

Cadre de modélisation pour la représentation de la connaissance à l'aide de la conception et l'évaluation de variétés de produits

A. Giovannini

Cette thèse est le résultat de la collaboration entre la société Trane et le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), unité mixte de recherche de l'Université de Lorraine et le CNRS. Cette thèse est incluse dans le cadre CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche). Durant les trois ans de travaux sur cette thèse, le contexte Trane a été caractérisé par un projet sur le développement d'un nouveau produit personnalisable. Ce produit a été conçu par une équipe d'ingénieurs dans le sud de l'Europe et a dû être fabriqué dans plusieurs sites de Trane, en Europe et dans le reste du monde. Le projet a représenté deux principaux défis pour Trane: le transfert de la connaissance liée au produit et l'harmonisation de l'hétérogénéité coté clientèle et processus de fabrication. Ces deux défis de projet sont devenus la motivation de la collaboration entreprise-laboratoire et ainsi l'origine de cette thèse.

Résumé

Aujourd'hui, dans plus en plus de segments de marché, une grande variété de besoins (*personnalisation*) et des hauts volumes (*de masse*) font de l'approche ETO (ingénierie à la commande) et de l'approche MTS (fabrication pour stock) des approches inefficaces. En effet, l'approche ETO est généralement adoptée lorsque les clients ont des exigences très spécifiques. Par conséquent, à chaque entrée de commande, de nouvelles exigences sont formalisées et un nouveau processus de conception doit être exécuté. Cette stratégie est plausible lorsque de faibles volumes de produits (différents) sont nécessaires, sinon trop de processus de conception doivent être effectués.

Au lieu de cela, l'approche MTS est généralement adoptée lorsque les exigences des clients sont homogènes. Par conséquent, à chaque entrée de commande, les clients ne spécifient que le volume du produit dont ils ont besoin. D'un point de vue de l'ingénierie, tout le travail est déjà réalisé. Idéalement les produits doivent être déjà en stock avant que la commande arrive d'où la fabrication pour stock. Cette stratégie s'adapte naturellement quand des volumes élevés et une faible variété de produits sont demandés.

Par conséquent, aucune de ces deux approches n'est adaptée au scénario de personnalisation de masse: c'est-à-dire des volumes élevés et une forte variété d'exigences parmi les clients. En effet, lorsque la cible d'une entreprise est un segment de clientèle avec ces caractéristiques, une stratégie

CRAN UMR 7039

de fabrication à la commande (MTO) est souvent adopté: l'entreprise propose à la clientèle un ensemble de produits déjà conçus qui, à l'entrée de commande, ne devrait qu'être fabriqué. Afin d'adopter cette stratégie, les entreprises ont besoin d'une approche différente pour la conception du produit: la conception de la variété. En concevant un ensemble de produits, à savoir une variété de produits (PV), pendant un unique processus de conception, les entreprises peuvent garantir aux clients un bon niveau de personnalisation et une réactivité appropriée pour réagir à la demande de volumes élevés de produits.

Cette thèse met en évidence un besoin fondamental dans les approches pour la conception d'une PV: **la nécessité d'avoir une approche qui permet de concevoir la variété (l'ensemble) et les variantes de produit (les membres de cet ensemble) pendant le même processus de conception.**

Ce point est essentiel lorsque la cible de l'entreprise est un ensemble de clients exprimant un haut degré de variété des besoins. En effet, dans ce cas, il ne est pas possible de concevoir individuellement les variantes avant de commencer la phase de conception de la variété, c'est-à-dire que, un trop grand nombre de processus de conception devrait être requises. Malheureusement, la conception individuelle est la principale exigence de toutes les méthodes examinées pour la conception de PV. Et, dans les méthodes examinées, cela est dû à un manque de représentation des connaissances de conception, nécessaire pour connecter de façon **non ambiguë** 1) les exigences du client aux produits qui devraient répondre aux exigences et 2) les produits aux processus de fabrication qui devraient être capables de les fabriquer. 1) L'ambiguïté de la définition des profils de clients et 2) le manque de connaissances de conception empêche les méthodes actuelles de la littérature de concevoir un PV sans définition initiale des variantes individuelles.

