la totalité des acteurs internes et externes impliqués dans sa création. Une définition du PLM assez répandue est la suivante :

“ A strategic business approach that applies a consistent set of business solutions in support of the collaborative creation, management, dissemination and use of product definition information across the extended enterprise from concept to end of life - integrating people, processes, business system, and information”[4].

De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine, spécialement dans le secteur aéronautique et automobile, afin de proposer des méthodes d'implémentation et de structuration pour le PLM [5, 6, 7].

B. L'intégration

Les travaux favorisant l'intégration des différents métiers de la conception dans la démarche de développement produit sont nombreux. Les métiers les plus représentés sont ceux liés aux procédés de fabrication. Citons par exemple l'usinage [8], l'emboutissage, la fonderie [9,10] ou encore la forge [11,12]. D'autres se sont focalisés sur la simulation [13, 14], la maintenance ou encore le recyclage.

Si beaucoup de métiers sont intégrés à la démarche de développement produit, il faut néanmoins qu'il soit possible de connecter l'ensemble des applications métiers sur un même système. Pour ce faire une solution consiste à traduire les modèles spécifiques dans un modèle standard [15], comme STEP (STandard for the Exchange of Product model data) [16, 17], ou ceux issus de projets tel IPPOP [18].

C. Conclusion sur l'état de l'art

On remarquera que la majorité des travaux effectués autour du PLM dans sa version globale concernent des grandes entreprises, très souvent des assembleurs automobile ou aéronautique. De même pour les intégrations, les approches permettant l'intégration de plusieurs métiers se font principalement autour d'assembleurs.

Nous avons donc choisi une démarche de recherche qui nous immergera dans différentes PME mécaniciennes pour en retirer les besoins en termes de PLM qui ne sont pas couverts par les approches actuelles.

III. DEMARCHE DE RECHERCHE

Notre approche vise à proposer une approche PLM générique permettant l'intégration des différents métiers du développement produit dans l'entreprise étendue de l'industrie mécanique.

A. Immersion: analyse des besoins et intégration de méthodes spécifiques

La première phase de ces travaux consista à interviewer plus d'une vingtaine d'entreprises afin d'en dégager les pratiques actuelles en termes d'ingénierie numérique et de travail collaboratif et les bonnes pratiques à mettre en place. Un benchmarking est effectué sur les outils existants dans le commerce afin de récapituler les fonctionnalités présentes et leurs adéquations avec les besoins des PME.

Enfin nous avons été dans trois entreprises pilotes correspondant aux différents types d'entreprises de notre typologie afin de mettre en place des méthodes de structuration et de gestion de données techniques. Cette phase est accompagnée de développements logiciels basés sur les méthodes proposées.

B. Généralisation: création d'une approche générique

Dans cette phase, l'analyse des différentes entreprises pilotes permet de généraliser l'approche PLM et de créer un modèle de données global, compatible avec les standards, applicable aux différents types de PME de notre typologie.

C. Validation: expérimentation de l'approche, essais dans une entreprise étendue

Enfin cette approche sera testée en entreprise étendue pour améliorer puis valider notre approche générique. Nous nous assurerons ainsi que notre proposition est bien en adéquation avec les besoins en termes de PLM des PME.

IV. IMMERSIONS EN ENTREPRISES

Dans ce chapitre, une typologie des entreprises mécaniciennes est proposée afin de choisir des entreprises pilotes représentatives de l'ensemble des entreprises rencontrées dans l'entreprise étendue de l'industrie mécanique. Puis seront exposées la situation initiale de chacune de ces entreprises,

ainsi que la démarche proposée pour améliorer cette situation et son intégration dans une solution logicielle.

A. Une typologie des PME mécaniciennes

Si l'on met de côté les attributs généraux d'un produit (référence, description, poids, matériaux...), communes à toutes les entreprises, les principales données techniques d'un produit sont contenues dans sa nomenclature et sa gamme de fabrication. Or, ce sont généralement des entreprises différentes qui fabriquent les pièces et qui les assemblent. Elles doivent donc avoir des besoins différents en termes de PLM.

Afin de vérifier cela, nous prendrons donc comme axe de différenciation dans notre typologie le nombre de composants par produit. En effet, une entreprise avec un seul composant par produit (les fabricants de pièces primaires) vont avoir comme support à leur cœur de métier la gamme de fabrication de leurs produits. A l'autre extrémité, les assembleurs qui ne produisent par leurs composants en interne placent au second plan la gamme de fabrication d'un composant sous traité par rapport à la nomenclature de leur produit propre. Enfin, il existe un niveau intermédiaire où les entreprises produisent une partie de leurs composants en interne et en sous traitent d'autres (certains équipementiers par exemple).

