

Utilisation des ontologies pour supporter la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique

ABADI Asmae, SEKKAT Souhail, ZEMMOURI El Moukhtar, BEN-AZZA Hussain

Département du Génie Industriel et Productique
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ENSAM
Meknès, Maroc

asmae.abadi@gmail.com; s_souhail@hotmail.com; zemouri@yahoo.fr; hbenazza@yahoo.com

Résumé—L'entreprise se trouve aujourd'hui plus que jamais dans un environnement hautement concurrentiel qui lui exige d'améliorer en permanence la qualité de ses produits tout en optimisant leurs coûts et leurs temps de développement. Afin d'atteindre ces objectifs, la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée se révèle comme solution pertinente. Toutefois, la réalisation d'une telle approche exige une étroite collaboration entre les différents partenaires et nécessite un échange intensif de données entre eux. Ces données techniques doivent être transmises, interprétées, gérées, réutilisées et stockées d'une manière cohérente et standardisée. Avec l'émergence des ontologies comme un nouveau paradigme de modélisation des informations dans l'industrie, cette piste d'intégration et d'interopérabilité est devenue prometteuse. L'objet de ce travail consiste à définir une démarche méthodologique pour montrer comment les ontologies peuvent être utilisées comme élément intégrateur et comme support efficient pour la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée. Une analyse des points forts des ontologies, surtout en termes d'expressivité et de raisonnement, une revue des travaux antécédents et une proposition d'une nouvelle approche couplant points forts des ontologies et modèles mathématiques d'optimisation seront effectuées.

Mots clés—Ontologies; conception simultanée; chaîne logistique; optimisation; interopérabilité sémantique ; intégration.

Keywords—Ontologies; concurrent design; supply chain; optimization; semantic interoperability; integration.

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les entreprises industrielles évoluent dans un environnement socio-économique très dynamique et ouvert qui les obligent à fonctionner dans des conditions concurrentielles. En effet, les besoins des clients sont devenus très changeants au fil du temps et par conséquent, les cycles de vie des produits deviennent de plus en plus courts. L'entreprise doit être alors réactive à cette perpétuelle dynamique et capable d'innover constamment et de répondre vite et sans erreurs aux besoins de ses clients.

Afin d'atteindre ce niveau de réactivité et de flexibilité, les entreprises sont devenues conscientes qu'un effort local d'amélioration de leurs moyens de production et la réalisation

de bons plannings de production ne suffisent pas. Une étroite collaboration et une intégration des différents acteurs de la chaîne logistique s'avèrent indispensables pour l'atteinte des objectifs de coût, de qualité et de délais et pour que les entreprises résistent sur le marché.

D'après [1], une meilleure efficacité peut être atteinte si cette intégration se fait au début du cycle de vie du produit, en l'occurrence, dès sa conception. En effet, la conception est la phase clé du cycle de vie du produit durant laquelle est décidée la grande majorité des caractéristiques et des comportements du futur produit, ainsi que de toute sa chaîne logistique. C'est une phase qui ne consomme en général qu'environ 5 à 10% du coût du produit, pourtant elle détermine plus de 80% des coûts de l'ensemble de son cycle de vie [2]. Par conséquent, les entreprises ont intérêt à intégrer les contraintes de la chaîne logistique dès les premières phases de conception du produit.

Dans ce même contexte, une révolution de l'ingénierie séquentielle à l'ingénierie simultanée ou concurrente a vu le jour. En outre, l'ingénierie simultanée vise à éliminer les lacunes des approches séquentielles lentes et ne permettant d'atteindre que des solutions optimales localement (par maillon logistique). Elle propose un chevauchement de tâches afin d'avoir une meilleure prise en compte des contraintes de chaque métier tout au long du cycle de développement du produit. Ainsi, le développement des nouveaux produits est devenu un processus collaboratif réalisé par un ensemble d'équipes pluridisciplinaires qui coordonnent entre elles.

Cependant, la réalisation d'une telle approche exige une étroite collaboration entre les différents partenaires et nécessite un échange intensif de données entre eux. En effet, chacun des membres contribuant au développement du produit a besoin d'accéder à un ensemble d'informations et de connaissances distribuées dans plusieurs systèmes d'information (internes ou externes à son organisation) et ceci afin qu'il puisse faire ses choix efficacement tout en prenant en considération toutes les contraintes exigées. Il a également besoin de partager ses décisions et données avec d'autres partenaires qui en auront besoin. Toutefois, chaque inter-acteur du réseau a son propre domaine d'expertise et chacun d'entre eux parle son propre langage. Pourtant, les données échangées doivent être transmises, interprétées, gérées, réutilisées et stockées d'une

manière cohérente et standardisée afin d'atteindre les objectifs attendus. On constate alors qu'en plus des problèmes d'interopérabilité technique et organisationnelle se rajoutent des problèmes d'interopérabilité sémantique, ce qui constitue de vrais verrous devant le développement collaboratif du produit et de sa chaîne logistique. De ce fait, de nombreux travaux se sont intéressés à la résolution des problèmes d'interopérabilité. La norme ISO-14258-1998 [3] définit trois façons de l'aborder, en l'occurrence, l'intégration, l'unification et la fédération. Une analyse de ces trois approches sera effectuée dans la suite du papier et ceci dans l'objectif de démontrer qu'une approche fédérative serait plus pertinente pour satisfaire les objectifs d'agilité, de robustesse et de flexibilité indispensables pour la réalisation d'une conception conjointe du produit et de la chaîne logistique associée.

Avec l'émergence des ontologies comme un nouveau paradigme de la modélisation des informations dans l'industrie, l'atteinte de la fédération est devenue possible [4]. Ainsi, une nouvelle piste d'intégration et d'interopérabilité est devenue prometteuse. En effet, les ontologies permettent non seulement d'échanger des informations entre systèmes sans perte de sémantique mais elles offrent également la possibilité d'inférer de nouvelles informations à partir de celles déjà existantes [5].

Notre objectif dans ce papier est d'utiliser les ontologies comme élément intégrateur et comme support efficient pour la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée.

Pour ce faire, dans la section 2 de ce papier, nous allons analyser les exigences de la conception simultanée. Ensuite, dans la 3^{ème} section, nous allons proposer un survey général sur les ontologies et sur leurs points forts, surtout en termes d'expressivité et de raisonnement. La 4^{ème} section comportera une revue de la littérature et une analyse des différentes applications des ontologies, surtout pour l'ingénierie simultanée. Finalement dans la partie 5, nous allons proposer une approche couplant les modèles à bases d'ontologies et les modèles mathématiques pour supporter la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée.

II. LA CONCEPTION SIMULTANEE DU PRODUIT - CHAINE LOGISTIQUE ET LE PARADIGME DE L'INTEROPERABILITE

De nos jours, le développement des produits devient de plus en plus collaboratif. En effet, il s'agit d'un processus complexe durant lequel un ensemble de décisions primordiales (concernant l'architecture du produit, son processus de fabrication, le choix des différents maillons de sa chaîne logistique...) doivent être prises [6]. La phase de conception y apparaît éminemment stratégique. Il serait alors judicieux d'étudier en premier lieu les caractéristiques et les exigences de cette phase de conception en général et de l'approche de conception simultanée en particulier.