Afin de faire face à ce manque, nous proposons, dans ce travail, un cadre de représentation des connaissances sans ambiguïté, une méthode pour déployer ce cadre et un critère pour concevoir et évaluer des alternatives PV. A partir de trois questions industrielles sur la conception de PV, nous nous sommes concentrés sur la définition d'un **cadre de modélisation pour la représentation non ambiguë de la connaissance (KR)** à l'aide de la conception des variantes et de la variété dans le même processus de conception. Nous avons appliqué le cadre à la génération des alternatives de PV. Enfin, nous proposons un critère pour les évaluations des alternatives. Les propositions présentées représentent les résultats de nos travaux sur la formalisation des connaissances et sur la façon de relier les connaissances de conception formalisée avec les clients.

Les principaux points de notre contribution sont les suivants.

- Le concept de **mesure** a été développé pour fournir un **cadre pour le KR sans ambiguïté**. Le concept de mesure, à partir de la transposition du concept de perception dans les travaux des **anti-logicistes**, permet de formaliser les connaissances en évitant l'instanciation des concepts et le raisonnement abstrait. De cette manière, il est possible de garantir une **interprétation unique** de la connaissance représentée.

- Le déploiement de ce cadre permet le développement d'un modèle de connaissances de conception multi-domaine qui représente actuellement le seul soutien pour effectuer une conception simultanée de variété et variantes. C'est pourquoi, notre approche est également pertinente dans le domaine de la gestion de variété.
- Les solutions de l'évaluation de PV ont été comparées compte tenu de l'impact des variables de **lot streaming** sur les coûts de fabrication des PV. Nous avons montré que l'hypothèse de proportionnalité de variété / coûts (très commune dans la littérature) peut être inversée. A partir d'une modélisation lot streaming, nous avons étudié la nature des relations de variétés / coûts pour proposer un nouveau critère pour l'évaluation globale des alternatives de PV.

Afin de soutenir nos positions, nous avons développé:

- un algorithme pour démontrer l'absence d'ambiguïté dans notre modèle de KR basés sur le cadre de modélisation proposé; cet algorithme a été appliqué sur une batterie à eau froide. Notre objectif était de montrer comment le processus de mise en correspondance entre deux morceaux de connaissances est basé uniquement sur la syntaxe: c'est-à-dire en évitant l'instanciation de concept abstrait, le cadre garantit l'interprétation unique de chaque atome de connaissance représenté;
- un modèle lot streaming formalisé avec un MINLP (programme non linéaire à variables mixtes) a été présenté; ce modèle a été résolu avec le solveur Lingo pour étudier les relations variété / coûts; le résultat de l'analyse a montré la pertinence de la taille du sous-lot et les opérations qui se chevauchent quand une évaluation des PV est effectuée.

Les outils déployés pour la mise en œuvre des approches proposées sont les suivantes.

- Une méthode pour instancier notre cadre et enrichir les fichiers CAD a été proposée. Cette méthode a été appliquée sur CATIA mais elle est théoriquement applicable sur tous les logiciels de CAO paramétrique. Cette méthode peut aider la conception de variétés de produits-processus en fournissant:
 - o une façon non ambiguë pour connecter des éléments de connaissance de différents domaines de connaissance;
 - o une approche pour construire des modèles PV robustes à l'exigence de changement des clients.
- Un outil Java pour transformer la variété de client et la variété de processus en un ensemble de problèmes MINLP a été mis au point. L'outil fournit également une interface avec un solveur de MINLP (Lingo) pour la génération des alternatives de PV et pour la formulation du problème d'optimisation de PV.

Implications scientifiques

La première question de recherche définie dans cette thèse est la suivante.

RQ1 - Comment modéliser la variété afin de soutenir un processus de conception de PV qui tient compte des connaissances qui concernent les profils des clients, les variantes de produits et les variantes de processus de fabrication?