Ainsi, au vu de cette différenciation, trois types d'entreprises couvrent l'ensemble des problématiques liées au PLM de l'entreprise étendue : les assembleurs, les équipementiers et les fabricants de pièces primaires.

Nous allons donc effectuer une immersion dans une PME pour chacun de ces trois types.

B. Un équipementier nautique : PSL CONCEPT

1) Description de l'entreprise et situation initiale

PSL Concept réalise et commercialise des accastillages composites pour voiliers. Parmi ces produits on trouve des gouvernails de secours, des chariots d'écoute, des palans et poulies, des réas, des taquets coinçeurs...

Cette entreprise organise ses produits par familles. En effet, comme beaucoup d'équipementiers, ses produits sont conçus à partir de produits standards auxquels on ajoute des options pour correspondre aux besoins du client.

Suite à l'audit effectué, il apparaît que les principaux besoins rencontrés dans cette entreprise sont les suivants :

La capitalisation et l'automatisation des connaissances métier : une amélioration de la conception, due à un retour client, une série d'essais ou une optimisation du concepteur, n'est pas répercutée sur les autres produits de la famille sans une intervention du concepteur sur chaque produit.

La gestion des nomenclatures : les nomenclatures sont construites manuellement et doivent être mises à jour à chaque modification majeure de la conception d'un produit.

La gestion des références : du fait de la grande variété de produits existants (1200 références pour la famille des poulies), les références des produits sont difficiles à gérer.

Le devis : effectuer le devis d'un nouveau produit est complexe car il est difficile de connaître l'ensemble des coûts associés avant la conception du produit.

Archivage : lors d'une phase de maintenance, il n'est pas aisé de retrouver les plans du produit vendu ainsi que les références des pièces qui le composent.

2) Approche proposée

Nous nous sommes intéressés à la famille de produits la plus volumineuse de l'entreprise, les poulies (Figure 1).

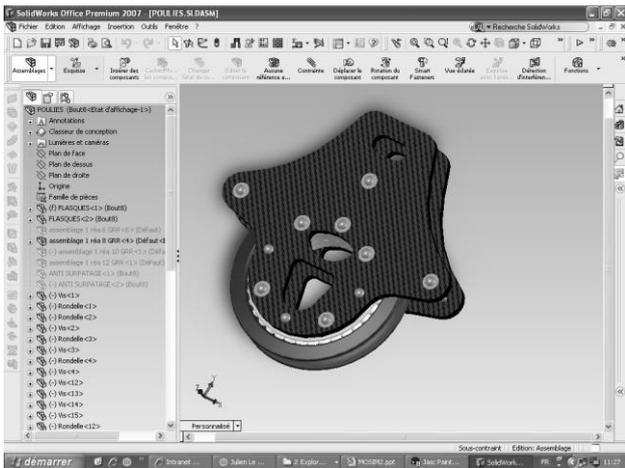


Figure 1 : la modélisation 3D d'une poulie

La conception d'une poulie passe par le choix de solutions technologiques qui répondent à un ensemble de contraintes technico-économiques. Ces contraintes sont des connaissances appartenant à l'entreprise étendue qui sont formalisées de manière à permettre leur utilisation par des concepteurs.

Les besoins du client sont incorporés au modèle sous forme de contraintes. De même les contraintes relatives aux moyens de production, les contraintes liées au produit, les contraintes des fournisseurs sont explicitées.

Le client en choisissant un certain nombre de variables, active les contraintes correspondantes. Un solveur permet ensuite de proposer une conception qui répond à l'ensemble de ces contraintes.

3) Intégration de l'approche

Afin de pouvoir intégrer les contraintes du client à la conception produit nous nous sommes intéressés aux fonctions de la famille de produits. Un paramétrage fonctionnel des produits fut effectué afin de relier les paramètres de conception aux différentes fonctions. Nous obtenons ainsi un lien dynamique entre les paramètres fonctionnels de la famille de produits et les paramètres de conception de l'ensemble des produits de cette famille. Le changement d'un paramètre fonctionnel entraînera le changement des valeurs des paramètres de conception qui lui sont reliés. Ainsi le changement d'un paramètre fonctionnel sera répercuté sur l'ensemble des produits d'une même famille.

