



Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées

Christophe Danjou

► To cite this version:

Christophe Danjou. Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Compiègne, 2015. Français. NNT : 2015COMP2234 . tel-01376520

HAL Id: tel-01376520

<https://theses.hal.science/tel-01376520>

Submitted on 5 Oct 2016

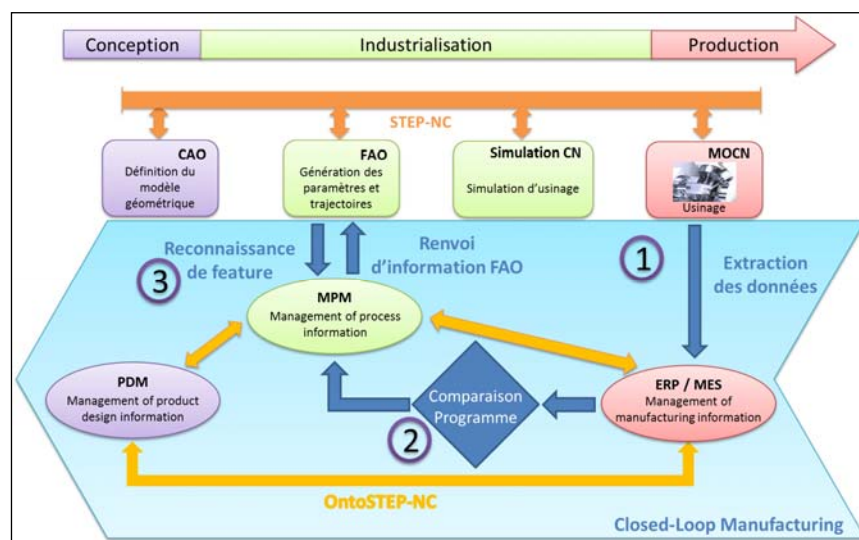
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Par **Christophe DANJOU**

*Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation :
proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la
conception-fabrication intégrées*

Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 03 décembre 2015
Spécialité : Mécanique Avancée

D2234

Pour l'obtention du grade de docteur délivré par

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

SPÉCIALITÉ MECANIQUE AVANCÉE

Ecole doctorale n°71 Sciences pour l'ingénieur - Laboratoire Roberval (CNRS, UMR 7337)

Christophe Danjou

Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées

Soutenue le 03 décembre 2015

JURY

M. Dimitris KIRITSIS, Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Rapporteur
M. Luc MATHIEU, Professeur des Universités, IUT Cachan – Université Paris Saclay	Rapporteur
M. Nabil ANWER, Maître de Conférences HDR, IUT Saint-Denis, Université Paris Nord	Examineur
M. Philippe AUDINET, Snecma	Examineur
M. Emmanuel CAILLAUD, Professeurs des Universités, Université de Strasbourg	Examineur
M. Alexandre DURUPT, Maître de Conférences, Université de Technologie de Compiègne	Examineur
M. Louis RIVEST, Professeur, Ecole de Technologie Supérieure de Montréal	Examineur
M. Benoit EYNARD, Professeur, Université de Technologie de Compiègne	Directeur de Thèse
M. Julien LE DUIGOU, Enseignant-Chercheur, Université de Technologie de Compiègne	Directeur de Thèse

Table des matières

Introduction générale.....	1
1 Contexte Industriel et problématique.....	7
1.1 Défis industriels pour les procédés et technologies de fabrication dans l'usine du futur	9
1.1.1 L'entreprise étendue centrée sur la fabrication.....	9
1.1.2 Intégration des technologies et des procédés pour l'usine du futur	10
1.2 De la conception à la production : Les chaînes numérique et physique d'usinage	11
1.2.1 La création des informations Produit-Process	11
1.2.2 La gestion des informations Produit-Process.....	15
1.3 Enjeux de l'industrie aéronautique sur les procédés de fabrication.....	20
1.4 Conclusion et problématique	22
2 Etat de l'art.....	25
2.1 Les solutions pour l'interopérabilité	26
2.1.1 Définition de l'interopérabilité.....	26
2.1.2 Continuité du flux d'information.....	26
2.1.3 Interopérabilité dans le cycle de développement produit.....	30
2.1.4 Étude de l'interopérabilité	35
2.2 STEP-NC pour l'échange d'informations	37
2.2.1 Standards et normes d'échange de données.....	37
2.2.2 STEP-NC	40
2.2.3 Possibilités et limites de STEP-NC.....	44
2.3 Les ontologies produits pour l'interopérabilité.....	50
2.3.1 Pourquoi les ontologies produits ?.....	50
2.3.2 Etude sur les ontologies produits.....	51
2.3.3 Analyse et manques dans le domaine de l'industrialisation	54
2.4 Gestion des connaissances pour l'industrialisation	56
2.4.1 Définition du Knowledge Management	56
2.4.2 Etude des solutions KM pour l'industrialisation.....	58
2.4.3 Les limites pour l'industrialisation.....	61
2.5 Synthèse de la bibliographie et conclusion	63
3 Proposition	68
3.1 OntoSTEP-NC modèle pour l'interopérabilité de la chaîne numérique d'industrialisation ..	70
3.1.1 STEP-NC : un standard pour l'ontologie	71

3.1.2	Méthodologie de création.....	74
3.1.3	Mise en œuvre d’OntoSTEP-NC.....	78
3.1.4	Apport et cadre d’utilisation d’OntoSTEP-NC.....	81
3.2	Définition de la Closed-Loop Manufacturing	82
3.2.1	CLM : Système à base de connaissances pour l'usinage	84
3.2.2	Mise en œuvre de CLM	91
3.2.3	Apport et cadre d’utilisation de CLM	92
3.3	Discussion des propositions	95
4	Implémentation et application.....	98
4.1	Démonstrateur	100
4.1.1	Architecture globale	100
4.1.2	Implémentation dans les logiciels métiers et les systèmes d'information.	102
4.2	Cas d’étude	110
4.2.1	Présentation du cas d’étude.....	110
4.2.2	Mise en œuvre du cas d’étude	113
4.3	Conclusion	123
5	Conclusion et perspectives.....	126
6	Références.....	134
7	Annexes	150

Table des illustrations

Figure 1 : Chaîne numérique des applications métiers	12
Figure 2 : Système PLM et applications métiers adapté de (Le Duigou, 2010).....	16
Figure 3 : Les chaînes numériques des applications métiers et des systèmes d'information	20
Figure 4 : Comparaison des architectures point par point / médiateur	28
Figure 5 : Chronologie des standards pour la CAO et FAO.....	39
Figure 6 : Couverture du cycle de vie produit en fonction des formats.....	40
Figure 7 : Nouvelle chaîne numérique intégrant STEP-NC (Nassehi et al., 2008)	41
Figure 8 : Principe du Knowledge Management (Del-Rey-Chamorro et al., 2003)	57
Figure 9 : Chaîne numérique STEP-NC.....	64
Figure 10 : Chaîne numérique OntoSTEP-NC	70
Figure 11 : Exemple de structure de programme STEP-NC (Wang and Xu, 2013)	73
Figure 12 : Graphe OntoSTEP-NC (Entité Manufacturing_Feature).....	74
Figure 13 : Transformation des entités en Classes.....	75
Figure 14 : Exemple d'Object Property	76
Figure 15 : Exemple de Data Property.....	78
Figure 16: Cas d 'illustration	78
Figure 17 : Programme STEP-NC du cas d'illustration	79
Figure 18 : Vue Protégé d'OntoSTEP-NC avec le cas d'illustration.....	80
Figure 19 : Code OntoSTEP-NC avec le cas d'illustration	80
Figure 20 : Closed-Loop Manufacturing	83
Figure 21 : Ensemble des manufacturing feature 2.5D du standard STEP-NC (Dipper et al., 2011)....	85
Figure 22 : Diagramme séquence d'intégration des connaissances d'usinage capitalisées	88
Figure 23: Démonstrateur CLM et OntoSTEP-NC	100
Figure 24 : Interfaces d'intégration du démonstrateur dans CATIA	103
Figure 25 : Exemple du programme en Code-G en fonction des "G0; G1; G2;G3" (Xu et al., 2014)..	105
Figure 26 : Implémentation dans Sage X3.....	106
Figure 27 : Comparaison de programme STEP-NC.....	107
Figure 28 : Structure des modèles tbox# et abox# d'OntoSTEP-NC.....	109
Figure 29 : Implémentation des modèles abox# et tbox# dans Virtuoso	109
Figure 30 : Exemple de requête SPARQL sur OntoSTEP-NC implémenté	110
Figure 31 : Pièce test du cas d'étude.....	111
Figure 32 : Programme STEP-NC de la poche composée	112
Figure 33 : Logigramme du cas d'étude	113
Figure 34 : Workflow du scénario 1	114
Figure 35 : Requête sur la base de connaissance pour la reconnaissance d'entité du cas exact	115
Figure 36 : Cas d'étude avec une réponse exactement similaire	116
Figure 37 : Workflow du scénario 2	117
Figure 38 : Requête sur la base de connaissance pour la reconnaissance d'entité approchante	118
Figure 39 : Cas d'étude avec une réponse approchante	119
Figure 40 : Requête pour la mise en base du nouveau cas.....	120
Figure 41 : Workflow du scénario 3	121
Figure 42 : Modification pied-machine du programme de coupe	122
Figure 43 : Comparaison des programmes STEP-NC FAO/MOCN	123

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse de l'étude de l'interopérabilité pour l'industrialisation	35
Tableau 2 : Comparaison entre ISO10303-AP238 et ISO 14649 (Xu et al., 2005)	42
Tableau 3 : Organisation de la structure générale ISO 14649.....	43
Tableau 4 : Analyse des travaux STEP-NC	48
Tableau 5 : Les ontologies pour l'industrialisation.....	54
Tableau 6 : Traduction des cardinalités EXPRESS-OWL.....	77
Tableau 7 : Données extraites du programme STEP-NC	91
Tableau 8 : Paramètres d'usinage présents dans la base de connaissance	92
Tableau 9 : Classification des langages ontologiques	169
Tableau 10 : Choix de la plateforme de modélisation d'OntoSTEP-NC.....	172

Table des Annexes

Annexe A : Programme STEP-NC du cas d'illustration	152
Annexe B : Programme STEP-NC du cas d'illustration.....	156
Annexe C : Justification des choix OWL et Protégé	167

Glossaire

AIM : Application Interpreted Model

AP : Application Protocol

ARM : Application Reference Model

BE : Bureau d'Études

BM : Bureau des Méthodes

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CBR : Case Base Reasoning

CLM : Closed-Loop Manufacturing

ERP : Enterprise Resource Planning

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur

IAO : Ingénierie Assistée par Ordinateur

IPAO : Ingénierie des Procédés Assistée par Ordinateur

KBS : Knowledge Based System

KM : Knowledge Management

MES : Manufacturing Execution System

MOCN : Machine-Outil à Commande Numérique

MPM : Manufacturing Process Management

PDM : Product Data Management

PLM : Product Lifecycle Management

PP : Post-Processeur

SDM : Simulation Data Management

SI : Système d'Informations

TIC : Technologie de l'Information et de la Communication

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements chaleureux à mes directeurs de thèse :

- Je remercie Benoît EYNARD pour toute la confiance qu'il a placée en moi et de m'avoir permis de conduire mes travaux de thèse dans les meilleures conditions.
- J'adresse mes vifs remerciements à Julien LE DUIGOU pour les interminables discussions scientifiques, ses nombreux conseils et son soutien indéfectible au cours de ces 3 années de thèse.

Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux :

- Dimitris KIRITSIS et Luc MATHIEU pour avoir accepté de lire avec minutie ce mémoire et de rapporter sur mon manuscrit.
- Emmanuel CAILLAUD pour avoir accepté de présider le jury de thèse.
- Nabil ANWER, Philippe AUDINET, Alexandre DURUPT et Louis RIVEST pour avoir accepté d'être examinateur de mon travail de thèse.

Je tiens également à adresser mes remerciements à l'ensemble des partenaires du consortium du projet ANGEL, financé par le programme FUI (Fonds Uniques Interministériels) et soutenu par le pôle de compétitivité Systematic. Je remercie tous les partenaires du projet pour la qualité des échanges très riches scientifiquement.

Mes remerciements doivent aussi traverser l'Atlantique pour remercier les collègues du McNAIR à USC et plus particulièrement Ramy HARIK pour son accueil à Columbia, SC, USA.

Je voudrais également remercier l'ensemble des collègues du laboratoire Roberval, du département Génie de Systèmes Mécaniques qui m'ont permis d'évoluer dans un lieu de travail à l'ambiance conviviale. J'aurais également une pensée pour toutes les discussions très scientifiques qui ont pris place en I204 pendant les pauses déjeuner.

Je tiens à remercier l'ensemble des collègues de bureau I101 qui ont permis d'avoir à la fois une ambiance conviviale et une ambiance studieuse au cours de ces 3 années.

Enfin j'adresse mes remerciements à ma famille et Marine pour leur soutien constant dans tous les moments difficiles et de doutes rencontrés au cours de ces travaux de thèse.

Introduction générale

La mondialisation des marchés a considérablement transformé les habitudes et modes d'organisation des entreprises, tant du point de vue technologique, que managérial ou humain. Dans le contexte actuel, les entreprises manufacturières font face à des défis croissants et, pour répondre aux enjeux de compétitivité, doivent proposer une grande réactivité et flexibilité. Considérant la réduction des délais et des coûts, les entreprises se regroupent pour proposer des modèles industriels agiles et performants. Les prises de décisions ne sont donc plus locales, mais se font à un niveau global, au travers d'une entreprise étendue et fortement intégrée, grâce aux technologies de l'information.

Dans les entreprises manufacturières, les sites de production sont répartis de manière à générer des avantages compétitifs et à répondre aux demandes des clients. Cette délocalisation de la fabrication et cette distribution géographique s'inscrivent clairement dans le modèle d'entreprise étendue, qui vise à l'optimisation des décisions globales pour maximiser la stratégie de groupe. Un des enjeux pour la prise de décisions dans les entreprises étendues réside dans la capacité à échanger les informations au sein d'organisations complexes. C'est pourquoi ce modèle d'entreprise étendue s'appuie sur les réseaux des technologies de l'information. Cette complexité de réseau numérique devient donc une vraie problématique pour l'harmonisation des bonnes pratiques et des standards d'entreprise et, notamment, dans le cadre de la fabrication mécanique, avec des moyens de production différents et ne présentant pas les mêmes caractéristiques.

C'est en se basant sur cette vision de chaîne numérique d'entreprise pour le pilotage agile des systèmes de production que le modèle d'Usine du Futur est développé. Celui-ci s'inscrit en prolongement des modèles d'entreprise étendue, les concepts associés à l'Usine du Futur visant pour partie à intensifier l'intégration entre conception et fabrication via la chaîne numérique d'industrialisation. Ce modèle vise également une capitalisation des connaissances et savoir-faire métiers pour un pilotage plus agile des moyens de production et, ainsi, assurer la réalisation des pièces bonnes du premier coup.