La mise en œuvre proposée utilise CATIA V5 pour formaliser la connaissance du produit et de processus. La connaissance est formalisée suivant le cadre de modélisation proposé. Cela permet de récupérer et de relier les connaissances venant de différents domaines sans ambiguïtés. Dans l'étude de cas, nous avons montré comment une conception de PV peut être effectuée pour une variété de batteries à eau froide. La formalisation des profils de clients, des produits et des caractéristiques des processus au travers des mesures (par exemple, des températures, des diamètres, caractéristiques des outils de poinçonnage) permet de construire un modèle de PV qui considère simultanément les clients, les produits et les processus. Pour la récupération et la connexion des connaissances nécessaires pour satisfaire les exigences des clients, l'absence d'ambiguïté était nécessaire. Même les différents atomes de connaissance peuvent être mappés sans ambiguïté, comme indiqué lors de la mise en œuvre d'un algorithme approprié.

Le modèle de connaissance représente la connaissance de la conception et donc fournit un soutien à une approche de conception de PV. La mise en œuvre de ces connaissances pour générer des alternatives de PV a été montrée.

Les limites de la solution proposée, concernent principalement la complexité de la connaissance et le nombre de variantes.

- Le cadre proposé fournit une KR non-ambiguë qui permet de ne travailler que sur la syntaxe pour la recherche de la connaissance et le mapping. Du moment que la syntaxe est basée sur un ensemble de valeurs pour les propriétés, plus la complexité augmente plus la connaissance devient difficile à gérer : la résolution des modèles MINLP pourrait ne pas être réalisable en un temps raisonnable. En effet, même pour la batterie à eau qui n'est qu'un composant relativement simple des produits vendus par Trane, le temps de résolution pour tester si un processus est approprié pour un client prend environ 10 secondes. Pour les composants et systèmes plus complexes, le temps de résolution pourrait représenter une limite. Pour l'instant, ni approximations ni heuristiques n'ont été développées pour réduire la complexité du problème.
- Si le point ci-dessus concerne la complexité d'un seul couple client-processus, la même question de traitabilité peut être mise en évidence pour le nombre de couples à tester. En effet, dans l'étude de cas, seuls 2 000 couples sont testés sur les deux sites de production (1 000 couples / site). Aussi ici, ni approximations ni heuristiques n'ont été développées. Par conséquent toutes les possibilités (même les moins crédibles) sont considérées pour les tests de faisabilité.

La deuxième question de recherche identifiée dans cette thèse est la suivante.

RQ2 - Comment comparer les différentes alternatives de variété de processus, c'est-à-dire les variétés de processus qui permettent de fabriquer des PV capables de répondre à la même variété de clients?

Le logiciel Lingo a été utilisé pour représenter le modèle du problème d'optimisation de PV et de le résoudre. Afin d'obtenir une solution dans un délai raisonnable, certaines adaptations du modèle d'optimisation initial ont été proposées. Le cas de la batterie à eau a montré la faisabilité de l'approche proposée pour comparer les différents PV, même en tenant compte du fait que la fabrication pouvait être effectuée sur deux systèmes de production différents. En effet, la non-ambiguïté fournie par le cadre de KR a permis ce genre de comparaisons. Dans l'étude de cas nous avons comparé les paramètres du procédé et les décisions stratégiques (externalisation de la production des tubes en cuivre) concernant deux systèmes de production différents.

Concernant cette proposition, deux limites peuvent être identifiées.

- L'approximation du problème de lot streaming représente une limite en soi. En fait, cette approximation peut conduire à des PV sous-optimales lorsque les coûts alloués sur le temps d'attente sont beaucoup plus pertinent que d'autres coûts, c'est-à-dire lorsque l'effet de l'approximation devient plus évident.
- La linéarisation représente une autre limite. En effet, la suppression de la contrainte d'intégrité pour les tailles de lot peut entraîner des problèmes d'arrondi difficiles pour les petites tailles de lots.

De la discussion sur les impacts et les limites des approches proposées sur les questions de recherche, nous tirons les perspectives de recherche suivantes.

A propos de la représentation des connaissances

Comme indiqué avec l'algorithme pour démontrer l'absence d'ambiguïté de notre KR, un mapping et une récupération des connaissances et la recherche est possible en se basant uniquement sur la syntaxe de la représentation. La principale perspective liée à notre cadre de représentation des connaissances est de comprendre en profondeur l'implication d'une représentation de la connaissance sans ambiguïté sur des problèmes tels que le mapping automatique de connaissances. En effet, les méthodes dans la littérature qui effectuent le mapping des connaissances sont au plus semi-automatique. De plus, cette même conclusion peut conduire à une certaine amélioration concernant l'automatisation de la récupération et de la réutilisation des connaissances. Du moment que ce processus repose également sur la comparaison de volume sur la CAO, ici aussi, un algorithme approprié peut fournir un soutien plus efficace.