A. Vers une conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique

Selon [7], 85% des coûts logistiques sont induits par les décisions prises lors de la phase de conception. Ceci explique le nombre considérable de travaux qui se sont intéressés aux stratégies de conception produit – chaîne logistique.

Dans la littérature, on distingue trois approches pertinentes pour la conception conjointe du produit et de sa chaîne logistique correspondante:

- *La conception de la chaîne logistique en considérant les contraintes du produit* : Cette approche consiste à proposer des modélisations de la chaîne logistique prenant en compte la nomenclature du produit. Cette une approche qui suppose que la nomenclature du produit existe déjà.
- *L'intégration des contraintes logistiques dans la conception du produit* : A l'inverse de la première approche, cette approche consiste à intégrer les besoins, les spécificités et les contraintes des fonctions métiers responsables des étapes aval du cycle de vie du produit dès les premières phases de conception du produit. On parle ici, par exemple, des méthodes DFL (Design for Logistics) et DFSCM (Design For Supply Chain Management).
- *La conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique* : C'est l'approche récente au niveau de laquelle la conception est réalisée par des équipes pluridisciplinaires organisées de manière à faciliter les échanges entre les différents métiers participant au développement du produit [8]. Le principe de cette approche est que la conception du réseau logistique doit se faire en interaction avec le processus de conception du produit. D'une part, les spécificités du produit, définies par le cahier de charges, doivent être considérées pour déterminer la structure du réseau logistique. D'autre part, les contraintes de la chaîne logistique doivent être intégrées dans la phase de conception du produit. La chaîne logistique doit être flexible et réactive aux éventuelles reconceptions des produits. Cette approche se concrétise par les travaux [9] et [10] à titre d'exemples.

Ce papier rejoint la troisième approche où la conception du produit et de la chaîne logistique correspondante se font d'une manière simultanée. Au contraire des travaux antécédents, nous ne nous contenterons pas uniquement des modèles mathématiques d'optimisation pour atteindre les objectifs de la phase de conception mais nous exploiterons également les capacités d'inférence des ontologies pour le faire.

Ce travail se démarque de la littérature antécédente par le traitement d'une problématique double en utilisant un même outil : les ontologies. En effet, en plus de la problématique d'optimisation, nous aborderons la problématique de partage d'information entre les inter-acteurs de l'entreprise virtuelle ainsi que les problèmes d'interopérabilité sémantique entre leurs systèmes d'information.

B. Caractérisation des informations et des connaissances dans la phase de conception

La conception des produits et de leurs chaînes logistiques rejoint de plus en plus l'approche simultanée basée sur la collaboration des différents partenaires de l'entreprise virtuelle. Dans ce contexte, le flux d'information occupe une place centrale.

Au niveau de l'entreprise virtuelle, les informations techniques échangées relatives aux produits et aux fonctions logistiques, en plus du flux de décisions, forment le flux informationnel reliant tous les acteurs. Aujourd'hui, ce flux d'information ne suit plus une forme linéaire depuis le fournisseur jusqu'au client. Il se base plutôt sur un partage simultané des données entre l'ensemble des partenaires et ce grâce à des échanges électroniques et à l'utilisation des systèmes d'information, les SI (Fig. 1) [11].

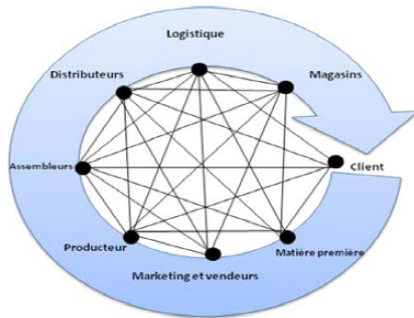


Fig. 1. Répartition des flux dans la chaîne logistique

En revanche, si on prend seulement la phase de conception, on constate que les informations manipulées peuvent se situer dans différents types de SI [5] : Les SI dits d'authoring, regroupant l'ensemble des outils de conception assistée par ordinateur (CAO), de simulation, etc. ; Les outils de gestion des données techniques, tels que les Product Data Management systems (PDM) et actuellement les outils de gestion de cycle de vie (PLM); Et les outils de pilotage des activités de conception, par exemple MS Project ou PTC Windchill Project-Link.

C. Le besoin de partage d'informations et d'interopérabilité

De nos jours, le nombre et la diversité des SI industriels vont croissants, par conséquent l'ensemble des SI peut être considéré comme un système complexe [5]. En outre, les sources d'information diffèrent d'un échange à un autre et chacun des partenaires a son propre domaine d'expertise, parle son propre langage et a ses propres SI.

Malgré ceci, chaque inter-acteur a besoin d'accéder, d'interpréter et d'analyser un ensemble d'informations et de connaissances distribuées dans le réseau logistique. Par conséquent, malgré leurs différences (par rapport à la nature des données qu'ils manipulent, aux modélisations, aux solutions technologiques qu'ils utilisent...), les SI de l'entreprise étendue doivent interopérer afin de mettre à la disposition de chaque partenaire les informations nécessaires à ses prises de décision. Les informations échangées doivent non seulement être transmises au bon moment et stockées, mais elles doivent également être bien interprétées par celui qui les reçoit sans aucune perte de sémantique. On parle alors d'un échange d'informations porteuses de sens, notamment d'une problématique d'interopérabilité sémantique.

Selon [12], l'interopérabilité peut être définie comme l'aptitude de deux systèmes (ou plus) à communiquer, coopérer et échanger des données et services, et ce malgré les différences dans les langages, les implémentations et les environnements d'exécution ou les modèles d'abstraction. D'après [13], un système n'est interopérable que lorsqu'il

respecte simultanément les trois niveaux d'interopérabilité, en l'occurrence :

- Le niveau technique : qui concerne la standardisation des interfaces matérielles et logicielles ;
- Le niveau sémantique : qui concerne la compréhension au niveau métier entre les différents acteurs;
- Le niveau organisationnel : qui consiste à identifier les inter-acteurs et les procédures organisationnelles.

De cette section, on constate que la capacité de faire interopérer les différents SI est devenue un enjeu stratégique pour les entreprises. Elle constitue les pierres angulaires d'un développement collaboratif performant du produit. De ce fait, plusieurs travaux se sont intéressés à la résolution des problèmes d'interopérabilité en entreprises. Dans le paragraphe suivant, nous effectuerons une comparaison de ces différentes approches afin d'identifier celle la plus appropriée pour notre contexte de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique associée.

D. Comparaison des approches de résolutions des problèmes d'interopérabilité

La norme ISO-14258-1998 [3] définit trois façons d'aborder l'interopérabilité, en l'occurrence, l'intégration, l'unification et la fédération. Le tableau ci-dessous décrit le principe de chaque approche ainsi que les limites principales qu'elles présentent [14].