Doublée d'un contexte environnemental avec des normes de plus en plus strictes, l'industrie aéronautique se voit contrainte de réduire les émissions carbone avec la réduction des masses et, donc, s'oriente vers l'utilisation des matériaux composites ou des métaux plus

légers que l'acier. C'est dans ce contexte, que le projet FUI14 ANGEL (Atelier Numérique coGnitif intEroperable et agiLe) s'est attaché à répondre aux problématiques de maîtrise des processus d'usinage de pièces en Titane et en Inconel, en définissant la mise en œuvre d'une chaîne numérique bidirectionnelle pour l'obtention de pièces bonnes du premier coup. En collaboration avec le consortium du projet associant donneurs d'ordres aéronautiques, usineurs, éditeurs de logiciels et académiques, les travaux présentés dans notre manuscrit proposent un modèle d'interopérabilité au niveau de la chaîne numérique d'industrialisation pour l'intégration entre conception et fabrication. Notre mémoire se compose de cinq chapitres.

Le premier chapitre sera consacré au contexte industriel et plus précisément aux chaînes numériques d'industrialisation. Après avoir défini les modèles d'entreprise étendue et d'usine du futur, les chaînes numériques des applications métiers et des systèmes d'information seront présentés et permettront de dégager notre problématique scientifique sur la base des verrous industriels identifiés dans le projet ANGEL.

Le second chapitre détaillera un état de l'art des solutions d'interopérabilité et de capitalisation de connaissances répondant aux besoins des phases de conception, d'industrialisation et de fabrication. Nous nous intéresserons à deux approches pour faciliter l'interopérabilité : les standards d'échange de données et les modèles ontologiques. Ensuite, les méthodes de gestion des connaissances seront étudiées pour la capitalisation d'informations issues de la production. De cette analyse, nous en déduirons les manques méthodologiques et les limites applicatives, afin de tracer les objectifs de notre proposition scientifique.

Le troisième chapitre présentera notre proposition s'articulant en deux composantes que sont le modèle OntoSTEP-NC et le processus Closed-Loop Manufacturing. Le modèle OntoSTEP-NC s'inscrira en tant que support des échanges de données au sein des chaînes numériques d'industrialisation. Le processus Closed-Loop Manufacturing, quant à lui, proposera un cadre de capitalisation des connaissances et savoir-faire de fabrication, en vue d'une intégration au niveau de l'industrialisation.

Le quatrième chapitre décrira une application de notre proposition, se basant sur un démonstrateur logiciel. Un cas d'étude exploitant trois scénarios permettra de valider la mise en œuvre des propositions OntoSTEP-NC et Closed-Loop Manufacturing.

Enfin, une conclusion retracera les grands points de ce manuscrit et mettra en avant les contributions de nos travaux. Des perspectives pour l'évolution du contexte seront mises en regard de nos travaux.

Contexte Industriel et problématique

Ce premier chapitre est consacré au contexte industriel et plus précisément aux chaînes numériques d'industrialisation. Après avoir défini les modèles d'entreprise étendue et d'usine du futur, les chaînes numériques des applications métiers et des systèmes d'information seront présentées et permettront de dégager notre problématique scientifique sur la base des verrous industriels identifiés dans le projet ANGEL.

1.1 Défis industriels pour les procédés et technologies de fabrication dans l'Usine du Futur

1.1.1 L'entreprise étendue centrée sur la fabrication

Considérant l'intégration d'une sous-traitance de plus en plus forte vers d'autres pays pour les activités de conception, d'industrialisation et de production, les entreprises manufacturières s'inscrivent clairement dans des modèles d'entreprise étendue en reprenant la vision suivante : *"The extended enterprise includes the relationships that an enterprise has with its customers, suppliers and business partners. The extended enterprise is responsible for the whole product life cycle, from material procurement and supply management, to production and manufacturing, further to product distribution and customer service, and finally to the recycling and disposal of end-of-life products"* (Browne et al., 1999).

Ce concept d'entreprise étendue apparaît essentiellement avec la volonté pour les manufacturiers, même avec des situations géographiques éloignées, de créer un partenariat afin d'obtenir un avantage de compétitivité (Jagdev and Browne, 1998). Afin d'obtenir la meilleure collaboration de ressources et de compétences, les organisations d'une entreprise étendue peuvent s'appuyer sur différents sites géographiques distants les uns des autres. Pour assurer une collaboration entre ces différents sites et acteurs, une mise en place de systèmes de collaboration et de transfert d'information est nécessaire. Pour cela, une utilisation massive des ICT (Information and Communication Technologies – Technologie d'information et de communication) permet d'obtenir un réseau d'échange d'informations complet mais complexe (El Kadiri et al., 2015). Dans le cadre de l'entreprise étendue pour la fabrication qui nous intéresse ici, le rôle des ICT pour l'optimisation et l'agilité de la production va être précisé.

Bien que le but de l'entreprise étendue soit de profiter des meilleures compétences, de mutualiser les ressources et de répartir les coûts et les risques entre les différentes organisations, les échanges d'informations et la capitalisation d'expériences présentent encore quelques faiblesses. En effet, la diversification des solutions technologiques et des formats d'échanges peuvent générer des incompatibilités pour la collaboration pleine et totale (Loh et al., 2006). Dans le cadre de la fabrication, la diversité dans les moyens de production dans les parcs machines ne facilite pas l'intégration totale de la production. C'est donc au travers d'une harmonisation de l'entreprise étendue que l'intégration sera maximale

et la coopération totale. Dans cette optique d'harmonisation et d'intégration des moyens de fabrication, la section suivante s'intéresse au cadre mis en place pour l'usine du futur.

1.1.2 Intégration des technologies et des procédés pour l'Usine du Futur

La diversité des moyens de production tels que les parcs machines ou les systèmes d'information dans l'entreprise étendue devient un des enjeux majeurs à résoudre pour la maîtrise et la flexibilité de la fabrication. C'est pourquoi, avec la volonté d'améliorer le triptyque Coût-Délai-Qualité et de réduire les temps de mise sur le marché, les usineurs voient apparaître de nouveaux défis pour la fabrication. Une amélioration de la phase d'industrialisation permettrait de réduire le temps total du cycle de développement produit en évitant un certain nombre d'aller-retour entre le bureau d'études, le bureau des méthodes et l'atelier.

Dans le même sens, (Effra, 2012) précise une roadmap pour définir les fondements de l'Usine du Futur couvrant différentes thématiques telles que : les processus de fabrication avancés, les technologies pour l'information, la modélisation et simulation pour les méthodes et outils de fabrication, la gestion des savoir-faire métier, etc. Ainsi, l'Usine du Futur est définie comme l'accroissement de la vitesse de traitement de l'information et s'appuie sur le développement massif des réseaux de communication. Cette nouvelle mutation technologique se caractérise par une interconnexion totale des machines et des systèmes au sein des sites de production, entre les sites et avec l'extérieur (AFM, 2015). Il s'agit d'une nouvelle organisation des moyens de production, aussi bien au stade de l'approvisionnement que de la fabrication.

Pour atteindre l'organisation Usine du Futur à l'horizon 2030, de nombreuses solutions émergent pour favoriser les échanges d'informations, notamment pour la phase d'industrialisation qui constitue une étape pivot, pour aller de la conception vers la fabrication. On peut, notamment, citer l'utilisation de nouveaux moyens pour le pilotage de la fabrication au travers de standards, de méta-modèles basés web (Zhang et al., 2015), de l'IoT (Internet of Things – Internet des Objets) (Atzori et al., 2010) ou encore du Cloud Manufacturing (Tao et al., 2011) qui proposent la mise à disposition d'informations pour le pilotage de la fabrication au travers des technologies web pour l'utilisation au besoin. Basés sur les technologies de l'information et de communication, ces modèles émergents proposent de travailler au niveau

de la chaîne de pilotage des moyens de fabrication. La partie suivante s'attache à définir la chaîne numérique permettant le pilotage des machines-outils, les systèmes d'information couvrant les phases de la conception, d'industrialisation et de la fabrication et les liens entre ces deux chaînes.

1.2 De la conception à la production : Les chaînes numérique et physique d'usinage

1.2.1 La création des informations Produit-Process

Le bureau d'études (BE) réalise la conception des produits et conduit aussi l'intégralité des calculs d'optimisation : résistance des pièces en mécanique, performances, thermique... Ici, deux étapes sont réalisées : la phase de conception et la phase de calcul qui conduisent à la définition d'un modèle géométrique de la pièce. Ce modèle géométrique obtenu à l'aide d'un logiciel de CAO pourra ensuite être exporté vers le bureau des méthodes pour permettre la phase d'industrialisation.

Le bureau des méthodes (BM) génère, via un logiciel de FAO, les paramètres de fabrication et les trajectoires d'usinage en se basant sur le modèle CAO transmis par le BE et les gammes et séquences définies à l'aide de logiciel d'IPAO. Une fois les paramètres et trajectoires décrits, le Post-Processeur (PP) va les transcrire en langage machine ISO. Ensuite, une étape de simulation CN, avant le passage sur machine, peut être effectuée pour valider le programme CN, détecter les éventuelles collisions de l'outil au cours de sa trajectoire dans l'environnement machine et vérifier la conformité géométrique de la pièce usinée virtuellement.

En production, la MOCN exécute le programme d'usinage qui lui sera fourni en fin de chaîne. La chaîne numérique se compose donc de cinq étapes majeures au niveau des applications métiers : CAO, FAO, PP, simulation CN et MOCN comme illustré en Figure 1.

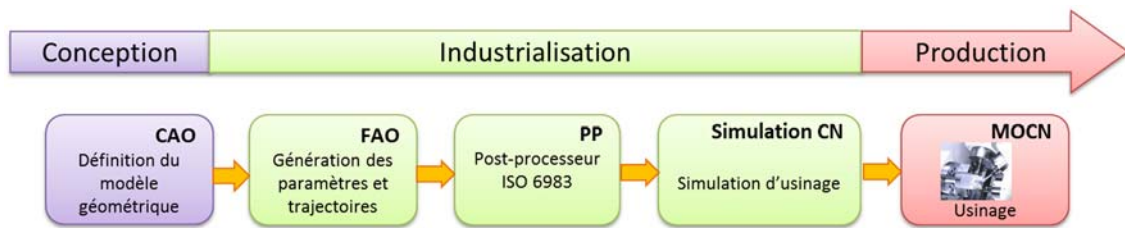


Figure 1 : Chaîne numérique des applications métiers

1.2.1.1 La conception assistée par ordinateur

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) peut être définie comme l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'aider le concepteur mécanique dans la définition et la mise au point d'un produit. Un logiciel de CAO permet de représenter et d'étudier le comportement d'un objet en environnement virtuel dès les phases amont de conception. Ainsi, les fonctionnalités avancées de coupes, de perspectives ainsi que le calcul des volumes, des masses et des inerties permettent au concepteur d'évaluer la maturité de son modèle pour répondre aux contraintes imposées par le cahier des charges. Grâce à sa puissance de calcul, le logiciel de CAO permet également d'étudier le comportement d'ensembles mécaniques complexes obtenus par l'assemblage de pièces. En définitive, ces logiciels permettent, non seulement, la conception de pièces mécaniques mais participent aussi à la simulation de leur comportement, et donc à la validation des solutions retenues.

Les logiciels de CAO proposent majoritairement des architectures de définition des pièces sous forme d'arbre. Cet arbre de conception est basé sur des entités (Extrusion, Trou, Poche...) qui décrivent la géométrie 3D des pièces mécaniques en se basant sur des esquisses 2D. Cette architecture sous forme de features permet alors le paramétrage de certains éléments tels que l'ajustement de dimensions, les répétitions de formes... Toujours dans un souci de productivité, il devient alors possible d'utiliser des bibliothèques de pièces paramétrées qui auront été préalablement utilisées ou programmées favorisant ainsi la standardisation des solutions techniques.

1.2.1.2 La Fabrication Assistée par Ordinateur

La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) peut être définie comme l'ensemble des logiciels et des techniques informatiques qui permettent la programmation d'usinage et la

génération des parcours outils en s'appuyant sur le modèle géométrique. Il s'agit de fabriquer un produit en respectant des contraintes technologiques, économiques, géométriques et de qualité. Pour cela, il faut déterminer les méthodes de fabrication les plus performantes, les dimensionner et les réaliser dans un ordre logique et optimal. Le but de la FAO est donc d'écrire le fichier contenant le programme de pilotage d'une MOCN. Ce fichier va décrire précisément les mouvements que doit exécuter la machine-outil pour réaliser la pièce demandée.

En se basant sur le modèle 3D réalisé en CAO et après importation dans le logiciel de FAO, il est possible de réaliser la programmation des parcours d'outils, le cœur de l'activité de la FAO. Le programmeur FAO du BM crée les parcours en respectant les choix d'outils, les vitesses de coupe et d'avance, et les stratégies d'usinage tels que définis par la gamme en fonction des contraintes machines et du type de matériau à usiner.

Le logiciel de FAO permet ainsi de "superposer" les trajectoires des outils choisis sur la modélisation 3D et d'enregistrer cette programmation. Ces programmations décrivent sous divers langages informatiques l'intégralité des déplacements outils à effectuer ainsi que tous les paramètres propres à l'usinage tels que les vitesses de broche, les vitesses d'avance, la lubrification, les changements d'outils...

1.2.1.3 Post-Processeur

Le Post-Processeur (PP) est un outil informatique utilisé après la phase de FAO. Le PP permet de traduire le langage d'une FAO (langage informatique/ordinateur), pour le transférer vers une MOCN. En effet, un logiciel de FAO crée un fichier qui n'est pas directement assimilable par la MOCN. Il faut donc traduire ce fichier pour créer un nouveau fichier exploitable par la MOCN. Ce fichier, peut être, par exemple, au format ISO, qui est supporté par la plupart des MOCN. Le PP se résume donc à un programme informatique qui assure la traduction entre le programme issu de la FAO et le programme assimilable par la MOCN.

En revanche, chaque constructeur de MOCN a ses spécificités qui nécessitent des adaptations au niveau du PP. Chaque logiciel de FAO a lui aussi ses propriétés qui font que le PP d'un logiciel A ne sera pas le même que le PP d'un logiciel B pour la même machine-outil.

C'est pourquoi durant la génération de la sortie FAO, une table de référence normalisée complète l'expression du programme.

Le PP peut être vu comme le maillon "faible" de la chaîne numérique puisque provoquant l'unicité d'un programme de coupe. Cependant, il constitue aussi un élément avec une très grande valeur ajoutée puisqu'il préfigure l'interface entre le virtuel et le physique. Le PP transforme le fichier sortant d'une FAO en un fichier au format ISO directement interprétable par la Commande Numérique (CN) de la machine-outil. Il y a un gisement de productivité très important sur ce maillon de la chaîne numérique.

1.2.1.4 Simulation d'usinage

La simulation d'usinage permet de reproduire virtuellement (visualisation volumique) le programme d'usinage qui a été généré au niveau du PP avant de l'envoyer vers la MOCN. Cette étape propose de visualiser l'action des outils dans la matière, ce qui permet au programmeur la vérification de son programme d'usinage et d'éviter a priori les collisions sur les machines-outils. Cette étape de vérification est cruciale pour ne pas engendrer de dégradation de matériel et prévoir au mieux les aléas de production.