A propos de la taille et la complexité du problème de conception

- Afin de faire face aux limites concernant le nombre et la complexité des tests de faisabilité clients-processus, l'accent peut être mis sur le développement d'un algorithme qui peut agrandir la taille des instances de problèmes de conception PV traitables. Par exemple, cet algorithme pourrait exploiter les similitudes entre les tests de faisabilité client-processus. En

effet, même s'il n'est pas possible d'identifier un motif entre les contraintes des problèmes MINLP (elles ne dépendent que de la connaissance de la conception), les tests de faisabilité impliquent toujours une vérification d'intervalles. Si pour un ensemble l'inversion en utilisant l'analyse d'intervalle est possible, la variété serait vérifiable dans une étape unique (c'est à dire, la projection de la variété de processus sur le domaine du client serait faisable dans une étape unique au lieu de vérifications unitaires client-processus), ce est à dire sans l'exigence de la discrétisation des domaines.

- Si la perspective précédente concerne les limites des tests de faisabilité, l'étude d'un algorithme approprié peut aussi surmonter l'approximation des contraintes de lot pour le problème d'optimisation de PV. En effet, une étude plus approfondie de la littérature de lot streaming peut fournir la base pour le développement d'un algorithme efficace pour prendre en compte l'intégrité des lots en préservant un temps d'exécution raisonnable.

Implications industrielles

Le premier enjeu industriel est le suivant.

1 - Si un client décrit ses exigences à plus d'un vendeur, plus d'un produit résultant peut être proposée au client (pour les mêmes besoins). Les variantes de produits proposés sont-elles bonnes pour le client? Y a-t-il une meilleure alternative pour le client? Y a-t-il une meilleure alternative pour Trane? Et ainsi, étant donné un ensemble de clients, comment concevoir un PV qui représente la meilleure façon de couvrir les besoins des clients?

Dans l'étude de cas, nous avons montré comment un profil de client peut être formalisé en n'utilisant que des mesures. Cela permet la non-ambiguïté de la définition des besoins du client et donc deux vendeurs ne devraient pas associer les mêmes exigences des clients à des profils différents. En effet, le résultat de l'optimisation de PV sur Lingo fournit la liste optimale des couples client-processus. Cette liste devrait être au cœur de l'outil pour la gestion de configuration dans l'entreprise. Puis, quand un ensemble de besoins des clients est défini comme mesures, les exigences sont connectés d'une manière non équivoque au processus optimal qui peuvent les rencontrer. Lorsque plus d'un processus est connecté à un profil de la clientèle, la décision est basée sur la quantité de clients que le processus devrait satisfaire (par exemple la fabrication du produit pour répondre aux exigences liées à la clientèle) et la quantité de client que le processus a déjà satisfaits.

Le deuxième enjeu industriel formalisé est le suivant.

2 - Est-il possible de conjuguer les efforts de conception et de réduction des coûts de fabrication locale? En d'autres termes, comment lier la variété de produits C et la variété de processus D afin d'imposer à D seulement les contraintes qui garantissent la satisfaction des exigences des clients? Et par conséquent, quelle est la façon de trouver la meilleure variété de processus, c'est à dire, le meilleur sous-ensemble de D?

Comme le montre le cas de la batterie à eau, la formalisation des connaissances proposée permet de conjuguer connaissances de produit et de processus dans le même modèle. Ce faisant, les ingénieurs de produit définissent seulement la connaissance qui est essentielle pour répondre aux demandes des clients. Le reste des mesures est inclus dans les degrés de liberté des ingénieurs de processus. De cette façon, il est également possible de formaliser dans le même modèle, la connaissance des produits et une connaissance des processus de fabrication par rapport à plusieurs usines de fabrication. Dans l'étude de cas, nous avons montré comment deux systèmes de production peuvent être modélisés dans le même problème d'optimisation de PV.