TABLE I. COMPARAISON DES APPROCHES D'INTEROPERABILITÉ

Approche	Principe	Limites
Intégration	Proposition d'un modèle de données standard commun (un consensus)	Le niveau de compatibilité atteinte est limité
Unification	Etablissement de correspondances sémantiques directes entre acteurs (des mapping)	Elle nécessite une connaissance à priori des ontologies de chaque pairs du réseau, en plus d'une mise à jour régulière
Fédération	Association dynamique des modèles distincts	Les résultats actuels restent encore décevants

L'analyse des trois approches d'interopérabilité montre que l'intégration et l'unification présentent des limites. En effet, l'intégration repose sur l'idée de trouver un consensus entre les différents acteurs du réseau, or, il n'est pas possible de proposer un modèle qui s'adapte parfaitement à chacun des acteurs [5]. Quant à l'unification, elle cherche à trouver des correspondances directes entre les sémantiques des informations des différents systèmes du réseau et ceci s'effectue de manière manuelle en générale. Ainsi, dans ce cas là, des mises à jour régulières doivent être faites au niveau du modèle pivot en fonction de toutes modifications du réseau [14]. De ce fait, ces deux premières approches ne sont pas en adéquation avec la dynamique intrinsèque des SI industriels actuels d'où l'intérêt de passer à la fédération.

E. La fédération : L'approche d'interopérabilité la plus adéquate pour notre contexte

Dans notre contexte de conception simultanée du produit-chaîne logistique, une grande quantité de données doit être échangée sans perte de sémantique, de plus une grande flexibilité doit être permise afin d'assurer un échange dynamique et une meilleure prise de décisions au bon moment. Il s'avère alors que la fédération est la plus appropriée pour assurer ces exigences et pour dépasser la rigidité de l'intégration et de l'unification. En outre, la fédération repose sur l'idée que chaque « métier » doit pouvoir conserver son propre modèle d'information pour en garantir le sens et la flexibilité [5]. Ainsi, pour échanger les informations entre les systèmes, la fédération propose d'établir des connexions automatiques entre modèles et ceci en se basant sur la logique.

Aujourd'hui, avec les avancées soutenues qu'ont connues les Technologies d'Information et de Communication (TIC), notamment le web, la fédération est devenue atteignable. En effet, de nouveaux paradigmes de modélisation fondés sur l'utilisation des ontologies ont vu le jour.

III. EMERGENCE DES MODELES A BASE D'ONTOLOGIES

A travers ce papier, nous cherchons à répondre à une question clé : Comment les ontologies peuvent être utilisées comme élément intégrateur et comme support efficace de la conception concurrente du produit et de sa chaîne logistique optimisée? De ce fait, l'analyse des caractéristiques, apports et applications des modèles à base d'ontologies s'avère indispensable.

A. Qu'est ce qu'une ontologie?

Les ontologies sont un nouveau paradigme de modélisation des connaissances emprunté de la philosophie et développé dans le cadre du web sémantique. Leur définition la plus largement citée dans la littérature est celle donnée par Gruber [15]. Elle dit « qu'une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation ». Studer et al. [16] ont complété cette définition en ajoutant « qu'une ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée ».

On constate alors que l'objectif d'une ontologie est de modéliser l'ensemble des connaissances d'un domaine donné et ceci en les structurant en des concepts, des relations entre concepts, des fonctions, des axiomes et des instances [15]. Les modélisations ontologiques sont fondées sur la logique. De ce fait, elles sont compréhensibles par les machines et elles offrent une dimension collaborative puisqu'elles permettent la formalisation d'une sémantique commune.

B. Pourquoi les ontologies?

De nos jours, l'utilisation des modèles à base d'ontologies va toute croissante. D'après [17], ceci revient au fait qu'elles :

- Permettent l'échange de données entre les hommes et / ou les machines ;
- Séparent les informations de chaque opérateur du système tout en les transmettant ;
- Permettent la réutilisation des informations échangées ;
- Permettent une analyse formelle de ces informations.

Selon Fortineau [5], ce qui offre aux ontologies ces utilités soutenues sont principalement deux aspects élémentaires, en l'occurrence, l'expressivité et le raisonnement.

- **L'expressivité** : Les ontologies sont fondées sur la logique. En effet, pour que leurs contenus puissent être traités et exploités par des machines, il est nécessaire qu'ils soient représentés en des langages formels définissant une syntaxe, une sémantique et des règles. Depuis 2004, le Web Ontology Language (OWL) a été désigné comme langage ontologique standard, recommandé par le W3C [17]. Le OWL repose sur les logiques de description ce qui lui donne une grande capacité de définir des concepts et des relations atomiques, d'exprimer la négation, la restriction, l'existence des concepts et même l'intersection de concepts quelconques. De ce fait, on constate que les logiques de description sont la source d'expressivité des ontologies. Elles leur offrent la capacité de formaliser même le côté sémantique des connaissances.

- **Le raisonnement** : Encore puisque les modèles ontologiques sont fondés sur la logique alors ils peuvent effectuer des inférences : ils peuvent raisonner. Ceci dit que de nouvelles informations implicites peuvent être déduites sur les instances à partir des concepts, relations, axiomes et règles explicitement définis dans l'ontologie. Les opérations d'inférences peuvent être classées en quatre catégories principales [18], en l'occurrence, la subsomption (qui permet d'explicitier les liens taxonomiques) ; la récupération (qui permet de recenser toutes les instances d'une classe, ou ayant une propriété donnée) ; la vérification de la cohérence (qui consiste à vérifier que l'ontologie définie n'a pas d'incohérence) et la réalisation (qui permet de trouver toutes les classes auxquelles une instance appartient). Ces opérations d'inférence sont exécutées grâce à des moteurs d'inférences ou des raisonneurs (Hermit par exemple).

En prenant en considération ces deux points forts des ontologies et en rajoutant leur **capacité de formalisation de la sémantique** des connaissances ainsi que l'échange dynamique qu'elles offrent (à travers l'alignement automatique des ontologies), nous constatons que la modélisation ontologique représente une piste prometteuse pour dépasser les verrous scientifiques, relevés auparavant, qui freinent la collaboration entre entreprises et qui freinent notamment le développement collaboratif des produits. Ceci explique le nombre considérable de leurs applications récentes en industrie.

IV. APPLICATIONS DES ONTOLOGIES POUR LE DEVELOPPEMENT COLLABORATIF DES PRODUITS

Nous cherchons dans ce travail à utiliser les ontologies comme support efficace de la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique, donc nous avons intérêt à analyser les travaux antérieurs qui ont exploité les ontologies pour la résolution des problèmes d'intégration et d'interopérabilité en entreprise. Ces applications industrielles peuvent être divisées en trois grandes catégories :

- *Des ontologies de chaîne logistique* : dédiées à la modélisation des informations et des connaissances

relatives aux différents maillons de la chaîne logistique (par exemple celles relatives à leurs architectures, structures, ressources, capacités, activités ...)