De plus, les logiciels de simulation d'usinage complets favorisent la mise au point, l'optimisation et l'exploitation de programmes d'usinage pour les MOCN en recréant virtuellement toutes les contraintes liées au parc machines disponible. Les problèmes résolus par la simulation d'usinage permettent d'améliorer considérablement le taux de rentabilité de l'environnement MOCN. Cet environnement comporte la programmation, mais également le choix des outillages, des modes de fixation, des outils et de leurs porte-outils, et des machines-outils en analysant toutes les contraintes cinématiques dégagées lors de la simulation. C'est définitivement la dernière étape virtuelle avant le passage en usinage réel.

1.2.1.5 Machines-outils à commande numérique

Dans le monde de l'usinage, on distingue deux grandes familles de machines-outils : les machines de fraisage et les machines de tournage. Il existe aussi des machines dites « centre de tournage » ou « multicanaux » qui associent à la fois le tournage et le fraisage. Les fraiseuses sont caractérisées en fonction du nombre d'axes de coupe auxquels elles répondent : 2,5 axes, 3 axes, 4 axes, 5 axes et 6 axes. Ces MOCN sont généralement équipées

de magasins d'outils (tourelles, tables, chaînes) sur lesquels sont disposés les différents outils. Les changements d'outils équipant la tête d'usinage sont programmés en fonction de la définition numérique de la pièce à réaliser. Depuis quelques années, l'apparition des machines dites à usinage grande vitesse (UGV) permettent de diviser le temps d'usinage par 3 ou 4.

Une Machine-Outil à Commande Numérique est composée de trois organes principaux :

- Le pupitre de commande sert à dialoguer avec le directeur de commande numérique et envoie des ordres d'opérations codées. Il possède des touches sensibles ainsi qu'un écran graphique. Celui-ci sert à visualiser par exemple le programme ou le profil fini de la pièce, la trajectoire des outils, etc.
- Le directeur de commande numérique est un automate composé d'éléments électroniques qui exploite et interprète les informations données par le programme ou par les capteurs de mesure.
- La machine-outil (MO) constitue la partie opérationnelle et permet ainsi d'actionner les déplacements pour l'usinage des plateaux, tourelles, berceaux...

La MOCN désigne donc la famille des MO qui sont dotées d'une Commande Numérique (CN), la CN correspondant à l'ensemble des matériels et logiciels ayant pour fonction de donner les instructions de mouvements à tous les organes d'une MO. En effet, chaque CN peut disposer de ses propres fonctions spécifiques ce qui provoque des modifications du programme d'usinage à mesure que la CN évolue. De même un changement de MO ou de cinématique machine entraîne une modification du programme d'usinage.

Bien que chaque outil dans la chaîne des applications métiers soit indépendant, chaque application produit des données qui sont liées au processus de développement en cours. De façon à conserver un historique pour l'entreprise, ces fichiers sont archivés et gérés au niveau des systèmes d'information. C'est pourquoi dans la prochaine section nous proposons d'étudier la chaîne numérique des systèmes d'information.

1.2.2 La gestion des informations Produit-Process

Le Product Lifecycle Management (PLM) est avant tout une stratégie d'entreprise. Il s'agit de la gestion des données produit tout au long du cycle de vie produit en prenant en compte tous les acteurs et toutes les entités s'y référant. (Terzi et al., 2010) définissent le PLM comme : *"PLM can be broadly defined as a product centric – lifecycle-oriented business model, supported by ICT, in which product data are shared among actors, processes and organizations in the different phases of the product lifecycle for achieving desired performances and sustainability for the product and related services"*.

Cette gestion des données produit tout au long du cycle de vie est primordiale pour assurer la continuité de l'information au travers des différentes étapes de la conception, de l'industrialisation et de la production. On distingue différents systèmes d'information intervenant dans les phases du cycle de vie des produits : le système de gestion des données techniques ou Product Data Management (PDM), le système de gestion des données de simulation ou Simulation Data Management (SDM), le système de gestion des processus de fabrication ou Manufacturing Process Management (MPM) et enfin le progiciel de gestion intégrée ou Entreprise Ressource Planning (ERP). Pour gérer les évolutions du produit tout au long de son cycle de vie, il est important de mettre en œuvre ces trois solutions (Figure 2).

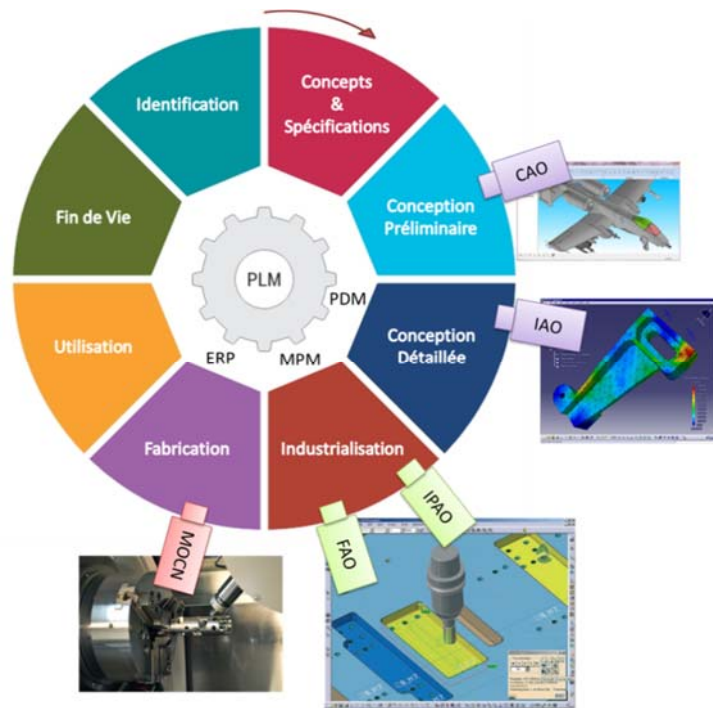


Figure 2 : Système PLM et applications métiers adapté de (Le Duigou, 2010)

1.2.2.1 Les Product Data Management

En regard de la masse considérable de données que les bureaux d'études doivent traiter, les Product Data Management (PDM) sont apparus suite au besoin de gérer des références produits et les documents associés, que ce soient des documents numériques, des modèles de produits, des modèles de documents, des liens, etc. Ils répondent également aux besoins de gérer l'organisation de l'information au sein des entreprises tant au niveau de la coordination des services que de la gestion des vues utilisateurs et des droits. Un système PDM a pour fonction de gérer les données relatives à la conception de produits. Il se positionne en tant que gestionnaire de la structure produit, qui organise et stocke les informations relatives au produit et qui distingue ses différentes configurations. Il propose également des fonctionnalités permettant le versionnement ainsi que le lien entre documents et composants de la structure produit.

En résumé, le PDM se situe donc au cœur de l'activité de conception, puisqu'il prend en charge aussi bien les processus de conception que les données techniques grâce (Eynard et al., 2004):

- Au suivi et la gestion de tout changement produit (modification, évolution des versions...)
- A l'organisation des données produits (Nomenclature – Bill of Materials : BOM)
- A la réutilisation de données produit déjà existantes
- A l'optimisation de la collaboration entre concepteurs/métiers
- Au management visuel du cycle de conception produit

1.2.2.2 Les Manufacturing Process Management

Le Manufacturing Process Management (MPM) permet de créer le lien entre les phases amont de conception et les phases aval de production en définissant "comment" on doit produire (ressources, coûts, documentation...). Pour ce faire, le MPM fait appel à un environnement virtuel. Grâce à ce système, un pont se crée entre les PDM et les ERP (Fortin and Huet, 2007). En effet, la transformation de la eBOM (Engineering Bill Of Material) en mBOM (Manufacturing Bill Of Material) permet d'organiser la structure produit en vue fabrication/production. L'arborescence qui était alors exploitable au niveau de la CAO (vue produit) va pouvoir être transférée sous forme de séquence de fabrication vers les plateformes ERP (vue production) pour la planification de la production.

Le MPM permet aussi d'estimer les ressources humaines et les moyens techniques nécessaires et de générer les documents voulus pour le lancement en production. Enfin, il permet d'effectuer un calcul de l'ensemble des coûts liés à la fabrication. Ce type d'outil crée le lien entre le « quoi » (CAO/PDM) et le « quand et où » (MOCN/ERP), soit le « comment ». Le travail autour des séquences d'usinage permet notamment de fournir un support pour explorer les différents scénarii de ligne de production, réduire le lead time (temps d'écoulement) et rendre les lignes de fabrication plus efficaces.

La séquence exécutée au niveau du MPM peut se résumer à l'enchaînement suivant :

- En se basant sur la eBOM, le MPM définit la stratégie globale en croisant les spécifications de conception et la capacité de production.
- Le MPM définit alors un pré-planning de production en générant la mBOM et une séquence de fabrication puis donne un aperçu de la mobilisation des ressources et une estimation des temps et coûts de fabrication.
- Une étape d'optimisation du processus de fabrication est réalisée par des experts méthodes.
- La documentation du processus sous forme de gammes et de séquences d'usinage est créée.
- Les données documentées sont alors envoyées vers les systèmes de gestion de production (ERP)

Les MPM permettent d'assurer la transition des données depuis les phases amont de conception vers les phases aval de production. Ils couvrent ainsi la partie industrialisation du cycle de vie des produits. En termes de systèmes d'information cela signifie être en mesure de transformer les informations spécifiques liées au produit au niveau du PDM en informations utilisables pour la production au niveau des systèmes ERP. Il apparaît donc très important qu'une intégration des données des différents systèmes à l'autre soit possible. Les éditeurs de solutions PLM étant peu nombreux, il existe peu d'intégrations des solutions et elles se limitent souvent à des intégrations uni-éditeurs. On peut donc citer en exemple les modules PDM et MPM Windchill de PTC qui permettent d'assurer la transition entre vue produit et vue fabrication.

1.2.2.3 Les Enterprise Resources Planning

Les progiciels Enterprise Resource Planning (ERP) ont pour principal objectif d'intégrer toute la gestion de l'entreprise. Dans ce cadre, une base de données unique gère toutes les informations, ce qui garantit cohérence et contrôle global de l'activité de l'entreprise en temps réel. Les ERP permettent de mettre en réseau, à l'aide d'une base de données unique, l'ensemble des informations relatives aux fonctions de l'entreprise pour accroître la productivité globale. Par conséquent, les informations gérées par un ERP peuvent être utilisées de différentes manières : les directions des services production, relation client, finance/comptabilité peuvent utiliser les informations de l'ERP comme support à la décision. Il permet, à différents services de l'entreprise, de travailler de manière collaborative et, de communiquer via une interface commune.

Dans le domaine de la production, les systèmes d'information de type ERP peuvent contenir des informations comme :

- les caractéristiques des articles (produits fabriqués et composants achetés),
- la nomenclature et la gamme de fabrication des articles fabriqués/assemblés,
- les caractéristiques des moyens de production,
- des programmes directeurs de production,
- ou des déclarations de production (volume de produits fabriqués, quantité de matière consommée, temps passé, etc.).

De manière générale, les ERP offrent des fonctionnalités intégrant tous les champs de la gestion, une grande capacité de paramétrage et peuvent être considérés comme un ensemble modulaire de systèmes d'information qui intègre les informations et les processus de toutes les fonctions de l'entreprise.

L'ensemble des systèmes d'information permet ainsi de former la chaîne numérique qui permet d'assurer la gestion des données tout au long du cycle de vie produit. En plus d'assurer la collaboration entre métiers au cours du cycle de développement produit, les systèmes d'information (PDM, MPM, ERP) favorisent la réutilisation de données déjà existantes pour chacune des applications métiers. En effet, comme illustré sur la Figure 3, on retrouve au cours des trois phases de développement produit un parallèle entre la chaîne des applications

métiers (CAO, FAO, PP, Simulation CN, MOCN) et la chaîne des systèmes d'information (PDM, MPM, ERP).

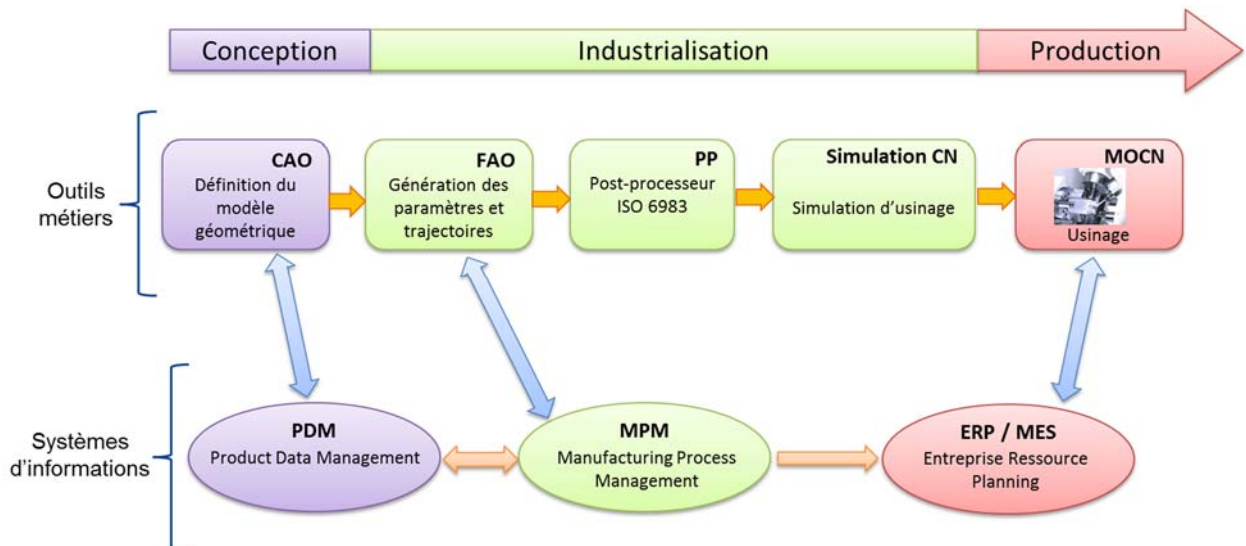


Figure 3 : Les chaînes numériques des applications métiers et des systèmes d'information

1.3 Enjeux de l'industrie aéronautique sur les procédés de fabrication

Historiquement, l'aéronautique est un secteur marqué par une exigence continue d'innovation et de progrès technologiques. Des enjeux multiples ont été traités ces dernières décennies avec, en tout premier lieu, la sécurité d'une part et, la maîtrise des coûts d'autre part et, depuis quelques années, la réduction des nuisances sonores et de la consommation de carburant. La recherche de la réduction de l'impact environnemental du transport aérien s'inscrit naturellement dans cette démarche. Si bien que, réduire la consommation de carburant des avions est une nécessité absolue pour l'industrie aéronautique, et une lutte sur tous les fronts. Dans ce contexte, soulignons que l'ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe) a fixé un objectif ambitieux de réduction de 50% des émissions de CO₂ à horizon 2020 et de 75 % à horizon 2050.