La référence de la pièce ou de l'assemblage est automatiquement affichée sur les plans et les nomenclatures, même s'il s'agit d'une pièce nouvelle (jamais produite auparavant), grâce à un référencement significatif basé sur les fonctions.

Un tableau estimant le coût de chaque fonction de la poulie en fonction du nombre et de la taille des réas a complété le développement. En additionnant l'ensemble des coûts des fonctions, nous avons obtenu un coût global de la poulie.

Un développement a été effectué en utilisant un modèle paramétré CAO et les API (Application Protocole Interface) du logiciel pour automatiser la conception des poulies à partir du choix des fonctions [19]. Du fait de l'ensemble des solutions

apportées, le temps de conception de ces poulies est divisé par 5.

4) Conclusions sur PSL Concept

Nous avons proposé une démarche cohérente en termes de PLM pour cette entreprise. La mise en place d'une structure d'information correspondant à cette démarche et les résultats obtenus nous conforte dans l'idée que ce type d'approche est adapté à une PME mécanicienne de type « équipementier ».

Nous voyons apparaître le besoin de liaisons entre les fonctions du produit et sa définition physique. La prise en compte des contraintes fonctionnelles dans le système PLM au niveau de chaque entreprise de l'entreprise étendue (et de chaque sous ensemble du produit final) nous semble donc une voie de progrès pour l'intégration des PME.

C. Un fabricant de pièces primaires: CAPRICORN

1) Description de l'entreprise et situation initiale

Capricorn réalise des vilebrequins, des cylindres et des pistons pour l'automobile haut de gamme et pour les voitures de course (F1, Nascar, 24H du Mans, Rallye...). Elle entre dans notre typologie comme une entreprise de type « fabricant de pièce primaire ».

Ce type d'entreprise a essentiellement des problématiques de gestion de données techniques liées à la fabrication. En effet, les fabricants de pièces primaires reçoivent généralement les plans et le modèle 3D de la pièce à fabriquer directement de leurs clients. Ils doivent ensuite appliquer leur expertise pour réaliser la gamme du produit.

Lors de la phase d'audit, nous avons identifié les besoins suivants :

Echange externe : les clients envoient directement les fichiers CAO en pièce jointe dans des emails, le plus souvent au format STEP. S'il y a des modifications du modèle initial du client, celui-ci est renvoyé et les modifications doivent être répercutées sur le travail déjà effectué en termes de gamme et de gestion de production.

Diffusion des documents en interne : un dossier Windows partagé sert de lieu d'échange entre le bureau des méthodes, la production et le service commercial.

Capitalisation des connaissances : la première phase de création de la gamme est longue et répétitive. Une accélération de cette phase par un programme semi automatisé doit permettre de lancer les premières phases de production au plus tôt (approvisionnement et premières opérations). Ce gain se répercute directement sur le délai de livraison.

Documentation : chaque opération nécessite une documentation spécifique pour la production. Elles sont réalisées manuellement.

Echange interne : une fois la documentation réalisée, elle doit être envoyée à la production. S'il y a une modification de la pièce initiale, les documents doivent être refaits puis renvoyés à la production.

Le paragraphe suivant propose une approche pour répondre à ces besoins.

2) Proposition

Nous nous sommes concentrés sur le type de produit le plus répandu dans l'entreprise : le vilebrequin taillé masse.

Tout comme la conception de produit, la création d'une gamme de fabrication passe par des choix de solutions qui répondent à un ensemble de contraintes. Chaque acteur participant à la phase de conception de la gamme doit pouvoir intervenir et exprimer ces contraintes.

Le client exprime principalement ses contraintes par la géométrie de la pièce. Le sous traitant permet d'obtenir différents traitements de surface. Le fournisseur dispose d'un ensemble de diamètres pour ces billots servant de brut au vilebrequin. L'atelier se compose d'un certain nombre de machines, plus ou moins chargées, avec des capacités spécifiques...

Enfin, la résolution de l'ensemble de ces contraintes permet de définir partiellement les opérations qui composeront la gamme de fabrication du produit.

3) Intégration de l'approche

Les données techniques sont structurées en trois groupes : les informations venant du produit, directement prélevées du modèle STEP, les informations concernant les centres de charges et les règles métiers. Ces deux dernières sont collectées durant la phase d'audit.

Les macros-gammes sont connues et formalisées. Dans chaque opération de ces macro-gammes, les informations utilisées sont celles relatives à une ou plusieurs faces du produit (surfaces usinées), celles relatives à la machine (surfaces de mise en position) et enfin celles concernant les règles métiers pour créer les opérations détaillées.