- *Des ontologies produit* : dédiées à la représentation des informations produit (notamment dans différentes phases de son cycle de vie dans une perspective de gestion de cycle de vie PLM) ;
- *Des ontologies pour l'ingénierie simultanée et le développement collaboratif des produits*: contribuant à la réalisation de l'approche concourante en intégrant à la fois les informations relatives aux produits et aux maillons logistiques.

A. *Ontologies dédiées à la chaîne logistique (Supply chain ontologies)*

Les ontologies de chaîne logistique visent à faciliter l'intégration, interne et externe, des différents partenaires de la chaîne logistique. Parmi les travaux les plus pertinents et les plus cités de cette catégorie, on trouve [19], [20] :

- L'Enterprise Ontologies (EO) et les ontologies TOVE qui sont considérées comme des références pour les autres travaux. Ce sont des propositions qui regroupent un ensemble d'ontologies ayant comme objectif d'assurer l'échange informationnel, de supporter l'interopérabilité et de supporter le management de l'entreprise étendue.

- L'ontologie IDEON développée par Madni et al. prenant en considération quatre points de vue différents décrivant l'environnement des entreprises distribuées. Ces points de vue sont relatifs au : contexte de l'entreprise, son organisation, ses processus et finalement, ses ressources.

- L'ontologie proposée par Soares et al. en vue de supporter la planification et le contrôle au niveau de l'entreprise étendue.

- Les travaux de Ye et al. qui visent à assurer l'intégration sémantique entre les SI hétérogènes de la chaîne logistique et ce à travers la proposition d'une ontologie de haut niveau formalisée en OWL et ayant comme concepts: la Supply Chain, SC Structure, Party, Role, Purpose, Activity, Resource, Transfer Object, Performance and Performance_Metric.

- Et parmi les travaux récents, on cite, en 2013, l'ontologie EAGLE proposée et visant à renforcer la prise collaborative de décisions au sein de la chaîne logistique [21], et notamment les efforts de Lu et al. qui ont proposé une ontologie basée sur le modèle SCOR [22].

- Enfin, en 2015, la proposition de [23] qui consiste à développer un environnement pour l'intégration des chaînes logistiques basé sur les ontologies.

Les modèles ontologiques dédiés à la chaîne logistique, malgré leur diversité, présentent certaines limites qui consistent essentiellement en leur niveau de granularité limité au niveau tactique, en des concepts souvent de plus haut niveau et ne prenant pas en compte les spécificités d'une chaîne logistique

réelle, et finalement en leur vision statique de la chaîne logistique. En outre seules les ontologies TOVE et EO prennent en considération la dynamique qui régit le flux informationnel de la chaîne logistique et prennent en considération la notion de temps.

B. *Ontologies Produit (Product ontologies)*

Pour la deuxième catégorie d'ontologies, en l'occurrence les ontologies produit, une multitude de travaux ont été proposés. Parmi les plus pertinents, on cite :

- Yoo et Kim [24] qui ont développé un système de gestion de connaissances afin de faciliter le transfert des données produit au niveau de l'entreprise étendue ;

- Vegetti et al. [25] qui ont proposé la Product ONTOLOGY (PRONTO) pour modéliser les données produit.

- Onto-PDM qui est une ontologie centrée sur le produit et fondée sur deux standards : STEP (ISO 10303) et IEC 62264, afin de permettre l'interopérabilité entre les données de CAO, les PDM, les MES et les ERP [26].

En évoquant Onto- PDM, nous voudrions mettre l'accent sur deux tendances très importantes qu'ont connu les ontologies Produit, en l'occurrence:

- La traduction des modèles d'unification existants en des ontologies. On cite à titre d'exemples [5] la transformation de L'Open Assembly Model (OAM) en une ontologie (L'OAM étant un modèle produit exprimé initialement en UML et représentant une extension du modèle produit Core Product Model) ; la transformation de la norme STEP à l'ontologie OntoSTEP et notamment la transformation du modèle produit SOM (Semantic Object Model) d'une représentation UML à une ontologie OWL par Matsokis et Kiritsis [17].

- La prise en compte des données produit relatives à l'ensemble du cycle de vie, dans une perspective PLM. Ces travaux sont analysés par Fortineau et al. dans [4] et récemment en 2015 par El Kadiri et Kiritsis dans [27].

Malgré leur diversité, les travaux de cette deuxième catégorie d'ontologies présentent certaines limites. En outre la plupart d'entre eux n'exploitent que l'expressivité des langages ontologiques et négligent le potentiel d'inférence que présentent les ontologies. On constate également que dans la majorité des travaux, même la définition des concepts et des propriétés s'effectue uniquement à partir des spécifications du domaine, sans aucune prise en considération les possibilités d'optimisation et d'automatisation de ce processus à travers le raisonnement des ontologies. En plus de ces lacunes, on note également un manque au niveau des outils d'évaluation des ontologies et de l'automatisation du processus d'acquisition des connaissances.

C. *Ontologies supportant le développement collaboratif des produits et l'ingénierie simultanée*

Cette troisième catégorie est celle qui nous intéresse le plus. Elle regroupe à la fois les applications industrielles des

ontologies supportant l'ingénierie simultanée et celles supportant le développement collaboratif des produits de manière générale. Parmi les travaux marquants de cette catégorie on cite :

- Kim et al. [28] qui ont développé une ontologie pour supporter la conception collaborative des produits en exploitant les capacités d'inférences pour optimiser les processus d'assemblage des produits intermédiaires.

- Les efforts d'Abdulhafour et al. [29] qui ont proposé l'ontologie CDFO (Common Design Features Ontology) ainsi que quelques règles d'alignement des ontologies.

- Mostefai et al. [30] qui ont proposé une ontologie représentant trois points de vue élémentaires dans le développement collaboratif. Il s'agit des points de vue : conception des composants, assemblage et plan de production.

- Le modèle à base d'ontologies proposé par Zhang et al. [31] pour assurer la compréhension entre les agents intervenants lors du développement collaboratif et notamment pour capitaliser les connaissances des anciens projets.

- L'ontologie Decision Support Ontology (DSO) développée par Rockwell et al. [32] pour supporter la prise de décisions lors de la conception collaborative du produit.

- La Product Design Ontology (PDO) qui a été proposée par Catalano et al. [33] à destination des concepteurs

- Bock et al. [34] ont proposé une approche utilisant les ontologies pour la modélisation des différentes conceptions possibles pour un même produit et ceci afin d'avoir un accord entre les différents partenaires sur l'architecture du produit dès les premières phases de son cycle de vie.

- Les efforts de Lee et al. [35] qui ont proposé une méta-ontologie pour la conception des produits, qui se fonde sur cinq classes fondamentales : attribute, behavior, entity, property et object relationship.