La troisième question industrielle définie est la suivante.

3 - Chez Trane, les commandes spéciales (faites par des clients non-prévus pendant le processus de conception de la PV) peuvent représenter 20% des ordres de certaines variétés de produits. Quelle est la bonne façon de lier la phase de conception principale (c'est à dire liée à la PV) avec les secondaires (c'est à dire pour les commandes spéciales)? Un modèle de PV peut-il adapter l'offre de produits aux nouvelles exigences des clients? Si oui, comment le modéliser?

Comme l'a montré l'extraction de connaissances sur CATIA et dans la mise en œuvre de l'algorithme de cartographie des connaissances, les expériences représentées peuvent être récupérées et réutilisées sans interprétation humaine et donc sans ambiguïtés possibles. Ainsi, ce cadre permet de construire des modèles de PV qui sont totalement réutilisables.

Prenons une éventuelle exigence particulière X.

- L'exigence X peut concerner une nouvelle mesure à contraindre.
 - o Si la mesure est déjà présente dans le modèle de PV, afin de réutiliser le modèle, il suffit de contraindre la mesure dans le modèle et donc supprimer automatiquement un degré de liberté pour les ingénieurs.
 - o Si la mesure ne est pas présente dans le modèle PV, des nouvelles connaissances sont nécessaire pour répondre X.
- L'exigence X peut concerner une nouvelle valeur pour une certaine propriété mesurée.
 - o Si la valeur est comprise dans la plage des valeurs de la propriété dans le modèle PV actuel, aucun changement n'est nécessaire pour réutiliser le modèle PV.
 - o Si la valeur ne est pas incluse dans la plage des valeurs de la propriété dans le modèle PV actuel, la récupération d'une nouvelle expérience est requise. Si elle n'existe pas, alors des nouvelles connaissances sont nécessaire pour répondre à l'exigence X.

L'approche proposée pour représenter la connaissance de conception peut être utilisée pour développer une base de connaissances qui comprend, par exemple, la représentation des morceaux de connaissances décrivant le comportement des composants qui sont partagés entre plusieurs PV Trane (par exemple compresseurs, échangeurs de chaleur, panneaux de tôle, des ventilateurs et

autres). Cette représentation peut accélérer les nouvelles étapes de développement de produits. En outre, l'utilisation de ce type de représentation peut fournir une grande amélioration dans la réactivité quand une nouvelle variante est nécessaire ou une PV doit être renouvelée ou une PV doit être fabriquée par une autre usine et ainsi de suite. Par exemple, un *plug-in* peut étendre l'outil de gestion configuration pour effectuer automatiquement des petites modifications de conception pour répondre à certaines commandes spéciales.

Lorsque la taille de la variété devient trop grande, l'approche proposée peut être difficile d'être déployée. Dans ce cas, un degré de variété de processus peut être fixé (pour contenir les coûts, par exemple, limiter la production de certaines usines de fabrication, machines, outils, etc.) et la projection sur les profils de la clientèle qui est possible pour satisfaire peut être étudiée. Par exemple, une expérience peut être conçue pour comprendre comment les processus couvrent le domaine de la clientèle en ne testant que les couples client-processus les plus pertinents. De cette manière la solution extensive des problèmes de MINLP complexes peut être évitée. La mise en œuvre de cette perspective ne devrait pas nécessiter de grandes modifications au prototype développé. Une autre perspective liée à la contrainte de taille est le développement d'une heuristique appropriée.

Dans le même sens, une projection sur le domaine de la clientèle peut être effectuée pour comprendre comment une PV existante peut couvrir les besoins du client. Cela peut être utile lorsque, au stade de la conception, la définition de l'ensemble de la clientèle était floue. Au travers de l'utilisation du cadre proposé, la définition de la variété à la clientèle peut être représentée sans ambiguïté. Cette définition et la connaissance de la conception peuvent être utilisées pour comprendre si la PV actuelle comprend des variantes qui sont liées à aucun client, les clients qui ne sont pas satisfaits et / ou un degré de plus de variété que celle requise dans le domaine du client. Aussi cette mise en œuvre de cette perspective ne devrait pas nécessiter de grandes modifications au prototype développé.