D'après un rapport du GIFAS, sur le plan énergétique, un allègement de la structure d'une tonne représenterait, au cours de la vie d'un avion, une réduction de consommation de 6 000 tonnes de kérosène ou une réduction de 20 000 tonnes de gaz à effet de serre. La réduction de la masse des moteurs répond aux mêmes enjeux (GIFAS, 2015). C'est à partir de cette

nécessité de réduction des masses que les constructeurs d'aéronefs favorisent l'utilisation du Titane et de l'Inconel par rapport aux pièces en acier. L'utilisation de ces matériaux fait notamment sens pour les pièces mécaniques présentant de fortes contraintes mécaniques et seront ainsi préférés aux matériaux composites.

Bien que favorisant la réduction des masses, ces matériaux présentent des contraintes importantes dues, majoritairement, aux propriétés physiques des matériaux qui modifient les conditions de coupe et qui demandent des études spéciales. En effet, la casse outils et les problèmes de tolérancement entraînent des incertitudes d'usinage et des rebuts importants. Au regard du coût des matières premières pour ces matériaux, de nombreux échecs ne sont pas admissibles et imposent d'obtenir une pièce bonne du premier coup. Cet objectif induit, par conséquent, une maîtrise des processus d'usinage et du pilotage d'usinage pour satisfaire un tel taux de succès. Ce point est d'autant plus compliqué à atteindre que la structure de l'industrie aéronautique s'appuie sur les modèles d'entreprise étendue.

C'est dans ce contexte que le projet de recherche FUI 14 ANGEL (Atelier Numérique coGnitif intEroperable et agiLe), réunissant un consortium de l'industrie aéronautique (SAFRAN, Airbus), de spécialiste de l'usinage (Spring Technologies, UF1), et d'académiques (Roberval/UTC, Lurpa/ENS) s'est intéressé à l'intégration numérique des phases conception-industrialisation-production. Une des solutions possibles pour augmenter la performance de chaque phase et réduire le degré d'incertitude, passe par la capitalisation et la réutilisation des connaissances et des savoir-faire métiers. Dans le cas de l'usinage, la capitalisation s'effectue par la remontée d'information, depuis les machines et la fabrication, vers les phases amont d'industrialisation et de conception. En effet, aujourd'hui certaines modifications sont opérées au niveau de la fabrication, directement sur la programmation des machines-outils, pour améliorer les séquences d'usinage et ces modifications ne sont pas propagées par retour sur les phases amont. En considérant l'hypothèse qu'un processus qui a donné la dernière pièce bonne peut être considéré comme un processus de référence, ce défaut de capitalisation ne permet donc pas d'assurer une bonne maîtrise des processus.

1.4 Conclusion et problématique

Dans un contexte d'entreprise étendue, avec des sites distants les uns des autres dans le but de générer des avantages compétitifs, les industries manufacturières doivent faire face à de nombreuses contraintes. En dehors des flux de matières, elles se confrontent au problème de l'échange d'information au travers du réseau créé par les sites distants. C'est pourquoi depuis de nombreuses années, les technologies de l'information et de la communication se sont très largement développées si bien qu'elles sont devenues complexes et très diversifiées. De même, dans un contexte d'entreprise étendue pour la fabrication, la diversité des moyens de production entraîne des variations et des complexités pour la flexibilité de l'usinage entre les sites de production.

C'est pourquoi dans un souci d'harmonisation et de simplification, une quatrième révolution industrielle se met en place pour définir le cadre et les solutions pour l'Usine du Futur. Cette Usine 4.0 replace la fabrication au centre de l'entreprise étendue en organisant les technologies de l'information autour des systèmes de production. En s'intéressant aux chaînes numériques couvrant les phases de conception, d'industrialisation et de fabrication et aux systèmes d'information supports, il apparaît que les éléments de pilotage sont nombreux et les diversités complexes à gérer. Avec la volonté de tendre vers les modèles Usine du Futur, on observe l'apparition de nouveaux moyens dans le but de favoriser les échanges d'information et ainsi de retrouver une chaîne numérique de pilotage de fabrication intégrée et ainsi pouvoir maîtriser les processus de fabrication.

Par exemple, dans le cas particulier de l'industrie aéronautique, il est nécessaire de réduire les masses pour répondre aux nouveaux critères de respect de l'environnement. Une des solutions envisagées pour réduire ces masses passe par l'utilisation de matériaux tels que le titane et l'inconel qui sont plus légers et qui présentent des propriétés mécaniques plus intéressantes que l'acier. Bien que ces matériaux permettent de réduire les masses, leurs comportements lors des phases d'usinage de pièces mécaniques sont encore peu connus et entraînent beaucoup de variations sur les conditions de coupes. Il y a donc nécessité de maîtriser le processus d'usinage et le comportement machine en termes de précision et de fiabilité du processus notamment dans le cadre d'entreprise étendue qui présente de nombreuses diversités dans les parcs machines et dans les versions des technologies.

En repartant de la nécessité de maîtrise des processus et du pilotage de l'usinage de matériaux tel que l'Inconel et le Titane, il apparaît essentiel de pouvoir capitaliser les savoir-faire métiers issus de la fabrication. Cette capitalisation est essentielle pour pouvoir améliorer les processus de fabrication et sécuriser ainsi les bonnes pratiques des entreprises pour réaliser une pièce bonne du premier coup. Cette vision est renforcée par la diversité des moyens de production tels que les parcs machines dans l'entreprise étendue qui deviennent alors un des enjeux à résoudre pour la maîtrise et la flexibilité d'usinage. En s'appuyant sur les verrous pour la capitalisation des informations d'usinage, on peut générer la question suivante : Comment assurer l'interopérabilité dans la chaîne numérique d'industrialisation pour atteindre une conception-fabrication intégrée?

Pour répondre à cette question, le chapitre 2 propose d'étudier l'état de l'art scientifique existant en s'intéressant, notamment, aux solutions d'interopérabilité, de façon à lever les verrous qui ont été identifiés dans ce chapitre. L'état de l'art sera orienté sur les solutions d'échanges d'informations aussi bien au niveau de la chaîne des applications métiers au travers des standards et modèles ontologiques qu'au niveau de la chaîne des systèmes d'information. L'état de l'art traitera également les solutions pour la gestion, la capitalisation et la réutilisation des expertises métiers et des connaissances pour l'usinage et l'industrialisation.

État de l'Art

Ce second chapitre propose un état de l'art sur les solutions pour l'interopérabilité et la capitalisation des connaissances entre les phases de production, d'industrialisation et de fabrication. Nous nous intéresserons à deux solutions pour assurer l'interopérabilité : les standards et les modèles ontologiques. Nous mettrons en évidence les limites pour l'industrialisation, tant au niveau de STEP-NC avec un manque de capacité de capitalisation, qu'au niveau des ontologies avec un niveau de granularité insuffisant.

Ensuite, l'aspect gestion des connaissances (Knowledge Management : KM) sera étudié pour la capitalisation des connaissances issues de la fabrication comme réponse aux manques des solutions STEP-NC et des ontologies. Cette analyse portera sur les solutions pour l'intégration de connaissances et savoir-faire au niveau de la phase d'industrialisation.

Cette analyse de l'état de l'art permettra de mettre en avant deux barrières scientifiques.

2.1 Les solutions pour l'interopérabilité

2.1.1 Définition de l'interopérabilité

Selon Kosanke (Kosanke, 2005), une recherche spécifique donne 22 définitions de l'interopérabilité. En fonction de l'interprétation qui en est faite et des attentes des personnes qui l'emploient, le terme interopérabilité peut prendre différents sens. C'est pourquoi, au fil de la bibliographie un grand nombre de définition de l'interopérabilité peut être trouvé. Dans (IEEE, 1990) l'interopérabilité est définie comme « La capacité pour deux (ou plus) systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser les informations échangées ». Des projets, tels que (ATHENA, 2004) ou (INTEROP, 2004), définissent l'interopérabilité pour les entreprises comme étant la capacité d'interaction entre entreprises ou, tout du moins, entre parties d'entreprises. On peut enrichir la définition ci-dessus avec la vision de (Vernadat, 1996) qui définit l'interopérabilité comme « la capacité à communiquer avec des systèmes pairs et à accéder aux fonctions des systèmes pairs ». Ici, apparaît la notion d'échange de fonctionnalités comme élément de l'interopérabilité. Au vu de la problématique énoncée ici, nous retiendrons plutôt la définition de (Wegner, 1996) qui décrit l'interopérabilité comme « La capacité pour 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 ».

Nous résumerons donc l'interopérabilité sous forme d'un triptyque :

- Communiquer et échanger les informations
- Exploiter les informations échangées
- Utiliser les fonctionnalités d'un système tiers

2.1.2 Continuité du flux d'information

D'après (Chen et al., 2008), l'interopérabilité est une étape pour parvenir à réaliser une intégration complète. L'interopérabilité est souvent vue comme une forme de coexistence, d'autonomie et d'environnement fédérateur, contrairement à l'intégration qui fait référence à un concept de coordination, de cohérence et d'uniformisation. L'intégration totale résulte de systèmes interdépendants et qui ne sont pas séparables. On retrouve également les systèmes interopérables basés sur la communication inter systèmes et qui sont en interaction. Ces derniers peuvent ainsi échanger des services tout en conservant leurs propres logiques de

fonctionnement. On peut donc avoir l'affirmation suivante : "Deux systèmes intégrés sont forcément interopérables, alors que deux systèmes interopérables ne sont pas forcément intégrés" (Chen and Doumeingts, 2003).

A l'opposé de l'intégration, on retrouve la compatibilité. La compatibilité signifie que les systèmes n'interfèrent pas dans le fonctionnement les uns avec les autres. Des systèmes interopérables sont donc compatibles mais l'inverse n'est pas vrai : des systèmes compatibles ne sont pas forcément interopérables considérant le fait qu'ils n'échangent pas de services.

(Panetto, 2007) place l'interopérabilité dans le "continuum intégration" entre la compatibilité et l'intégration totale. Si la compatibilité apparaît comme le minimum requis, la frontière entre interopérabilité et intégration dépend directement du niveau d'opérations de ce genre de systèmes.

Pour répondre à la problématique de continuité du flux d'informations, (EIF, 2004) définit trois niveaux d'interopérabilité :

- Le niveau technique
- Le niveau sémantique
- Le niveau organisationnel

Un système est dit interopérable si et seulement s'il répond, à chaque instant, aux trois niveaux d'interopérabilité. Le niveau technique assure la continuité du flux d'informations au travers d'outils et de solutions technologiques. Le niveau sémantique assure le partage de l'information et des services pour conserver le flux sémantique. Le niveau organisationnel concerne les processus, les utilisateurs et les personnes participant au fonctionnement du système (Paviot, 2010).

2.1.2.1 L'interopérabilité technique

(Van Der Veer and Wiles, 2008) définissent l'interopérabilité technique comme les composantes logicielles ou matérielles, les systèmes et les plateformes qui permettent d'assurer la communication d'une machine à l'autre. L'interopérabilité technique est centrée sur les protocoles (de communication) et l'infrastructure nécessaire à ces protocoles.

Lorsque l'on souhaite mettre en œuvre une interopérabilité entre deux systèmes, une solution possible est l'intégration point par point. Dans le cas de la stratégie point par point, si l'on a un schéma de n systèmes à connecter entre eux, il faudra un nombre de traducteurs

égal à $n(n-1)/2$ pour réaliser l'intégration. Il apparaît évident qu'une telle architecture n'est pas envisageable, considérant le nombre de traducteurs à développer, mais aussi, pour tous les coûts de maintenance nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système. En opposition à la stratégie point par point et depuis les travaux de (Wiederhold, 1992), la stratégie par médiateur s'est imposée. En effet, cette architecture présente l'avantage de permettre une plus grande agilité des systèmes d'information et d'avoir un coût global de possession des interfaces plus faible. La différence entre une architecture point par point et une architecture "médiateur" est présentée sur la Figure 4.

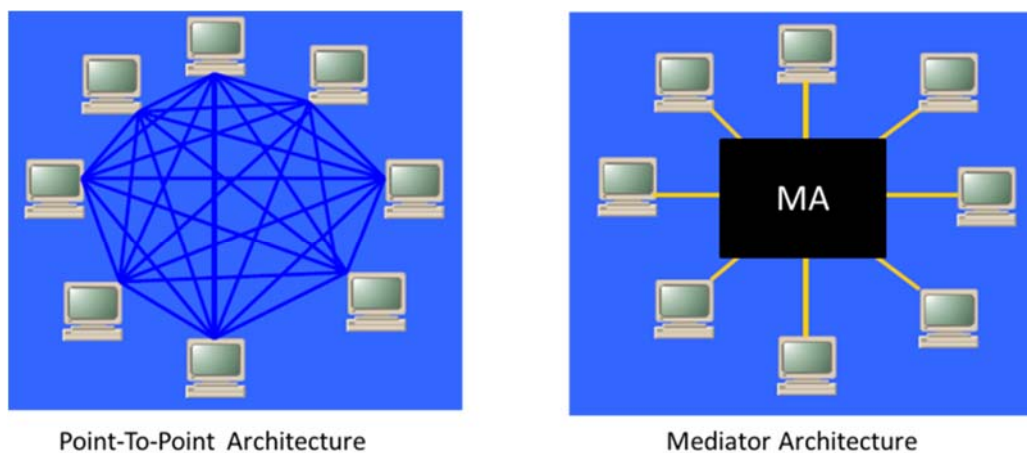


Figure 4 : Comparaison des architectures point par point / médiateur

Un médiateur doit remplir trois fonctions de bases (Bénaben et al., 2006) :

- Conversion et mise à disposition des données
- Gestion des applications
- Orchestration des processus collaboratifs

En contrepartie, il est possible de mettre en avant l'unicité du médiateur qui peut entraîner en cas de défaillance une panne de tout le système. De plus, si le flux d'information s'avère trop important, le médiateur pourrait constituer un goulot d'étranglement et ainsi perturber le flux sémantique.

Pour assurer l'interopérabilité, on peut aussi se baser sur une architecture orientée service (SOA) (Booth et al., 2004). Les Web Services offrent une solution permettant de faire interopérer différentes applications informatiques, indépendamment de la plateforme ou de l'environnement dans lesquels elles sont exécutées.

2.1.2.2 L'interopérabilité sémantique

(Özacar et al., 2011) définissent l'interopérabilité sémantique comme la capacité à interpréter automatiquement l'information échangée avec justesse et sens, dans le but de produire des résultats utiles aux yeux des utilisateurs finaux du système en question.

Il existe différentes approches pour atteindre l'interopérabilité sémantique. D'après la norme (ISO 14258 1998), il existe trois façons d'aborder l'interopérabilité sémantique :

- L'intégration : un standard commun de modèle de données est utilisé pour tous les composants du système. Le processus d'intégration revient à fusionner les modèles de données.
- L'unification : un méta-modèle commun à tous les composants du système fournit un moyen pour établir des correspondances sémantiques.
- La fédération : des modèles distincts sont associés dynamiquement. Cette approche s'appuie sur des outils semi-automatiques, basés sur des méthodes heuristiques qui comparent principalement la terminologie et la structure des données afin de détecter les couples de concepts qui sont reliés au niveau sémantique (similarité ou équivalence).