Grâce à une reconnaissance de faces basée sur les règles métiers, il est possible de retrouver les différentes entités d'usinage de chaque opération.

A partir du modèle 3D du produit fini, il est possible de reconstruire le brut. Puis chaque enlèvement de matière est simulé. Le résultat est un modèle 3D de chaque intermédiaire.

Le dossier de fabrication est généré à partir des opérations détaillées. Il contient les définitions des différentes opérations des gammes, des outils et des conditions de coupe associées.

Puis ces documents sont sauvegardés et envoyés dans un format sécurisé à la production.

Un programme a été implémenté pour l'automatisation des premières phases de la gamme du vilebrequin (Figure 2).

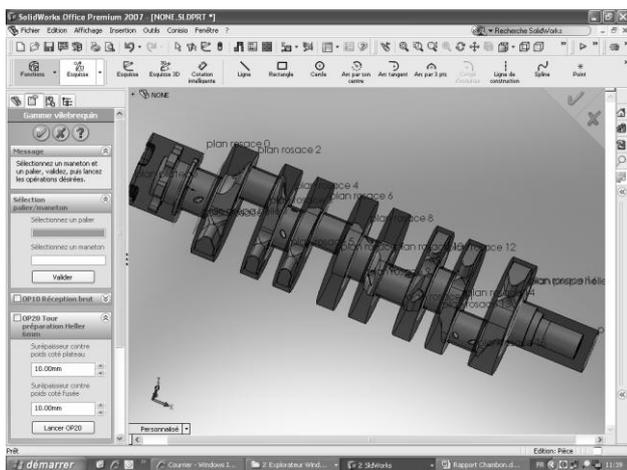


Figure 2: l'interface du programme intégrée dans l'outil CAO

4) Conclusion sur CAPRICORN

Ce cas d'étude a permis d'identifier les différentes données techniques utilisées par le bureau des méthodes lors de la phase

d'industrialisation. Il a également permis d'acquérir les connaissances nécessaires à leur utilisation aussi bien en interne via les processus métier qu'en externe via les échanges avec les clients et la production.

L'intégration de la gestion des gammes de fabrication et des états intermédiaires des produits dans les systèmes PLM est fondamentale pour ce type d'entreprise. Il est possible d'utiliser des standards en vigueur, comme l'AP 214 de STEP, pour formaliser les objets et les données utilisés dans cet exemple. Ainsi l'intégration des gammes de fabrications dans les systèmes PLM est essentielle pour l'intégration des fabricants de pièces primaires.

A. Un fabricant de machines spéciales: SMP

1) Description de l'entreprise et situation initiale

Ce cas d'étude fut effectué chez un fabricant de centres d'affûtage, SMP. Cette entreprise rentre dans notre typologie au niveau des « assembleurs » (Figure 3).

Ce type d'entreprise rencontre principalement des problèmes de gestion de nomenclatures du fait du grand nombre de composants de leurs produits et de la forte personnalisation de ceux-ci.

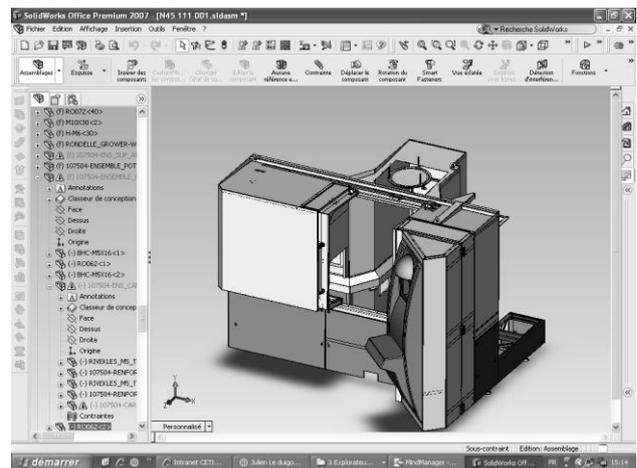


Figure 3: un centre d'affûtage avec plus de 1500 composants

Suite à l'audit effectué, les besoins suivants sont identifiés:

Création de nomenclature : les nomenclatures sont réalisées manuellement dans un tableau en analysant le modèle 3D de la machine, puis elles sont envoyées à la production en version papier.