- Sun et al. [36] qui ont proposé une méthodologie de construction d'ontologie pour assurer l'interopérabilité des sous-systèmes lors du développement collaboratif.

- Finalement en 2015, Chang et al. ont proposé des approches à base d'ontologies pour supporter l'intégration des données et la prise de décisions lors de la conception collaborative des produits [37].

Certes, le nombre et la diversité des applications industrielles des modèles à base d'ontologies témoignent des apports considérables qu'offrent ces dernières dans le contexte de l'ingénierie simultanée et du développement collaboratif des produits en général.

Toutefois, les modèles existants présentent certaines limites. En outre, la majorité de ces travaux se focalisent juste sur la modélisation des informations et des connaissances en utilisant l'expressivité des langages ontologiques (surtout le OWL) et ne prennent pas en considération le processus de prise de décisions qui peut être également supporté à travers les capacités de raisonnement des ontologies. De plus, on constate

que ces modélisations ontologiques ne prennent pas en compte le côté optimisation (que ça soit au niveau de la détermination de l'architecture du produit ou au niveau de l'optimisation des maillons de la chaîne logistique et même au niveau de l'acquisition des données pour l'ontologie elle-même), chose indispensable dans la phase de conception comme nous l'avons déjà évoqué. Finalement, on constate que rares sont les travaux qui ont réussi à modéliser à la fois les données produit (tout au long de son cycle de vie) et celles de la chaîne logistique ainsi que les interactions entre elles d'une manière complète et générique.

V. PROPOSITION D'UNE APPROCHE COMBINANT ONTOLOGIE ET MODELES MATHEMATIQUES D'OPTIMISATION

Dans la partie précédente, nous avons analysé les différents travaux qui se sont intéressés aux applications des ontologies pour la résolution des problèmes de l'intégration des acteurs de la chaîne logistique ainsi que des problèmes d'interopérabilité en entreprise. Cette analyse a montré que la majorité de ces travaux proposent soit des ontologies centrées sur le produit et dédiées uniquement à la représentation des informations produit (notamment dans différentes phases de son cycle de vie dans une perspective PLM), soit des ontologies dédiées uniquement à la représentation des informations relatives aux maillons de la chaîne logistique. Peu d'entre eux ont réussi à combiner les deux d'une manière claire et générique.

D'autre part, une capacité fondamentale qu'offrent les ontologies n'a été exploitée que rarement dans les travaux antérieurs, en l'occurrence leur capacité d'inférer de nouvelles informations et de raisonner.

En plus de ces lacunes concernant le manque d'exploitation des points forts des ontologies, Molet a précisé que les modèles mathématiques, à eux seuls, ne sont plus suffisants pour l'optimisation de la chaîne logistique [38], ainsi, une nouvelle piste supportant la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée doit être ouverte.

Notre objectif est alors de proposer une nouvelle approche qui, à travers l'utilisation d'un même outil, permettra d'une part de surmonter ces deux types de lacunes, sur le champ de la modélisation ontologique et sur le champ de l'optimisation mathématique, et d'autre part d'exploiter à la fois les deux caractéristiques fondamentales des ontologies, en l'occurrence leur grande expressivité et leur capacité d'inférence. Le paragraphe suivant donne une description générale de l'approche proposée.

A. Description générale de l'approche proposée

Nous proposons une approche hybride combinant ontologies et modèles mathématiques d'optimisation (fig. 2). En effet, l'idée est d'exploiter la capacité d'inférence des ontologies pour supporter l'intégration des contraintes logistiques dès les premières phases de conception du produit et également pour améliorer la prise de décisions lors du processus d'optimisation des maillons de la chaîne logistique.

L'approche proposée repose sur l'interaction dynamique entre ontologie et modèles mathématiques d'optimisation et ceci via l'utilisation des requêtes et de deux catégories de règles d'inférences que nous détaillerons par la suite.

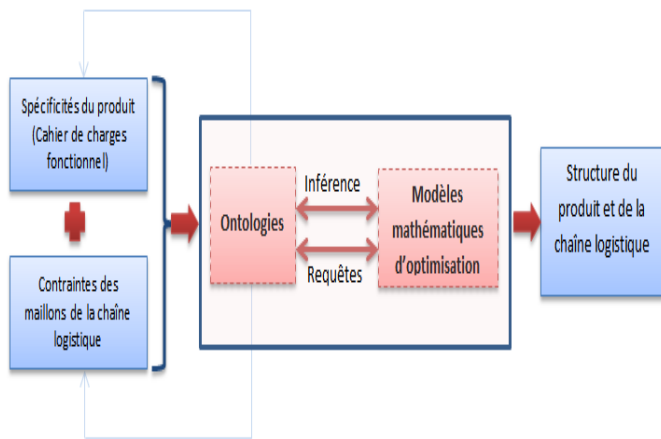


Fig. 2. Approche combinant ontologies et modèles mathématiques.

Nous exploiterons les caractéristiques des ontologies comme suite :

1) *L'expressivité* : Nous utiliserons cette caractéristique afin de structurer, de manière claire et générique, les informations et les connaissances relatives à la fois au produit et aux maillons de la chaîne logistique ;

2) *L'inférence*: A travers l'expression d'un ensemble de requêtes et de règles d'inférences et notamment à travers l'utilisation d'un raisonneur (Hermit), nous allons pouvoir améliorer la prise de décisions lors de la conception collaborative du produit et de la chaîne logistique. En effet, le moteur d'inférence va faire de nouvelles déductions à partir des règles prédéfinies et nous aurons ainsi une liste plus complète et claire des contraintes à prendre en considération lors de la conception et de l'optimisation ce qui va améliorer la qualité des résultats obtenus et réduire le temps de leur obtention ;

3) *Le stockage*: Nous utiliserons l'ontologie non seulement pour avoir une modélisation claire et structurée des données relatives au produit et à la chaîne logistique mais aussi pour capitaliser et archiver toutes ces données ;

4) *La réutilisabilité*: Nous construisons une ontologie de référence fondée sur un ensemble de concepts de base, indépendants de tous types de produits ou des processus particuliers. La spécification de ces concepts racines permettra ainsi d'adapter l'ontologie au cas d'application.

B. Le rôle de l'ontologie de référence dans l'approche

L'ontologie se trouve au cœur du processus de la conception collaborative. C'est autour d'elle que se regroupent tous les acteurs influençant la conception du produit puisqu'elle constitue non seulement l'outil de partage d'information, mais également le moyen qu'utilisent le concepteur et les différents maillons de la chaîne logistique pour se comprendre entre eux.