Selon (Kosanke, 2005), l'interopérabilité ne peut pas exister dans une seule approche, mais, certainement comme une agrégation des trois approches pour la conservation du flux sémantique. En effet, (Hoffmann, 2008) émet des réserves quant à l'utilisation de chacune des approches prise individuellement. En revanche, une combinaison des trois permettrait d'éviter une situation critique en vue de la conservation du flux sémantique.

2.1.2.3 L'interopérabilité organisationnelle

(Scholl et al., 2011) définissent l'interopérabilité organisationnelle comme la capacité à définir les processus métiers et à apporter de la collaboration au sein des structures qui souhaitent organiser l'échange d'information et, ce, malgré des différences d'environnements. Les aspects organisationnels de l'interopérabilité s'attachent donc à définir les objectifs, assurer la cohérence et coordonner les processus. Il s'agit de la capacité à faciliter la collaboration entre différentes structures et organisations qui souhaitent

échanger des informations, bien qu'elles puissent avoir des structures et des processus internes différents (Vernadat, 2010).

Il faut traiter les processus en plaçant les utilisateurs au centre du problème (EIF, 2004). Il faut donc s'orienter sur l'aspect fonctionnel du système pour qu'il soit le plus accessible possible. Un travail sur l'interface hommes-machine-systèmes est nécessaire pour permettre l'interopérabilité organisationnelle.

Cependant, pour pouvoir réaliser l'interopérabilité au niveau organisationnel, il faut lever certaines barrières telles que :

- définir les responsables et les responsabilités,
- définir les autorisations,
- vérifier les incompatibilités des organisations entre elles (organisations matricielles, organisations hiérarchiques...).

L'interopérabilité s'effectue donc à trois niveaux et peut être vue comme la capacité à échanger des informations et à réutiliser ces informations indépendamment des différences d'environnement. La prochaine section propose d'étudier les solutions existantes qui permettent d'assurer l'interopérabilité entre les différentes applications du cycle de développement produit. Cette analyse permettra, ensuite, d'envisager les solutions les plus adaptées pour assurer l'interopérabilité au niveau de la chaîne numérique et, plus précisément, en se centrant sur la phase d'industrialisation.

2.1.3 Interopérabilité dans le cycle de développement produit

Cette section propose d'étudier la littérature sur les liens entre les phases de conception, d'industrialisation et de production permettant d'assurer l'interopérabilité entre les applications métiers, de façon à répondre à la problématique de structuration de l'information. Cette étude permet de recenser les solutions d'interopérabilité mises en place au niveau de la phase d'industrialisation et permet ainsi d'envisager les solutions les plus appropriées, pour favoriser les échanges d'informations spécifiques pour la phase d'industrialisation qui intéressent le cœur de nos travaux. Ces liens sont donc traités sous l'angle "interopérabilité", pour déterminer les niveaux d'interopérabilité adressés et les méthodes utilisées.

La chaîne numérique de conception/industrialisation mobilise différents logiciels métiers (CAO, IAO, FAO...) et différents systèmes d'information nécessaires à la gestion des données métiers (PDM, SDM, MPM, ERP). En s'appuyant sur ces technologies présentes dans les phases de conception, calcul, industrialisation et fabrication du cycle de développement produit, on distinguera trois liens différents qui présentent des caractéristiques proches de nos travaux, pour étudier comment est mise en place l'interopérabilité sur ces liens :

- Le lien Conception / Simulation couvrant les liens entre logiciels CAO, IAO, PDM et SDM.
- Le lien Conception / Fabrication couvrant les liens entre CAO, FAO, PDM, MPM.
- Le lien Conception / Assemblage couvrant les liens entre CAO, IPAO, PDM, ERP.

2.1.3.1 Le lien Conception / Simulation

Le lien Conception / Simulation est nécessaire pour les concepteurs qui réalisent des choix technologiques pour leurs conceptions en s'orientant grâce aux informations provenant de la simulation. En effet, la bidirectionnalité des échanges entre conception et simulation permet d'obtenir une validation du modèle avec un nombre minimum d'aller-retour entre ces deux étapes. Ainsi, les temps de développement sont réduits et, par conséquent, les coûts de développement le sont également. De nombreux travaux ont été menés pour assurer l'interopérabilité entre la conception et la simulation.

L'utilisation de standards permet d'assurer l'interopérabilité entre applications. (Nguyen Van, 2006) définit une architecture pour assurer des boucles de collaboration entre conception et simulation. Via cette architecture basée sur le standard STEP pour le partage d'informations entre les phases de conception et de calcul, il assure la conservation du lien sémantique. (Valilai and Houshmand, 2010) ont développé la plateforme INFELT STEP qui permet d'assurer l'interopérabilité entre les logiciels CAO et les logiciels de simulation en s'appuyant sur le standard STEP. (Pratt, 2005), (Charles, 2005) et (Vosgien, 2014) définissent des échanges entre logiciels CAO et logiciels de simulation, en se basant sur les formats standards comme STEP (ISO 10303-209, 2001) et (ISO 10303-242, 2014) qui s'appuient sur des approches par entités pour décrire la géométrie des pièces. Ces approches, basées sur les standards, permettent d'échanger de nombreuses informations spécifiques et d'assurer une utilisation unifiée par les systèmes.

Une autre solution, pour assurer l'interopérabilité, consiste à utiliser des solutions plus spécifiques à l'environnement traité telles que des structures spécifiques (Structure Orientée Architecture...) ou des interfaces spécifiques (Médiateurs, Traducteurs...). En s'appuyant sur une structure spécifique, (Troussier, 2000) utilise "les dépendances qui existent entre les informations contenues dans les notes de calcul" pour assurer l'interopérabilité entre la phase de conception et la phase de calcul. Cette solution s'appuie sur des informations spécifiques ajoutées suite aux différentes étapes de calculs avant de proposer un retour d'information vers la phase de conception. (Etienne et al., 2011) utilisent une architecture PPO (Product Process Organization) Kernel pour favoriser l'interopérabilité entre les systèmes experts CAO. Cette solution, basée sur la collaboration et la conception innovante, propose de connecter des systèmes experts hétérogènes au moyen de dictionnaires et de concepts de souscription. (Nosenzo et al., 2014) proposent une approche centrée IAO, couplée aux systèmes d'information, pour réaliser une intégration CAO/IAO au travers d'une plateforme PDM. Ces travaux proposent une approche centrée sur le modèle CAO au niveau du PDM, à partir duquel dépendent toutes les validations et notamment la modélisation IAO pour la phase de conception. Au niveau des interfaces spécifiques, (Biahmou et al., 2010) ont développé un traducteur appelé CAMAT (CATIA-MATLAB Translator) qui permet d'assurer l'interopérabilité entre conception et simulation. Cette interface permet de générer des modèles MATLAB et SIMULINK à partir de CATIA V5 pour l'étude des modèles de comportements. L'intégration inverse est également proposée pour réaliser l'interopérabilité totale.

Comme expliqué par (Catalano et al., 2008), l'utilisation des ontologies peut-être un vecteur pour l'interopérabilité. Ils ont utilisé une ontologie pour développer le modèle "Product Design Ontology" (PDO) qui permet d'indexer des informations directement sur le modèle CAO. Ces ajouts, de concepts et d'instances, sont proposés directement au niveau du modèle ontologique. De la même façon, (Assouroko et al., 2011) définissent un modèle qui s'appuie sur des ontologies pour assurer l'interopérabilité entre la conception et le calcul. Pour relier chacune des ontologies, ils se basent sur le principe de Gestionnaire de Relations (GdR – RsM: Relationship Manager). (Li et al., 2010) définissent également une ontologie pour enrichir avec des "annotations" les échanges de données. Ces travaux proposent d'enrichir le modèle CAO en venant le compléter en ajoutant des instances pour supporter les annotations. Selon (Barbau et al., 2012), le modèle OntoSTEP propose une représentation OWL des données en format EXPRESS ce qui permet la création d'un modèle produit avec des données

enrichies en se basant sur le standard STEP dimensionné pour supporter le modèle géométrique CAO et les modèles de calculs en IAO. (Jun et al., 2007) proposent Closed-Loop PLM qui se concentre sur le suivi et la gestion de l'information tout au long du cycle de vie produit. Ces travaux permettent ainsi de remonter des informations depuis la fin de vie produit vers la phase de début de vie produit et, notamment, au niveau des phases de conception et de simulation.

2.1.3.2 Le lien Conception / Fabrication

La capitalisation des connaissances depuis les opérations de fabrication permet d'avoir une optimisation des choix de conception en s'intéressant aux opérations de fabrication. En effet, le retour d'information au niveau de la conception depuis les phases de fabrication favorise l'obtention d'une pièce bonne du premier coup.

Comme vu précédemment, les standards se positionnent comme des vecteurs intéressants pour assurer l'interopérabilité. (Xu et al., 2005) définissent les échanges entre logiciel de CAO et logiciels de FAO au travers du standard STEP-NC. (Valilai and Houshmand, 2010) avec la plateforme INFELT permettent l'interopérabilité entre les logiciels de CAO et les logiciels de FAO. Pour cela, la plateforme INFELT propose une architecture centrale basée sur STEP-NC qui connecte l'ensemble des applications métiers pour l'échange d'informations liées à la fabrication.

De même que précédemment, les architectures spécifiques peuvent se positionner comme des solutions pour l'interopérabilité. (Paviot, 2010) utilise des systèmes de médiateurs pour aligner les ontologies. Son modèle se base sur les "tags sémantiques" pour traiter le lien entre conception et fabrication. De même, (Bernard et al., 2003) développe une cellule automatisée pour favoriser une intégration complète du processus de fonderie. Ces travaux s'appuient sur le principe de prototypage rapide pour réaliser une optimisation en vue de l'industrialisation en réduisant les coûts de développement.

(Nassehi et al., 2008) développent "Universal CNC manufacturing Platform" et proposent, au travers d'une plateforme universelle, de prendre en charge l'interface pour connecter les logiciels de CAO et les logiciels de FAO. Ces travaux permettent ainsi d'assurer des échanges en prenant en compte plusieurs logiciels CAO et FAO, au travers du socle commun, proposant différentes interfaces acceptant les différents systèmes. (Martin et al., 2006) développent

dans leurs travaux un outil, s'appuyant sur le langage Visual Basic, pour développer un "médiateur" pour l'ensemble des API (Application Programming Interface) nécessaires pour assurer le lien entre conception et fabrication d'éléments en fonderie. Ils traitent ainsi le niveau technique de l'interopérabilité. Au niveau des structures orientées architectures, (Harik et al., 2006) ont développé un outil dans le cadre du projet Usiquick qui permet d'enrichir le modèle CAO pour la génération des gammes d'usinage et des trajectoires outils. Le Duigou (Le Duigou et al., 2011) traitent l'interopérabilité entre conception et fabrication, en définissant un modèle générique de données basé sur différents modèles. Ils utilisent d'abord une approche unificatrice, puis l'intégration pour compléter leur modèle de données, assurant ainsi le flux sémantique. (Suh et al., 2008) au travers de UbiDM (design and manufacturing via ubiquitous computing technology), permettent d'assurer les échanges de données entre les différentes phases du cycle de vie produit. Cette approche permet ainsi de générer des retours d'informations depuis les phases aval de fabrication vers la phase de conception. (Jun et al., 2007) permettent également, au travers de leur modèle ontologique Closed-Loop PLM, d'assurer les échanges sémantiques entre la conception et la fabrication. En reprenant les travaux de (Tan et al., 2010) qui placent le DfX au centre du cycle de vie produit pour générer des retours depuis la fabrication vers la conception, on vient ici adresser le niveau organisationnel de l'interopérabilité.

2.1.3.1 Le lien Conception / Assemblage

Le lien entre conception et assemblage permet essentiellement d'orienter les choix de conception pour obtenir des assemblages optimisés. Les retours depuis la phase d'assemblage permettent de guider les concepteurs dans les choix technologiques à réaliser pour favoriser un assemblage facilité.

(Kuo et al., 2001) ont développé un modèle basé sur l'intelligence artificielle "intelligent DFX system" qui aide le concepteur à faire des choix technologiques en s'appuyant sur une base de connaissances déjà établie. Cette base de connaissance est basée à la fois sur les informations produits mais, également, sur l'ensemble des informations remontées tout au long du cycle de vie produit. (Demoly et al., 2011) définissent un modèle Multi-Vues Orienté Assemblage (MUVOA) qui vise à assurer le lien entre conception et assemblage. Le flux sémantique est ainsi assuré au travers de l'implication des acteurs métiers, traitant aussi les problèmes d'organisation. (Mantripragada and Whitney, 1998) ont développé un outil appelé

"Assembly Oriented Design (AOD)" qui décompose chaque assemblage en sous-assemblages, de façon à informer le designer des différentes étapes à réaliser pour monter le système. Le NIST a également développé le Core Product Model (CPM) qui permet de traiter les échanges entre la phase de conception et l'assemblage (Fenves et al., 2008). Ce modèle sémantique, qui s'intègre dans la stratégie PLM, propose une modélisation produit en s'appuyant sur les fonctions, les formes et le comportement. Ce modèle propose un modèle commun pour les données produit. En reprenant les travaux de (Tan et al., 2010) qui placent le DfX au centre du cycle de vie produit pour générer des retours depuis l'assemblage vers la conception, on vient ici adresser le niveau organisationnel de l'interopérabilité. (Jun et al., 2007) permettent, également, au travers de leur modèle ontologique Closed-Loop PLM d'assurer les échanges sémantiques entre la conception et l'assemblage.

2.1.4 Étude de l'interopérabilité

Pour permettre une analyse plus fine des travaux détaillés dans la section précédente, nous avons choisi de les classer selon les trois niveaux d'interopérabilité: Niveau Technique, Niveau Sémantique et Niveau Organisationnel. Cela permet d'identifier les niveaux d'interopérabilité traités par les travaux existants. En repartant des éléments de la section précédente, un tableau d'analyse à double-entrées est obtenu en croisant les niveaux d'interopérabilité avec les trois types de lien adressés : Lien Conception/Simulation, Lien Conception/Fabrication et le lien Conception/Assemblage. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Synthèse de l'étude de l'interopérabilité pour l'industrialisation

	Niveau Technique	Niveau Sémantique	Niveau Organisationnel
Lien Conception/Simulation	(Nassehi et al., 2008); (Valilai and Houshmand, 2010); (Troussier, 2000); (Etienne et al., 2011);	(Charles, 2005); (Nguyen Van, 2006); (Pratt, 2005); (Catalano et al., 2008); (Assouroko et al., 2014); (Li et al., 2010);	

	(Nosenzo et al., 2014); (Biahmou et al., 2010)	(Barbau et al., 2012); (Jun et al., 2007) (Vosgien, 2014)	
Lien Conception/Fabrication	(Nassehi et al., 2008); (Valilai and Houshmand, 2010); (Paviot, 2010); (Bernard et al., 2003); (Martin et al., 2006); (Harik et al., 2008); (Kuo et al., 2001); (Suh et al., 2008)	(Xu et al., 2005); (Jun et al., 2007); (Paviot, 2010); (Le Duigou et al., 2011)	(Tan et al., 2010)
Lien Conception/Assemblage	(Kuo et al., 2001); (Mantripragada and Whitney, 1998)	(Jun et al., 2007); (Demoly et al., 2011); (Fenves et al., 2008)	(Tan et al., 2010); (Demoly et al., 2011)

L'étude menée précédemment porte sur 25 travaux de natures différentes qui apparaissent à 34 reprises différentes en fonction du niveau d'interopérabilité qu'ils adressent et de l'utilisation qui en est faite pour chaque lien. De cette façon, on compte 15 occurrences pour couvrir le niveau sémantique, 17 occurrences pour couvrir le niveau technique et 3 occurrences pour le niveau organisationnel. On note alors, que les travaux couvrent majoritairement les verrous associés au niveau sémantique et au niveau technique et délaissent le niveau organisationnel. En effet, souvent associés à l'organisation des processus et des structures, ces aspects ne sont pas largement traités dans la bibliographie de notre domaine.