Gestion des nomenclatures : s'il y a une modification sur une pièce ou un sous-assemblage, l'opérateur doit trouver par lui-même l'ensemble des assemblages impactés par cette modification et les modifier manuellement.

Structuration des nomenclatures : la production et le bureau d'étude n'ont pas la même manière de structurer leurs nomenclatures. La production structure la nomenclature pour optimiser les stocks selon l'ordonnancement. Le bureau d'étude structure la nomenclature pour optimiser la réutilisation des sous-assemblages CAO. D'où une difficulté accrue pour impacter les modifications.

Intégration des nomenclatures dans l'ERP : l'intégration de la nomenclature dans l'ERP de l'entreprise se fait manuellement.

Le prochain paragraphe va expliquer notre proposition pour améliorer la situation initiale.

2) Proposition

Comme nous l'avons vu dans les deux exemples précédents, les contraintes sont émises par différents acteurs du développement de produit pour définir un problème de conception. Afin que ses acteurs puissent intégrer eux-mêmes leurs contraintes sans l'aide d'un cognicien, il faut qu'ils puissent utiliser leurs propres modélisations du produit. Ainsi le bureau d'étude exprime ces contraintes sur une structure qui lui est propre, celle de la CAO, et la production exprime ces contraintes sur une structure liée à l'ERP. Ces contraintes s'intègrent sur le même produit. L'ensemble de ces contraintes permet la définition du problème à résoudre.

3) *Intégration de l'approche*

L'approche proposée est basée sur une double vue de la nomenclature. En utilisant un fichier tampon intégrant l'ensemble des données nécessaires à la création des deux nomenclatures mais sans structure particulière, les deux nomenclatures basées sur des attributs communs sont accessibles.

Tout d'abord les différentes informations requises par le bureau d'étude et la production sont sélectionnées. Une liste de ces attributs est construite pour chaque produit, assemblage et sous-assemblage.

Puis la nomenclature du bureau d'étude est créée en extrayant du fichier tampon uniquement les attributs voulus et ils sont restructurés en prenant comme modèle l'arborescence de la CAO.

Une deuxième nomenclature est créée pour la production, toujours en extrayant les attributs du fichier tampon. La structure appliquée est cette fois-ci celle de l'ERP.

S'il y a une modification, ce sont les attributs du fichier tampon qui sont modifiés, permettant de mettre à jour les deux nomenclatures bureau d'étude et production.

Si une modification touche une pièce, tous les produits contenant cette pièce seront automatiquement modifiés.

4) *Conclusion sur SMP*

Ce cas d'étude a permis d'identifier les données techniques qui sont transférées entre le BE et la production dans cette entreprise.

Il a également permis d'acquérir les connaissances nécessaires à leur transfert et tout spécialement en ce qui concerne la gestion des multi-vues sur un produit.

Si les problèmes de gestion de nomenclatures sont déjà largement abordés dans les approches PLM actuelles, les notions de multi-vue et de vue partielle sont encore une source de progrès pour l'intégration des PME. En effet, une vue centrée sur les objets et les processus que gèrent les PME permettrait une meilleure appropriation du système par celles-ci.

B. Synthèse des immersions

Durant cette phase d'immersion nous avons mis en place une approche de type gestion de la connaissance avec tout d'abord une extraction des connaissances métier, puis une structuration de ces connaissances et enfin une intégration de celles-ci dans une application logiciel. La validation de ces travaux s'est fait par une phase de test du logiciel par l'expert.

Extraction des connaissances métiers : la première phase de chaque immersion fut une extraction des données manipulées par l'expert ainsi que des règles mises en œuvre par celui-ci pour les traiter. Afin d'obtenir ces informations, deux méthodes sont utilisées:

- Observation de l'expert dans l'exercice de sa fonction : cela a permis d'avoir un premier aperçu de l'utilisation des données techniques dans l'entreprise. Les conversations avec celui-ci a permis de recueillir les connaissances explicites liées à l'utilisation des données techniques dans son métier.
- La pratique du métier de l'expert : afin d'approfondir nos connaissances liées à l'utilisation de ces données, nous avons ensuite directement pris la place de l'expert derrière son poste de travail. Cela a permis d'extraire les connaissances implicites qui étaient sous-entendues ou non formalisées par l'expert.

Structuration : la mise en place des méthodes a nécessité la structuration des données techniques par groupe (objets et attributs) et la structuration des règles métiers sous forme d'algorithmes.