Dans cette nouvelle approche, l'ontologie joue deux rôles principaux, en l'occurrence :

- Le rôle d'intégrateur puisqu'elle réunit l'ensemble des inter-acteurs de la chaîne logistique autour d'un modèle commun. Ceci s'effectue non seulement à travers le simple échange des informations entre les différents métiers et applications, mais également à travers la transmission de données porteuses de sens ce qui facilite la compréhension au sein des équipes pluridisciplinaires à travers l'assurance de l'interopérabilité sémantique ;
- Le rôle de support pour le processus d'optimisation des maillons de la chaîne logistique et ceci à travers l'utilisation des règles d'inférences permettant de déduire de nouvelles informations. On aura par conséquent une amélioration de la prise de décisions (par une meilleure prise en compte des contraintes et des données existantes) et notamment une contribution à son automatisation.

C. L'exploitation des capacités d'inférence de l'ontologie

Comme évoqué auparavant, l'approche repose sur l'utilisation de deux catégories principales de règles d'inférence exprimées en SWRL sous forme d'implications afin d'augmenter l'expressivité du OWL. Les règles utilisées se subdivisent en des:

1) *Règles d'inférences métiers* : Permettant, d'une part, d'automatiser la formalisation des connaissances nécessaires pour la conception du produit et des maillons de la chaîne logistique et d'autre part, de faciliter et d'automatiser la détermination des différentes contraintes qui doivent être prises en considération lors de la conception simultanée du produit et de la chaîne logistique. L'utilisation des règles métiers va limiter les actions répétitives de formalisation des connaissances aux utilisateurs métier et elle va en même temps les guider au mieux vers une identification et une représentation la plus exhaustive et homogène possible des informations, notamment des contraintes à prendre en considération. Afin d'illustrer ces règles, nous prenons le cas de la conception des freins d'une voiture et de leur chaîne logistique, des exemples des règles métiers sont :

- Une contrainte imposée par le cahier de charge est que: la puissance maximale supportée par le frein de la véhicule doit être supérieure à celle du moteur, $P_{\text{moteur}} < |P_{\text{freins}}|$;
- Une contrainte imposée par le maillon client est que: La pièce doit faciliter le montage, un alésage de diamètre 20mm doit être réalisé ;
- La quantité achetée d'un composant est bornée par les capacités maximales et minimales de transport relatives au fournisseur correspondant.

Les règles métiers nous permettront non seulement de formaliser rapidement et efficacement les données et les contraintes, mais elles vont également nous aider à déterminer, très tôt, toutes incohérences au niveau de la conception du produit et de la chaîne logistique.

2) *Règles d'inférences relatives à l'optimisation* : Cette deuxième catégorie de règles jouera essentiellement le rôle de déclencheur pour les différentes sous-parties du programme d'optimisation. En outre, nous définirons pour chaque sous-programme une variable booléenne qui prendra la valeur (1) si cette partie doit être exécutée et la valeur (0) dans le cas échéant. Les règles d'inférence se chargeront de déterminer la valeur de la variable booléenne associée à chaque sous-programme selon les spécificités de l'entreprise étendue et du cas d'étude en question. Si par exemple, lors de la conception d'un produit et de sa chaîne logistique, les concepteurs n'ont pas envisagé son stockage dans un entrepôt, une règle d'inférence déduira que la variable associée au sous-programme d'optimisation du maillon « Entrepôt » doit prendre la valeur (0). Par conséquent, les règles d'inférences automatiseront le processus de détermination des parties du programme à exécuter et réaliseront ainsi un gain de temps.

Finalement, nous utiliserons les requêtes pour interroger l'ontologie et collecter les paramètres d'entrées du programme d'optimisation. Nous ne nous intéressons pas dans le présent papier au développement d'un modèle mathématique d'optimisation des maillons de la chaîne logistique. Nous nous contenterons alors de réutiliser des modèles déjà existants dans la littérature en cas de besoin.

Par contre, nous tâcherons dans nos futurs travaux de recherche à développer un modèle mathématique d'optimisation bien adapté aux ambitions de l'approche que nous proposons surtout que les modèles d'optimisation simultanée des produits - chaîne logistique sont encore peu étudiés dans la littérature.

D. La démarche hybride proposée

Une fois l'ontologie de référence construite, le modèle mathématique d'optimisation élaboré et les règles d'inférence exprimées, on peut passer à la mise en place de la démarche proposée.

Nous nous plaçons dans le cadre générale de la conception d'un nouveau produit par une entreprise manufacturière. La figure 3 décrit la démarche proposée.

En premier lieu, les concepteurs effectuent un recensement de l'ensemble des contraintes exigées par chaque maillon de la chaîne logistique et notamment par le cahier des charges imposées par le client. Les contraintes des maillons logistiques non existants doivent être anticipées également (l'ajout d'un nouveau fournisseur par exemple).

L'objectif de cette étape est d'avoir une meilleure prise en compte des contraintes logistiques dès les premières phases de la conception du produit. Ces contraintes peuvent être regroupées en des contraintes de coût, de qualité et de délai.

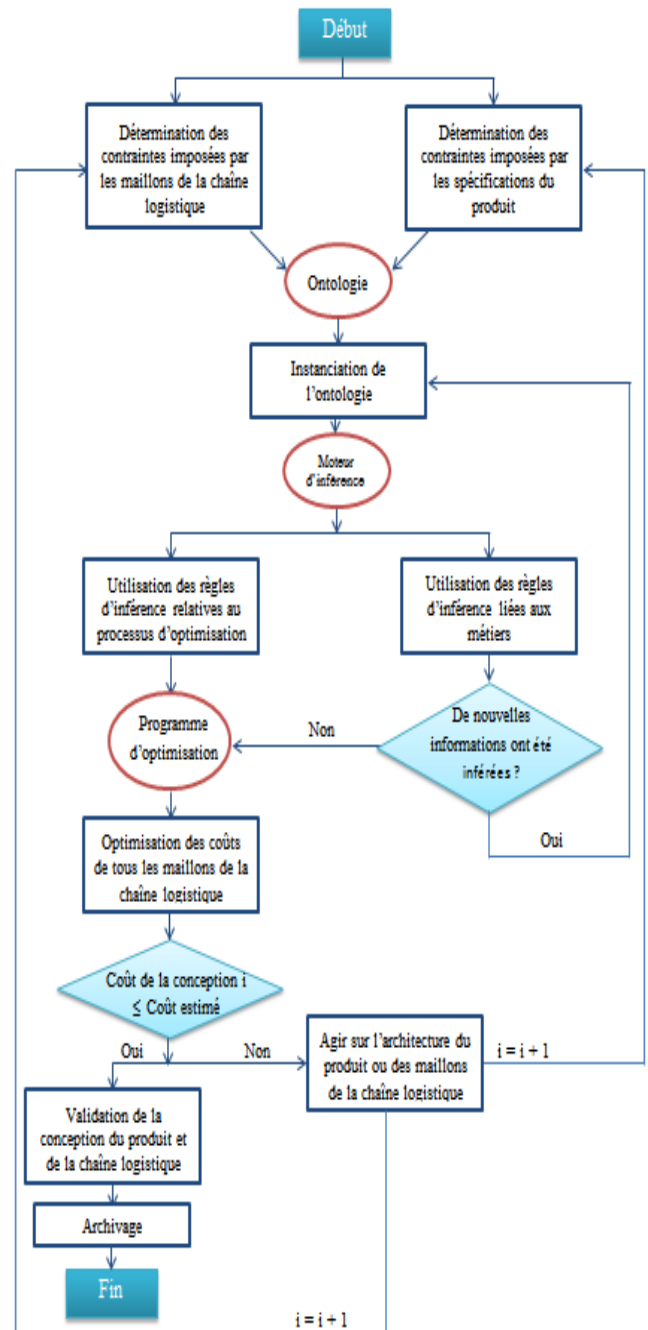


Fig. 3. Démarche proposée de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique supportée par les ontologies.