En ce qui concerne l'interopérabilité au niveau technique, il ressort de l'étude menée que les systèmes SOA et les médiateurs sont les principales solutions utilisées pour assurer la continuité du flux d'information. Les SOA sont présents dans 8 travaux (Etienne et al., 2011; Harik et al., 2008; Kuo et al., 2001; Mantripragada and Whitney, 1998; Nosenzo et al., 2014; Suh et al., 2008; Troussier, 2000) sur 16 tandis que les systèmes par médiateurs sont présents dans 6 travaux (Bernard et al., 2003; Biahmou et al., 2010; Martin et al., 2006; Nassehi et al., 2008; Paviot, 2010) sur un total de 16 travaux. Il y a donc un total de 13 travaux sur 16 qui utilisent les SOA et les médiateurs comme solution, pour assurer l'interopérabilité au niveau technique.

Pour parvenir à l'interopérabilité au niveau sémantique, l'approche fédérative et l'utilisation des ontologies sont implémentées dans 8 occurrences (Assouroko et al., 2014; Barbau et al., 2012; Catalano et al., 2008; Jun et al., 2007; Li et al., 2010; Paviot, 2010) sur 16 alors que l'utilisation de format standard apparaît dans 5 occurrences (Charles, 2005; Nguyen Van, 2006; Pratt, 2005; Vosgien, 2014; Xu et al., 2005) sur 16. C'est donc un total de 13 occurrences sur 16 qui adressent les problématiques d'interopérabilité sémantique en s'appuyant sur les ontologies et sur l'utilisation de standards.

Au regard de l'analyse qui vient d'être menée dans cette partie, deux solutions apparaissent plébiscitées pour atteindre l'interopérabilité sémantique sur la chaîne numérique : l'utilisation de formats standards et l'utilisation de modèles ontologiques. C'est pourquoi, les deux parties suivantes proposent d'étudier, dans un premier temps, les standards pour l'échange d'information, notamment avec le standard STEP-NC et, dans un deuxième temps, les modèles ontologiques pour l'interopérabilité.

2.2 STEP-NC pour l'échange d'informations

2.2.1 Standards et normes d'échange de données

Les échanges entre les différents logiciels depuis la conception jusqu'à la fabrication (CAO, FAO, Post-Processeur, MOCN...) peuvent se faire au travers de formats spécifiques à chaque éditeur. Afin de favoriser la continuité du flux dans une chaîne numérique hétérogène mettant en œuvre des solutions de différents éditeurs, des formats standards portant les éléments géométriques pour les standards CAO et les éléments de programmation pour les standards FAO ont été développés. La Figure 5 propose une chronologie des standards CAO pour couvrir la chaîne numérique d'industrialisation pour l'usinage de pièces mécaniques (au-dessus de la ligne de temps):

- STL : Ce format ne décrit que la géométrie de surface d'un objet en 3 dimensions au travers d'une facettisation en triangle qui permet toutefois d'alimenter les logiciels de FAO en travaillant sur du surfacique.
- IGES : Ce format, qui s'appuie sur la norme NBSIR 80-1978, traite la définition produit comme un fichier d'entités. Chaque entité, qui est une donnée fondamentale pour un fichier IGES, est représentée dans un format indépendant de l'application.

- VDAFS : Ce format, créé en 1981, est relativement limité. Il ne permet de transmettre que la géométrie surfacique, sans aucune notion de couleur, de texte ou tout autre type d'information. Il s'appuie sur la norme DIN 66301 et représente les entités dans ses versions les plus évolués.
- SET : Ce standard a été initialement développé pour l'aérospatial en 1983 suite aux difficultés rencontrées pour utiliser le format IGES. La norme SET est née par la volonté d'échanger des données entre les différents systèmes de CAO/FAO en volumique et aussi par la nécessité d'archiver ces données.
- STEP : Ce standard, comme réunion de différentes normes ISO, permet de couvrir les trois points suivants : (1) La géométrie-topologie BREP complète, reflétant les possibilités des formats CAO. (2) Le standard STEP s'intéresse également au dimensionnement, au tolérancement, à la description graphique et sémantique. (3) Dans ses dernière versions, la norme STEP vise à adresser les problématiques de liaison avec les systèmes d'information, et notamment les PDM, en traitant en particulier la gestion de configuration.

De même, on retrouve en-dessous de la ligne de temps les standards pour la FAO :

- APT : Ce standard est apparu dans les années 70 et a été conçu pour favoriser la programmation des trajectoires outils. Il a ensuite été abandonné au milieu des années 70 pour devenir un standard utilisé comme intermédiaire entre la FAO et le PP. Le fichier APT présente l'avantage de s'appuyer sur des catalogues de fonctions qui le rende compréhensible par l'homme et facilement modifiable via le logiciel de FAO.
- CL-File : Ce format est un fichier le plus souvent non interprétable par l'homme. En effet, il s'agit d'un fichier contenant les coordonnées cartésiennes (selon 6 axes) des positions successives de l'outil issu de la norme ISO 4343-1978 traitant de l'utilisation des commandes numériques pour machines-outils et des informations de sortie et instructions Post Processeur. CL file est classiquement l'équivalent binaire de l'APT.

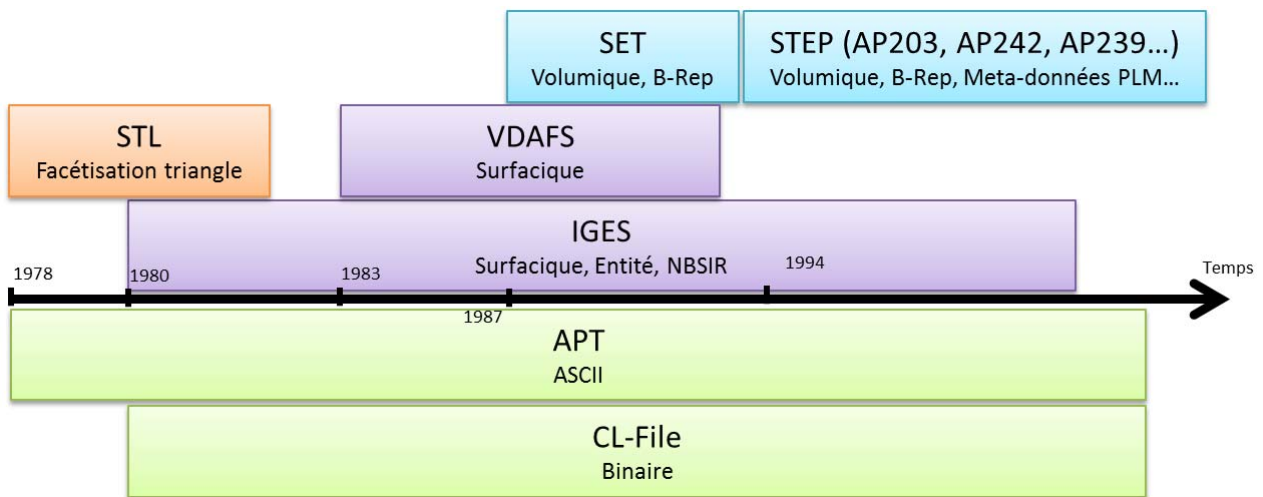


Figure 5 : Chronologie des standards pour la CAO et FAO

Cependant, bien que ces formats standards permettent la continuité du flux dans le sens CAO-MOCN, ils ne permettent pas le retour d'information depuis la MOCN vers la CAO. C'est pourquoi, le standard STEP-NC, apparu en 2003, propose de couvrir l'intégralité de la chaîne numérique d'industrialisation. Ce standard, vu comme une extension du standard STEP, se déploie depuis la phase amont de conception jusqu'à la fabrication, en substituant les standards CAO/FAO, FAO/PP et le Code-G ISO6983 pour la MOCN. La Figure 6 expose, sur l'axe horizontal, la couverture du cycle de vie de chacun des formats d'échanges tant standard (en orange) que les formats éditeurs et Code-G (en bleu) et les place, sur l'axe vertical, en fonction de la précision et de la richesse des informations reprises.

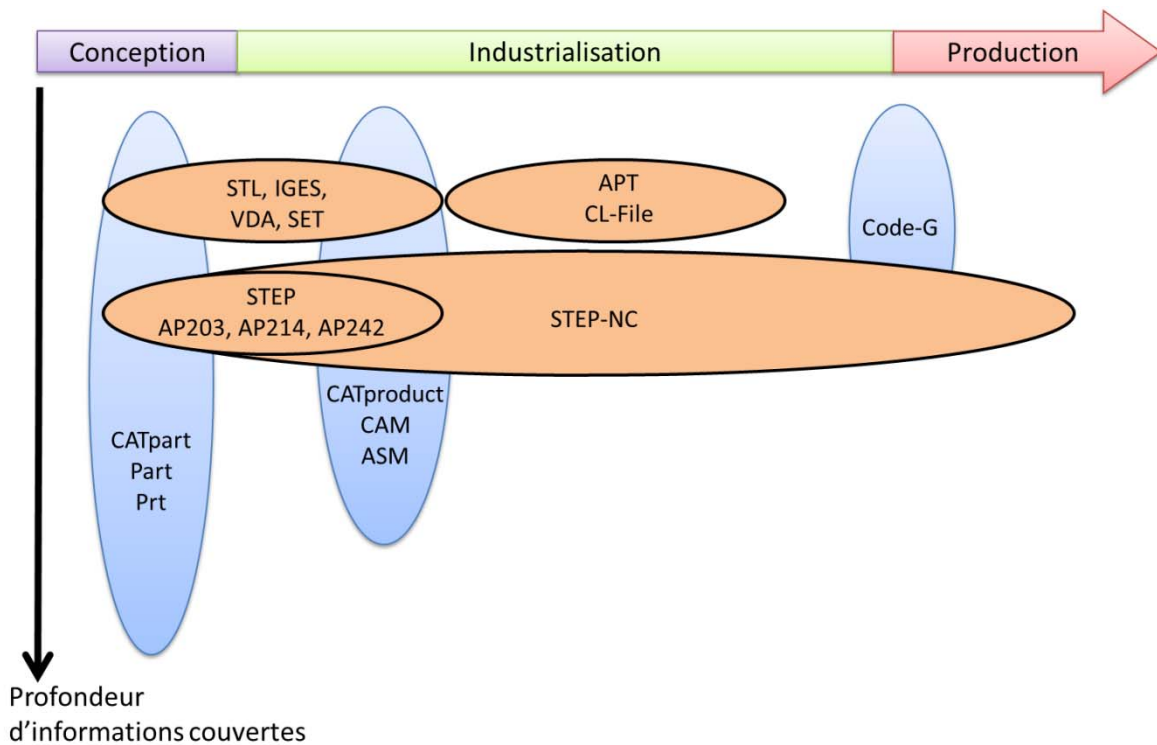


Figure 6 : Couverture du cycle de vie produit en fonction des formats

2.2.2 STEP-NC

2.2.2.1 Une chaîne numérique bidirectionnelle

Le standard STEP-NC a été développé pour assurer les échanges de données entre les différentes solutions logiciels de la chaîne numérique (Xu, 2006). L'utilisation de ce standard permet de renforcer l'interopérabilité des systèmes par sa capacité à couvrir les informations de conception et fabrication (Hardwick et al., 2013). STEP-NC associe la définition des processus d'usinage (programme, opérations, stratégies et technologies, trajectoire d'outils..) et les spécifications d'outils avec la description CAO. Il décrit les liens explicites entre les éléments de la CAO (features ou entités) et du processus d'usinage (opérations) et distingue les modèles CAO "brut" et "fini". STEP-NC reprend les définitions de STEP en CAO : BREP, PMI, PDM, manufacturing features, à l'identique.

Le standard STEP-NC est le résultat de plusieurs projets de recherche, ainsi en Europe dans le cadre ESPRIT III, OPTIMAL (Optimized Preparation of Manufacturing Information with Multi-level CAM-CNC Coupling 1994-1997), EP 29708 (1999-2001), et le projet IMS (Intelligent Manufacturing System) (Richard and Nguyen, 2004).

Par sa capacité à contenir de nombreuses informations, comme la géométrie de la pièce à obtenir, la stratégie d'usinage, etc., le standard STEP-NC permet de s'affranchir du Post-Processeur qui comprend une partie de l'intelligence de coupe. En effet, le standard STEP-NC, par la richesse des informations qu'il contient, permet de transférer l'intelligence contenue dans le PP vers la Machine-Outil à Commandes Numériques. La chaîne numérique se retrouve alors modifiée avec l'enchaînement CAO-FAO-MOCN comme illustrée en Figure 7. (Nassehi et al., 2008) définissent ainsi les échanges dans la nouvelle chaîne numérique intégrant l'interpréteur de code STEP-NC au niveau de la MOCN.

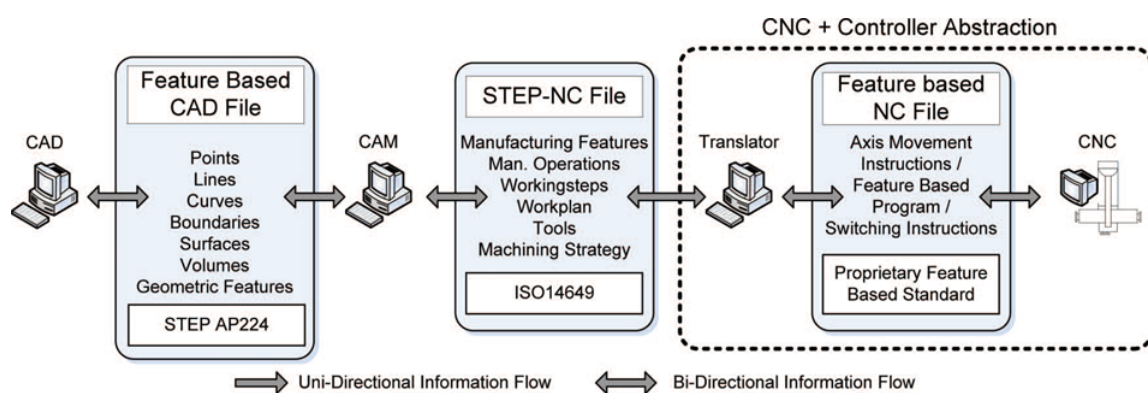


Figure 7 : Nouvelle chaîne numérique intégrant STEP-NC (Nassehi et al., 2008)

2.2.2.2 Les normes STEP-NC

Le standard STEP-NC s'appuie sur deux normes et adresse trois différents niveaux de données – AIM (Application Interpreted Model), ARM (Application Reference Model) et l'AAM (Application Activity Model):

- (ISO 14649-1, 2003) concerne le niveau ARM et AAM et définit le modèle conceptuel de la norme STEP-NC. La description comprend les fonctions logiques, la stratégie et les informations machines.
- (ISO 10303-238, 2006) concerne le niveau AIM, c'est à dire le niveau d'implémentation. Ce protocole d'application permet de faire le lien avec la couche logiciel conformément à la norme ISO10303 (la norme STEP).