Intégration : l'automatisation de ces méthodes via des programmes informatiques a permis de réaliser l'intégration des données techniques et des règles métiers dans un logiciel validé dans l'entreprise.

Cette phase d'immersion a permis de définir les besoins des entreprises en termes de données techniques. Nous allons à présent synthétiser ces besoins et en extraire les besoins génériques des entreprises.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les applications spécifiques mises en place dans les entreprises pilotes sont trop spécialisées pour être directement intégrées à un modèle générique pour l'ensemble des entreprises. Certaines données et certains processus sont réellement spécifiques au produit fabriqué par l'entreprise ou à son processus d'élaboration. Néanmoins certains types d'objets peuvent être traités de manière globale au sein de l'entreprise étendue, contenant des attributs standards et d'autres spécifiques.

Nous sommes actuellement en train de développer une approche reposant sur un méta-modèle pour supporter le développement de produit en entreprise étendue. En nous basant sur le cahier des charges défini précédemment et sur les standards en vigueur, nous proposerons prochainement une méthode et un méta-modèle support au développement de produit en entreprise étendue.

VI. REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les entreprises PSL Concept, Capricorn et SMP pour nous avoir permis d'effectuer notre phase d'immersion dans leur locaux ainsi que pour leur soutien technique.

VII. REFERENCES

- [1] Cetim, 2007, *Enquête de besoin sur le travail collaboratif*, Document interne.
- [2] Cetim, 2007, *Etude sur les besoins en PLM*, Document interne.

- [3] Terzi, S., 2005, *Element of Product Lifecycle Management: Definitions, Open Issues and Reference Models*, PhD thesis, Université Henry Poincaré Nancy-I.
- [4] CIMdata Inc., 2003, *Product Lifecycle Management "Empowering the future of business"*.
- [5] Bacha, R., 2002, *De la gestion des données techniques pour l'ingénierie de production. Référentiel du domaine et cadre méthodologique pour l'ingénierie des systèmes d'information techniques en entreprise*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.
- [6] Nguyen Van, T., 2006, *System engineering for collaborative data management systems: Application to design/simulation loops*, PhD thesis, Ecole Centrale Paris.
- [7] VIVACE: Value improved through a Virtual Aeronautical Collaborative Enterprise, *Final technical achievements*, 2007, à l'URL <http://www.vivaceproject.com>
- [8] Ben Yahia, N., *Elaboration automatique de processus d'usinage : application aux entités de fraisage*, thèse de doctorat ENIT 2002.
- [9] Delplace, J.C., 2004, *L'Ingénierie numérique pour l'amélioration des processus décisionnels et opérationnels en fonderie*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [10] Martin, L., G. Moraru, P. Véron, *Development of an integrated tool for the foundry industry*, 6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME), Grenoble, France, 17-19 may 2006.
- [11] Boujut, J.F., *Un exemple d'intégration des fonctions métier dans les systèmes de CAO : la conception de pièces forgées tridimensionnelles*, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993
- [12] Thibault, A., Siadat, A., Bigot, R., Martin, P., *Method For Integrated Design Using a Knowledge Formalization*, Digital Enterprise Technology, Springer, pp 577-584
- [13] Beylier, S., 2007, *une approche collaborative de la gestion des connaissances, application à une PME du secteur de l'ingénierie numérique*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble
- [14] Eynard, B., Léinard, S., Charles, S., Odinet, A., 2005, *Web based collaborative Engineering support system: application in mechanical design and structural analysis*, Concurrent Engineering: Research and application, Vol 13, n°2, pp 145-153
- [15] Chen, D., Doumeingts, G., 2003, *European initiatives to develop interoperability of enterprise applications – basic concepts, frameworks and roadmap*, annual reviews in control 27, pp 153-162
- [16] El Khalkhali, I., Ghodous, P., Martinez, M., Fravel, J., 2002, *An information infrastructure to share product models using STEP standard*, 9th IPSE international conference on concurrent engineering: research and applications, Cranfield University, 27th-31st July 2002.
- [17] Chambolle, S., 1999, *Un modèle produit piloté par les processus d'élaboration : Application au secteur automobile dans l'environnement STEP*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.
- [18] Projet RNTL IPPOP (Intégration Produit – Processus - Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie), 2007, à l'URL <http://projects.opencascade.org/IPPOP>
- [19] Le Duigou, J., Bernard, A., Delplace, J.-C., Gabriel, S., 2008, *Approche globale pour la gestion de données techniques, application à une famille de poulies d'accastillage*, MOSIM, Paris.