Elles se manifestent par exemple par les délais d'approvisionnement et les prix de vente pour le maillon fournisseur, par les coûts et les capacités de production pour le maillon entreprise, par les coûts et les capacités de stockage pour le maillon entrepôt, par le coût et le délai de transport pour le maillon transport et finalement par les spécificités techniques et les quantités demandées pour le maillon client. Une fois recensées, les contraintes seront introduites comme extensions du concept « contrainte » du modèle.

Parmi les objectifs de notre approche, l'amélioration et l'automatisation de l'opération de recensement des contraintes

à prendre en considération que ça soit celles imposées par le cahier des charges ou celles imposées par les maillons de la chaîne logistique. Ces deux objectifs seront assurés à l'aide des capacités d'inférence de l'ontologie. En effet, nous définirons et exprimerons, comme nous l'avons déjà expliqué auparavant, des règles métiers relatives aux acteurs de la chaîne logistique que le moteur d'inférence va utiliser pour inférer une nouvelle liste de contraintes et de données que les concepteurs n'ont pas pris en considération lors du premier recensement des contraintes. Ainsi une amélioration de la détermination des contraintes à prendre en compte sera atteinte.

Une fois les données inférées et la liste des contraintes complétée, une reconduction vers le programme d'optimisation sera faite. La liste de contraintes constituera les paramètres d'entrées du programme d'optimisation et la deuxième catégorie de règles d'inférence, en l'occurrence celles relatives à l'optimisation, jouera le rôle de déclencheur et de support pour le processus d'exécution du programme d'optimisation comme décrit auparavant. L'étape suivante est évidemment l'exécution de ce dernier.

Au niveau de chaque itération, on vérifie si le coût du produit conçu satisfait le coût estimé par l'entreprise pour que le produit soit financièrement rentable. Si oui, on valide la conception du produit et sa chaîne logistique optimisée. Sinon, il sera nécessaire d'apporter des modifications soit sur l'architecture du produit, soit sur les maillons de la chaîne logistique. On revient alors dans ce cas à l'étape initiale pour une nouvelle itération. Les itérations de la conception peuvent être nombreuses et elles seront toutes archivées à l'aide de l'ontologie ce qui assurera la capitalisation des connaissances manipulées lors du projet.

E. Les concepts racines de l'ontologie de référence

L'ontologie constitue le centre de l'approche proposée. Elle joue en même temps le rôle de l'intégrateur pour les maillons de la chaîne logistique et le rôle de support pour le processus de l'optimisation. Les données produit sont modélisées au niveau de l'ontologie par la classe **Produit**, ses sous-classes sont : idée, produit numérique et produit physique. Ensuite, afin de balayer toutes les fonctions principales de la chaîne logistique (en l'occurrence, l'approvisionnement, la production, le transport, le stockage et la vente), nous définissons la classe **Acteur_Logistique** dont les sous-classes sont les maillons : fournisseur, entreprise de production, prestataire de transport, entrepôt et client. La classe **Optimisation_Mathématique** modélise les données relatives aux programmes d'optimisation ; La classe **Contrainte** modélise les contraintes logistiques et celles du cahier des charges du produit ; La classe **Règle** regroupe les règles d'inférence métiers et celles relatives à l'optimisation ; La classe **Phase** modélise les spécificités de chaque phase du cycle de vie du produit et ceci afin d'étendre l'exploitation de notre modèle, ses sous classes sont : Conception, production, distribution, utilisation et démantèlement. Finalement, la classe **Ressource** modélise l'ensemble des ressources matérielles, personnelles et logicielles nécessaires pour le développement du produit final.

La figure 4 représente les différents liens sémantiques reliant les concepts racines de notre ontologie.

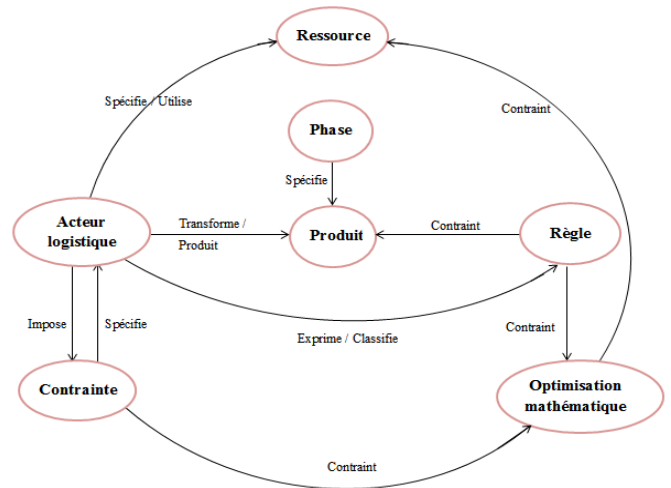


Fig. 4. Les liens sémantiques entre les concepts racines de l'ontologie

Les concepts racines que nous avons définis s'adaptent aux ambitions de notre approche. En effet, ils permettent à la fois de modéliser l'ensemble des données produits, de celles relatives aux maillons logistiques et notamment celles relatives à l'optimisation. De plus, ils sont génériques et indépendants de tout type de produit ou d'industrie ce qui va permettre l'exploitation de notre approche par un large spectre d'application.

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle approche hybride reposant sur l'interaction dynamique entre ontologie et modèles mathématiques d'optimisation et ceci afin d'exploiter les ontologies pour la résolution de deux problématiques élémentaires, en l'occurrence, celle liée à l'interopérabilité sémantique et celle concernant la prise de décisions lors du processus de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée. En effet, l'approche proposée a permis d'exploiter les ontologies :

- D'une part, comme élément intégrateur, permettant de résoudre les problèmes d'interopérabilité sémantique entre les différents inter-acteurs de la chaîne logistique et ceci via l'utilisation de la grande expressivité des ontologies permettant non seulement de modéliser les informations mais notamment leurs sémantiques ;

- Et d'autre part, comme support efficient du processus de la prise de décisions lors de la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée et ceci à travers l'expression de deux types de règles d'inférence, métiers et d'optimisation, permettant un raisonnement et une déduction plus complète et automatique des contraintes à prendre en considération lors de la conception et de l'optimisation.