Dans la suite des travaux, nous identifierons STEP-NC comme la combinaison des deux normes. Exception sera faite lorsque la norme utilisée sera spécifiée explicitement. Ces deux

normes résultent du travail de deux sous-comités de l'ISO : ISO TC 184/SC1 qui travaille sur ISO 14649, alors que ISO TC 184/SC4 travaille sur STEP AP238.

D'après (Feeney et al., 2003) les principales différences entre ces deux modèles (ISO10303-AP238 et ISO14649) résident dans le degré d'utilisation des méthodes de représentation STEP ainsi que de son architecture technique. En effet, présentant des caractéristiques différentes en terme de finalité et ou d'usage, ces deux modèles peuvent trouver des applications différentes. Le Tableau 2 propose une comparaison technique des deux différents modèles en s'appuyant sur leur structure et la capacité de mise en œuvre d'après les travaux de (Xu et al., 2005).

Tableau 2 : Comparaison entre ISO10303-AP238 et ISO 14649 (Xu et al., 2005)

Critère de comparaison	ISO14649 - ARM	ISO10303 AP238 - AIM
Espace de stockage	~10 fois moins que AIM	~10 fois plus que ARM
Programmation	Facile	Plus complexe
Lisibilité	Difficile	Quasi-impossible
Compatibilité avec STEP	Partiellement conforme	Totalement conforme
Cohérence des données	Intention de conceptions abandonnées	Intention de conceptions préservées

Le standard ISO 14649 est plus à même d'être utilisé dans un environnement pour lequel les systèmes CAO se basent sur des données exactes extraites depuis l'atelier tandis que le ISO 10303 – AP238, comme protocole d'application de la norme STEP, sera plus utilisé pour réaliser une intégration complète entre CAO, FAO et MOCN. En effet, le standard ISO14649 ne présente aucun mécanisme capable d'intégrer les autres données du standard STEP et, par conséquent, ne permet pas d'assurer facilement la bidirectionnalité des échanges de données entre la CAO et la FAO. Contrairement à l'ISO 14649, l'ISO 10303-AP238 englobe les informations qui proviennent de l'ISO 10303-AP203 (Modèle de conception) et de l'ISO 10303-AP224 (Modèle de définition de la gamme) ainsi que d'un modèle d'interprétation corrélé à partir de l'ISO14649. De cette façon, il est possible d'obtenir une bidirectionnalité des échanges au niveau de la CAO et de la FAO. Cependant, par son niveau de complexité, l'ISO10303-AP238 est plus difficilement implémentable et présente une difficulté plus importante pour sa mise en œuvre (Kržič et al., 2009).

(Xu et al., 2005) identifient une autre limite au standard ISO10303 – AP238: bien que son format permette de prendre en compte des informations provenant de différents environnements, il ne garantit pas une bonne applicabilité. En effet, par sa structure fragmentée en de nombreux protocoles, l'AIM offre plus une structure d'informations techniques, contrairement à l'ARM qui propose plus une structure fonctionnelle des données. Les fichiers étant fragmentés, cela nécessite une capacité de stockage, qui est renforcée par l'utilisation de librairies d'outils ou de catalogues de fonctions. L'AIM devient alors plus difficilement manipulable que l'ARM.

2.2.2.3 Organisation de la structure générale STEP-NC

Nous avons choisi la norme ISO 14649 comme support de développement du modèle ontologique et donc nous avons construit OntoSTEP-NC au niveau ARM. En reprenant une base STEP en EXPRESS, la norme ISO14649 est composée d'entités indépendantes liées les unes aux autres. La norme STEP-NC ISO 14649 se définit au travers de douze fascicules qui permettent ainsi de décrire entièrement le processus de fabrication comme résumé dans le Tableau 3. L'ensemble des fascicules permet la description complète de la logique et stratégie d'usinage en langage EXPRESS.

Tableau 3 : Organisation de la structure générale ISO 14649

Part	Description
Part 1	Overview and fundamental principles
Part 2	Language bindings, Fundamentals
Part 3	Language binding in Java
Part 9	Glossary
Part 10	General process data
Part 11	Process data for milling
Part 12	Process data for turning
Part 13	Process data for wire-EDM
Part 14	Process data for sink-EDM
Part 16	Data for touch probing based inspection
Part 111	Tools for milling
Part 121	Tools for turning

Dans le Tableau 3, nous avons mis en surbrillance les fascicules décrivant la structure fonctionnelle de la norme STEP-NC ISO 14649, les autres fascicules adressant les aspects organisationnels et l'interfaçage de l'ISO 14649 avec des applications extérieures. Précisons également que les fascicules non représentés dans le tableau ci-dessus, sont dédiées spécifiquement à l'interfaçage avec le standard STEP ISO 10303 – AP238 niveau AIM avec les Part 50; 51; 52; 53.

Bien que le standard STEP-NC ne soit encore que très faiblement implémenté au niveau des contrôleurs des MOCN, il suscite un grand intérêt de la part du monde académique, en vue d'une exploitation pour la production. La section suivante propose d'effectuer une analyse des travaux majeurs basés sur le standard STEP-NC.

2.2.3 Possibilités et limites de STEP-NC

2.2.3.1 STEP-NC : optimisation pour l'industrialisation

L'intérêt premier de l'utilisation de STEP-NC est qu'il permet d'assurer une bidirectionnalité des échanges d'informations depuis les phases de conception vers les phases de production. Dans cette section, nous proposons de lister et d'analyser les travaux scientifiques qui utilisent le standard STEP-NC pour améliorer les performances de production et les échanges entre les applications métiers de la chaîne numérique. L'état de l'art, présenté ci-dessous, passe en revue les travaux majeurs se basant sur le standard STEP-NC pour l'amélioration de l'industrialisation. Un horizon plus large des travaux STEP-NC peut être trouvé dans la synthèse proposée par (Newman et al., 2008).

- (Xiao et al., 2015) proposent une architecture basée sur le standard STEP-NC pour permettre de réaliser le lien entre les logiciels CAO, FAO et IPAO. En effet, ils développent une plateforme pour l'interfaçage des logiciels actuels de CAO, FAO et IPAO avec le standard STEP-NC. Ces travaux favorisent les échanges entre les applications métiers de la chaîne numérique et permettent d'apporter une réponse pour la chaîne numérique intégrée en conception-industrialisation-fabrication.
- (Dipper et al., 2011) s'intéressent aux interactions entre features de conception et features du standard STEP-NC. Ils proposent un nouveau modèle pour l'évolution de la norme STEP-NC en vue de la compléter pour améliorer l'automatisation des IPAO. Ils

agissent pour cela sur les liens entre les surfaces élémentaires et les volumes décrits pour assurer une continuité au sens des opérations et outils d'usinage. Bien que ces travaux s'intéressent à la reconnaissance de formes, aux liens entre les features et à l'optimisation de la planification d'usinage, ils traitent peu l'échange d'information au sein de la chaîne numérique.

- (Zhang et al., 2014) proposent le système UPCI (Universal Process Comprehension interface), une reconnaissance des entités d'usinage à partir du G-Code et proposent ensuite d'organiser les informations, en se basant sur le standard STEP-NC. Cette capitalisation des connaissances, issue des reconnaissances de features, permet d'améliorer la compréhension des processus d'usinage. En s'intéressant à la reconnaissance de features pour la capitalisation d'expérience, ces travaux s'intéressent également au retour d'information depuis la production.
- (Afsharizand et al., 2014) développent MCP (Machine Capability Profile) une plateforme qui permet au travers de STEP-NC d'acquérir des données machines de façon dynamique. Les données recueillies permettent ainsi de venir optimiser les paramètres d'usinage en fonction des capacités réelles de la machine. Cette approche se base sur la capacité du standard STEP-NC à s'intégrer aux applications métiers pour l'échange d'informations et s'appuie sur une plateforme pour la gestion des données spécifiques machines.
- (Laguionie et al., 2011) développent la plateforme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligence Manufacturing) basée sur la structure XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System). Cette plateforme permet de faire communiquer les applications métiers autour d'une architecture commune qui prend en compte tous les éléments du cycle de vie des produits. Cette architecture permet d'organiser la bidirectionnalité des échanges sur la chaîne numérique des applications métiers.
- (Nassehi et al., 2006a) proposent une approche basée sur l'intelligence artificielle et sur STEP-NC pour proposer une planification d'usinage optimisée. Pour cela, les auteurs ont développé un système multi-agent MASCAPP (Multi-Agent System for Computer Aided Process Planning) pour le process planning. Cette approche s'intéresse à l'optimisation de la fabrication, au travers de l'intelligence artificielle, en se basant sur le programme de coupe et ne traite pas les retours d'informations et les échanges dans la chaîne numérique.

- (Nassehi et al., 2006b) proposent une architecture CMI (Centralized Manufacturing Input) qui repose sur l'exploitation de STEP-NC pour la génération d'un programme de coupe générique. C'est, ensuite, un interpréteur qui permet de préciser, pour chaque couple DCN-MO, le programme spécifique pour l'obtention de la pièce usinée. Cette approche permet d'échanger des informations sur la chaîne numérique pour favoriser la flexibilité dans le choix des moyens de production.
- (Garrido Campos and Rodriguez Miguez, 2011) proposent une intégration verticale, en se basant sur le standard STEP-NC, pour contrôler le processus et assurer une traçabilité du programme d'usinage. La traçabilité est réalisée à trois niveaux différents : au niveau entreprise, au niveau de la production et au niveau de l'atelier. La traçabilité proposée dans ces travaux permet d'organiser un retour et un échange d'informations sur la chaîne numérique pour le pilotage de la production.
- (Wang and Xu, 2012) avec l'architecture DIMP basée sur le standard STEP-NC proposent une meilleure flexibilité du flux d'informations pour faciliter la production collaborative. La structure DIMP (Distributed Interoperable Manufacturing Platform) organise l'information de façon à ce que les données pertinentes arrivent au bon moment pour l'utilisateur. Ces travaux insistent sur la capacité à échanger des informations au travers de la chaîne numérique avec, comme limite, l'obligation de maintenir la plateforme pour supporter les évolutions des systèmes.
- (Xu et al., 2006) utilisent le standard STEP-NC comme langage de programmation universel pour toutes les machines-outils. Ainsi, le même programme FAO peut être appliqué à de nombreuses machines indépendamment de leur structure. Cela devient possible avec le transfert de l'intelligence depuis les systèmes FAO vers les MOCN, avec l'interprétation du même programme sur différentes MOCN.
- Au travers de STEP-NC, (Ridwan and Xu, 2013) définissent un cadre pour la correction automatique des paramètres en se basant sur le principe MCN (Machine Condition Monitoring). Ils développent le système optiSTEP-NC avec une base de connaissances qui permet de réaliser l'optimisation des paramètres de coupe. Les informations contenues dans STEP-NC permettent ici une optimisation du programme de coupe en permettant d'assurer le lien en machine et base de connaissances.
- Dans le même sens, (Zhao et al., 2008) définissent Closed-Loop Machining basé sur STEP-NC qui permet d'avoir un contrôle en boucle fermée de la machine. Pour avoir ce

contrôle, ils ont développé une boucle fermée sur la MOCN qui permet de corriger les paramètres d'usinage pour réaliser des optimisations machine.

- (Borgia et al., 2013) se basent sur STEP-NC pour avoir une reconnaissance automatique des features d'usinage et pour générer les parcours outils en se basant sur les "machining workingstep". Une optimisation mathématique est ensuite réalisée sur les parcours outils. Ici, le standard STEP-NC, au travers de sa structure orientée entité d'usinage couplée, sert de support pour l'optimisation des programmes de coupe par l'utilisation d'algorithme intelligent.
- (Borgia et al., 2014) proposent NPP (Network Part Program), une solution de planification des procédés de fabrication non-linéaire basée sur STEP-NC. NPP permet d'intégrer à la fois de nouveaux procédés ainsi que des procédés déjà existants et ce, indépendamment de l'ordre des séquences d'usinage. Ces travaux utilisent la structure STEP-NC orientée entité d'usinage pour déterminer la meilleure séquence d'usinage en vue d'optimiser le programme de coupe.
- (Ouyang, 2014) basé sur les "machining features" de STEP-NC propose un outil pour aider les programmeurs à sélectionner les outils optimaux. En s'appuyant sur les bases de connaissances au travers de règles métiers préétablies et sur la reconnaissance des features STEP-NC, il est possible de sélectionner les outils optimaux. Ces travaux qui permettent l'optimisation des programmes d'usinage par le choix des bons outils s'appuient sur la structure à base d'entités du standard STEP-NC. Ces choix sont complétés par des bases de connaissances et des règles métiers.

2.2.3.2 Analyse et limites de STEP-NC

Bien que peu implémentées industriellement, nous avons vu dans la section précédente que de nombreuses applications existent au niveau du standard STEP-NC. Elles peuvent être regroupées en trois catégories majeures : (1) Les travaux sur la reconnaissance de feature, (2) ceux utilisant STEP-NC pour l'optimisation de la planification et des paramètres de coupe et (3) ceux favorisant le retour d'information de la production. Le Tableau 4 propose une classification des travaux décrits dans la section précédente selon les trois catégories: Reconnaissance de feature, Optimisation de la production et Retour d'information de production.

Tableau 4 : Analyse des travaux STEP-NC

Reconnaissance de feature	Optimisation de la production	Retour d'information de production
(Borgia et al., 2013) (Ouyang, 2014) (Dipper et al., 2011) (Zhang et al., 2014)	(Ridwan and Xu, 2013) (Zhao et al., 2008) (Afsharizand et al., 2014) (Nassehi et al., 2006a) (Dipper et al., 2011)	(Garrido Campos and Rodriguez Miguez, 2011) (Xu et al., 2006) (Wang and Xu, 2012) (Borgia et al., 2014) (Xiao et al., 2015) (Laguionie et al., 2011) (Zhang et al., 2014) (Nassehi et al., 2006b)

Pensé initialement comme un vecteur favorisant l'échange d'informations entre les différentes applications métiers qui composent la chaîne numérique, le standard STEP-NC se pose depuis quelques années comme un formidable outil pour faciliter le retour d'information depuis les phases aval de production vers les phases amont de conception. Par sa capacité à structurer les programmes d'usinage au travers d'une architecture orientée entité, il permet de réaliser une optimisation de la planification des procédés de fabrication et d'optimiser les paramètres de coupe. L'étude sur les logiciels IPAO, réalisée par (Yusof and Latif, 2014), décrit STEP-NC comme la technologie support la plus utilisée pour la planification des procédés d'usinage.