Dans nos futurs travaux, nous envisageons de compléter le travail effectué au niveau de la phase de conception en implémentant l'approche proposée sur l'environnement « Protégé » et de traiter les autres phases du cycle de vie du produit et ceci afin d'exploiter les potentialités des ontologies pour améliorer la prise de décisions et l'interopérabilité sémantique tout au long du cycle de vie du produit.

Références

- [1] D. Tang, W. Eversheim et G. Schuh, «A new generation of cooperative development paradigm in the tool and die making branch: strategy and technology,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 20, n° 14, pp. 301-311, 2004.
- [2] S. Dowlatshahi, «The role of logistics in concurrent engineering,» *International Journal of Production Economics*, vol. 44, n° 13, pp. 189-199, 1996.
- [3] International Standard Organization, «ISO-14258-1998: Systèmes d'automatisation industrielle, concepts et règles pour modèles d'entreprises,» 1998.
- [4] V. Fortineau, T. Paviot et S. Lamouri, «Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models - the state of the art,» *Computers in Industry* 64, p. 363-375, 2013.
- [5] V. Fortineau, «Contribution à une modélisation ontologique des informations tout au long du cycle de vie du produit,» Chemical and Process Engineering. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM., France, 2013.
- [6] B. Nepal, M. Leslie et F. Oluwafemi, «Matching product architecture with supply chain design,» *European Journal of Operational Research*, pp. 312-325, 2012.
- [7] P. Marin, «L'usage des systèmes d'information PLM contribue-t-il à l'innovation collaborative?», Thèse professionnelle de l'Exécutive Mastère Spécialisé Management des systèmes d'information et des technologies, Mines Paristech, 2009.
- [8] W. S. Clark K.B., «Managing New Product and Process Development: Text and Cases,» New York, 1993.
- [9] B. Baud-Lavigne, «Conception conjointe des nomenclatures et de la chaîne logistique pour une famille de produits : outils d'optimisation et analyse,» Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [10] H. El Maraghy et N. Mahmoudi, «Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations,» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 22, n° 16, pp. 438-493, 2009.
- [11] N. Kasarda et J. Greis, «Entreprise Logistics in the information Era. California Management,» *Review*, 39 (3), pp. 55-78, 1997.
- [12] P. Wegner, «Interoperability,» *ACM Computing Survey*, 28 (1), p. 258-287, 1996.
- [13] EIF: European interoperability framework, «White paper,» pp. 1 - 40, 2004.
- [14] P. Hoffmann, «Similarité sémantique inter-ontologies basée sur le contexte,» 2008.
- [15] T. Gruber, «Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing,» *International Journal of Human-Computer Studies* 43 (5-6), p. 907-928, 1995.
- [16] R. Studer, V. Richard Benjamins et F. Dieter, «Knowledge engineering: Principles and methods,» *Data & Knowledge Engineering*, 25(1-2), p. 161-197, 1998.
- [17] A. Matsokis et D. Kiritsis, «An ontology-based approach for product lifecycle management,» *Computers in industry*, 61, p. 787-797, 2010.
- [18] X. Fiorentini, R. Sudarsan, H. Suh, J. Lee et R. Sriram, «An analysis of description logic augmented with domain rules for the development of product models,» *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 10, pp. 1-13, 2010.
- [19] T. Grubic et I. Fan, «Supply chain ontology: Review, analysis and synthesis,» *Computers in Industry* 61, p. 776-786, 2010.
- [20] A. Scheuermann et J. Leukel, «Supply chain management ontology from an ontology engineering perspective,» *Computers in Industry*, 65(6), pp. 913-923, 2014.
- [21] G. L. Geerts et D. E. O'Leary, «A supply chain of things: The EAGLET ontology for highly visible supply chains,» *Decision Support Systems*, 63, pp. 3-22, 2014.
- [22] Y. Lu, H. Panetto, Y. Ni et X. Gu, «Ontology alignment for networked enterprise information system interoperability in supply chain environment,» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26:1-2, pp. 140-151, 2013.
- [23] M. Das, J. C. Cheng et K. H. Law, «An ontology-based web service framework for construction supply chain collaboration and management,» *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 22, n° 15, pp. 551 - 572, 2015.
- [24] S. B. Yoo et Y. Kim, «Web-based knowledge management for sharing product data in virtual enterprises,» *International Journal of Production Economics*, 75, p. 173-183, 2012.
- [25] M. Vegetti, G. Henning et H. P. Leone, «PRoduct ONTOlogy: An ontology for complex product modelling domain,» *Proceedings of the ENPROMER, Rio de Janeiro*, 2005.
- [26] H. Panetto, M. Dassisti et A. Tursi, «ONTO-PDM: product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment,» *Advanced Engineering Informatics*, 26 (2), pp. 334-348, 2012.
- [27] S. El Kadiri et D. Kiritsis, «Ontologies in the context of product lifecycle management: state of the art literature review,» *International Journal of Production Research*, 2015.
- [28] K. Kim, D. Manley et H. Yang, «Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development,» *Computer-Aided Design*, 38, p. 1233-1250, 2006.
- [29] S. Abdul-Ghafour, P. Ghodous et B. Shariat, «A Common Design-Features Ontology for Product Data Semantics Interoperability,» *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence*, 2007.
- [30] S. Mostefai, A. Bouras et M. Batouche, «Effective Collaboration in Product Development via a Common Sharable Ontology,» *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 982-988, 2008.
- [31] W. Y. Zhang et J. W. Yin, «Exploring Semantic Web technologies for ontology-based modeling in collaborative engineering design,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(9-10), p. 833-843, 2008.
- [32] J. Rockwell, I. Grosse, S. Krishnamurty et J. Wileden, «A Decision Support Ontology for Collaborative Decision Making in Engineering Design,» *Collaborative Technologies and Systems. CTS'09. International Symposium. IEEE*, pp. 1-9, 2009.
- [33] C. E. Catalano, E. Camossi, R. Ferrandes, V. Cheutet et N. Sevilimis, «A product design ontology for enhancing shape processing in design workflows,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 20, n° 15, p. 553-567, 2009.
- [34] C. Bock, X. F. Zha, H. Suh et J. Lee, «Ontological product modeling for collaborative design,» *Advanced Engineering Informatics*, 24, p. 510-524, 2010.
- [35] J. Lee, H. Chae, C. Kim et K. Kim, «Design of product ontology architecture for collaborative enterprises,» *Expert Systems with Applications*, 36, p. 2300-2309, 2009.
- [36] H. Sun, W. Fan, W. Shen et T. Xiao, «Ontology-based interoperation model of collaborative product development,» *Journal of Network and Computer Applications* 35, p. 132-144, 2012.
- [37] X. Chang, L. Zheng et J. Terpenny, «Ontology Development and Optimization for Data Integration and Decision-Making in Product Design and Obsolescence Management,» *Ontology Modeling in Physical Asset Integrity Management. Springer I*, pp. 87-132, 2015.
- [38] Molet H., «Systèmes de production et de logistique,» Hermès-science, Lavoisier, 2006.