Bien que facilitant l'échange d'informations au sein de la chaîne numérique au niveau des applications métiers ainsi que la correction automatique des paramètres d'usinage, le standard STEP-NC ne permet pas à lui seul la capitalisation des données de fabrication. La liste des travaux présentés ici montre la nécessité d'associer au standard STEP-NC des outils, des algorithmes ou des bases de connaissance pour permettre la capitalisation ou l'optimisation des programmes d'usinage. Les propositions concernant le process planning utilisent les informations portées par le standard STEP-NC, mais se basent sur des technologies hétérogènes qui ne permettent pas la capitalisation et la réutilisation des données. Une telle approche permettrait, en effet, de fournir une aide au concepteur et au programmeur FAO en se basant sur les connaissances acquises et ainsi d'avoir un taux de confiance important pour

la production de nouvelles pièces indépendamment des moyens de production (Newman et al., 2008).

Au travers des possibilités offertes par le standard STEP-NC, il est possible de répondre à la problématique de rupture de la chaîne numérique et à l'impossibilité d'avoir une bidirectionnalité des échanges d'informations entre les applications métiers. Bien que permettant de répondre à la question de l'interopérabilité dans la chaîne numérique, le standard STEP-NC ne permet pas de répondre à la question des relations avec les systèmes d'information et la capitalisation des connaissances et du savoir-faire d'usinage. En effet, le standard STEP-NC ne peut pas, à lui seul, générer et capitaliser des connaissances métiers et ne couvre pas le lien avec les systèmes d'information pour les phases de conception, d'industrialisation et de fabrication et ainsi s'inscrire dans les modèles Usine du Futur et entreprise étendue. En tant que seconde solution fortement plébiscitée dans l'étude pour l'interopérabilité sur la chaîne numérique d'industrialisation, les modèles ontologiques sont étudiés dans la partie suivante comme vecteur d'échange entre la chaîne numérique des applications métier et les systèmes d'information.

2.3 Les ontologies produits pour l'interopérabilité

2.3.1 Pourquoi les ontologies produits ?

Bien qu'il existe différentes définitions du terme "ontologie" (Noy and Hafner, 1997; Pisanelli et al., 2002), la définition généralement retenue est celle de (Gruber, 1993a): "*An ontology is a specification of a conceptualization – Une ontologie est une spécification d'une conceptualisation*". Les ontologies sont un artefact conçu pour exprimer une compréhension commune d'un ensemble de concepts. En effet, la conceptualisation concerne l'extraction du vocabulaire d'un domaine et donne une vue simplifiée du monde que l'on veut représenter. Au travers de cette conceptualisation, chacun des concepts et leurs relations mutuelles permettent de décrire le monde réel (Lee et al., 2009).

Le terme d'ontologie est apparu il y a vingt ans, dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), mais existe depuis le 19ème siècle en philosophie où il vise à représenter l'ensemble des connaissances de tout ce qui est. Il est plus modeste et plus pragmatique en IA, ne prétendant représenter que l'ensemble des connaissances d'un domaine.

Dans un contexte numérique, l'ontologie permet de favoriser certaines fonctionnalités avancées telles que : un ensemble de connaissances formelles décrit par un vocabulaire spécifique, des mécanismes d'interconnexion, des règles d'inférence et par une logique sémantique qui permet de représenter un concept abstrait ou physique. Comme les ontologies utilisent le vocabulaire spécifique d'un domaine pour décrire les concepts et les relations, les ontologies peuvent être utilisées comme outils pour définir la sémantique de systèmes informatiques complexes (Guarino, 1998). Afin de favoriser les échanges sémantiques entre les différents acteurs d'un système / d'une organisation, des langages standard permettent de décrire les ontologies. On peut citer notamment le langage enrichi OWL (Web Ontology Language) créé par le consortium W3C en remplacement du langage RDF sémantiquement moins riche (Antoniou and Harmelen, 2004).

(Uschold and Jasper, 1999) identifient trois utilisations majeures des ontologies :

- Favoriser la communication entre plusieurs êtres humains
- Réaliser l'interopérabilité entre les systèmes logiciels, d'un point de vue sémantique
- Améliorer le développement et la qualité des systèmes logiciels

Dans le même sens, (El Kadiri and Kiritsis, 2015) s'appuient sur une étude de la littérature pour préciser 7 rôles clés que peuvent remplir les ontologies simultanément ou non :

- "Trusted source of knowledge"
- "Database"
- "Knowledge base"
- "Bridge for multiple domains"
- "Mediator for interoperability"
- "Contextual search enabler"
- "Linked data enabler"

Cependant selon (Gruber, 1993b), l'ontologie doit répondre à cinq critères : la clarté, la cohérence, l'extensibilité, une déformation d'encodage minimale et un engagement ontologique minimal. En d'autres termes, l'ontologie est l'expression explicite, minimale et idéalement neutre d'une sémantique. L'alignement d'ontologie est le processus qui permet d'établir les correspondances entre différentes ontologies. C'est pourquoi, les principales utilisations des modèles basés sur les ontologies peuvent être résumées par (Matsokis and Kiritsis, 2010) :

- Permettre le transfert de données entre les hommes et/ou les machines
- Faciliter la réutilisation des informations du système
- Séparer les informations de chaque opérateur du système tout en les transmettant
- Fonder le savoir du système sur l'analyse formelle de ces informations.

En se basant sur les éléments précédents, l'ontologie peut être vue comme une solution pour réaliser l'interopérabilité des systèmes logiciels et favoriser la capitalisation de connaissances, par sa capacité à échanger des informations spécifiques en vue d'une réutilisation future. En effet, les ontologies sont définies par un langage spécifique et se posent naturellement comme un vecteur de capitalisation de connaissances, de récupération de données et de raisonnement (Zhou, 2007). La section suivante propose de recenser les différentes utilisations des modèles ontologiques pour l'interopérabilité et la capitalisation de connaissances dans le contexte du développement de produit.

2.3.2 Etude sur les ontologies produits

Ces dernières années, de nombreux travaux de recherche se concentrent sur l'utilisation de modèles ontologiques pour favoriser l'interopérabilité des systèmes et la capitalisation de connaissances tout au long du cycle de vie des produits et au travers de l'entreprise étendue. Ces modèles peuvent se classer en trois types différents : description d'architectures, description d'un modèle de produit ou représentation ontologique de standards d'échange. Tous ont la même finalité : faciliter l'échange de niveau sémantique. L'étude qui suit vise à analyser l'apport en termes d'interopérabilité des travaux les plus significatifs du domaine.

Les modèles décrivant des architectures globales d'échanges de données au travers des différentes phases du cycle de vie existent sous-différentes formes. (Matsokis and Kiritsis, 2010) proposent une description ontologique des différentes phases du cycle de vie (Début de vie, Milieu de vie et Fin de vie) en spécifiant l'état du produit et en le caractérisant. L'intégralité du produit physique est décrite ainsi que l'environnement et les utilisateurs par l'architecture SOM (Semantic Object Model). Dans le même sens, Kühnle (Kühnle, 2010) au travers du projet PABADIS'PROMISE, propose une architecture pour le contrôle et l'échange d'information à travers trois niveaux (ERP, MES, Machine Control). (Cho et al., 2006) décrivent eux aussi à partir d'une ontologie une architecture basée sur des méta-concepts pour réaliser une bibliothèque de pièces. Cette bibliothèque de pièces permet ensuite, au travers d'algorithmes indépendants, d'identifier les incohérences de pièces. (Lin and Harding, 2007) créent une ontologie MSE qui permet de représenter un schéma général des connaissances de fabrication. Ce schéma permet de favoriser l'échange d'informations inter-entreprises et inter-services au travers de divers champs disciplinaires. (Jiang et al., 2009) et (Chen et al., 2009) proposent des architectures pour favoriser la capitalisation de connaissances au travers d'entreprises étendues dans le domaine de la production. De même, (Chungoora et al., 2013) proposent le modèle ontologique MCO (Manufacturing Core Ontology) pour favoriser le transfert de connaissances depuis la production vers la phase de conception. Ce modèle s'appuie sur une plateforme intermédiaire de l'architecture IMKS (Interoperable Manufacturing Knowledge Systems) permettant la vérification des connaissances générées avant réutilisation. (Lemaignan et al., 2006) introduisent MASON (Manufacturing's Semantics ONtology) une ontologie qui propose une architecture et des outils pour l'évaluation automatique des coûts de fabrication en s'appuyant sur les entités, les opérations, les ressources et les échanges d'informations haut-niveau. (Grosse et al., 2005) proposent de coupler l'intelligence artificielle ON-TEAM aux modèles ontologiques pour favoriser l'échange

et la capitalisation de connaissances de façon à rendre interopérable les systèmes de simulation. (Panetto et al., 2012) proposent ONTO-PDM un modèle ontologique qui permet de définir une organisation pour assurer l'interopérabilité des systèmes d'information en favorisant l'échange d'informations liées à la production. (Jun et al., 2007) utilisent un modèle ontologique pour favoriser l'échange d'entités entre les systèmes CAO et IPAO en se basant sur le "Knowledge Interchange Format (KIF)".

Au niveau modèle de représentation produit, les représentations ontologiques sont essentiellement utilisées pour favoriser l'enrichissement des données produits afin de favoriser la collaboration. (Yoo and Kim, 2002) proposent un modèle sémantique qui s'appuie sur une base de connaissances produits standardisés pour vérifier les incohérences de systèmes. Les données produits sont enrichies de façon à connaître les incompatibilités d'un produit dans un système. (Vegetti et al., 2008) grâce à PRONTO (PROductONTOlogy) proposent une approche ontologique permettant de définir un modèle global qui puisse renseigner toutes les informations produits pour tous les acteurs du processus. (Patil et al., 2005) développent un langage spécifique pour enrichir les données produits pour assurer l'interopérabilité sémantique inter-domaines. Ce langage ontologique est le PSRL (Product Semantic Representation Language). (Rachuri et al., 2005a) utilisent OAM (Open Assembly Model) pour enrichir les produits avec des données pour l'assemblage, les tolérances, la cinématique...Ce modèle ontologique est enrichi par le DAIM (Design-Analysis Integration Model) et le PFEM (Product Family Evolution Model) également développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) (Rachuri et al., 2005b). (Bock et al., 2010) proposent un modèle qui facilite une collaboration au niveau du design en combinant les ontologies pour créer un langage spécifique au niveau de la conception. Dans le même sens, (Li et al., 2011) présentent un modèle ontologique qui permet d'enrichir le modèle CAO d'un produit avec des annotations. Ce modèle OntoCAD introduit une approche d'annotations standards.

Le niveau intermédiaire aux deux premiers concerne l'utilisation d'approche ontologique et la prolongation des standards existants assurant déjà la continuité sémantique. Ainsi, le NIST (Fenves et al., 2008) a travaillé au développement du CPM (Core Product Model) en se basant sur des langages standards tels que UML ou EXPRESS. Ce modèle permet de créer une représentation formelle des informations produits. De même, (Barbau et al., 2012) développe OntoSTEP une ontologie basée sur le standard STEP. Rappelons que le standard STEP,

notamment régi par la norme ISO 10303, permet d'assurer les échanges d'information dans un format neutre entre les logiciels de XAO.

2.3.3 Analyse et manques dans le domaine de l'industrialisation

Cette étude sur l'utilisation des ontologies pour assurer l'échange des données et la capitalisation des connaissances montre que l'utilisation d'ontologies est plébiscitée ces dernières années (Rao et al., 2014). En effet, pour enrichir les données produits ou pour créer une architecture qui va permettre l'échange d'informations, de nombreux travaux utilisent les ontologies. Cette ontologie peut, soit être créée spécifiquement pour un domaine de façon à assurer le lien sémantique entre plusieurs entités, soit se baser sur des standards qui pourront être enrichis avec des données produits en fonction des acteurs et des domaines. Les travaux décrits précédemment sont classés dans le Tableau 5 en trois catégories résumant la classification précédemment utilisée.

Tableau 5 : Les ontologies pour l'industrialisation

Description d'architecture	Description de produit	Description de standard
(Matsokis and Kiritsis, 2010)		
(Kühnle, 2010)		
(Cho et al., 2006)	(Yoo and Kim, 2002)	
(Lin and Harding, 2007)	(Vegetti et al., 2008)	
(Jiang et al., 2009)	(Patil et al., 2005)	
(Chen et al., 2009)	(Rachuri et al., 2005a)	(Fenves et al., 2008)
(Chungoora et al., 2013)	(Rachuri et al., 2005b)	(Barbau et al., 2012)
(Lemaignan et al., 2006)	(Bock et al., 2010)	
(Grosse et al., 2005)	(Li et al., 2011)	
(Panetto et al., 2012)		
(Jun et al., 2007)		

L'étude réalisée dans la section précédente a mis en avant l'intérêt de l'utilisation des ontologies pour assurer le partage d'information. Il apparaît que le partage de l'information est accru lorsque l'ontologie décrit un domaine au travers d'un langage standard. En effet, les standards répondent au besoin spécifique d'un domaine et ne présentent que les éléments strictement nécessaires à la description de ce domaine.

Il ressort également de l'étude que de nombreux travaux facilitent un échange d'information depuis les phases de production vers les phases amont de conception et d'industrialisation : ONTO-PDM (Panetto et al., 2012), KIF (Jun et al., 2007), PABADIS'PROMISE (Kühnle, 2010), SOM (Matsokis and Kiritsis, 2010), MCO (Chungoora et al., 2013). Ces modèles ontologiques permettent l'échange d'information au niveau des systèmes d'information et renseignent les données liant la production et la conception en assurant le lien entre les différentes phases du cycle de vie produit. Bien qu'autorisant l'échange de méta-données, depuis les phases aval de fabrication vers les phases amont de conception et d'industrialisation, ces modèles ne permettent pas l'échange d'informations spécifiques vers ou depuis la MOCN. En effet, ceux-ci ne permettent pas de retrouver une granularité suffisamment fine pour modéliser les informations de coupe (vitesses, trajectoire outils, outils de coupe...). C'est pourquoi, pour assurer cette capitalisation d'information depuis la MOCN vers la phase d'industrialisation, une modélisation plus détaillée est nécessaire. Ce nouveau modèle ontologique pourra s'appuyer sur les informations incluses dans le standard STEP-NC qui propose un niveau de granularité suffisant pour couvrir les informations spécifiques à l'usinage.

Selon l'étude de la littérature réalisée par (Rao et al., 2014), il apparaît que les ontologies se présentent, pour le futur, comme des composantes importantes pour les systèmes d'information et notamment pour les aspects de gestion des connaissances métiers (KMS – Knowledge Management System). Donc, en utilisant un modèle ontologique permettant de contenir un niveau de granularité d'information suffisante, il apparaît alors possible d'assurer

l'interopérabilité sémantique avec les systèmes d'information, ce qui permettrait de répondre à la question: "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation?". En revanche, ni les modèles ontologiques, ni le standard STEP-NC ne permettent d'adresser la réutilisation des connaissances et des expertises métiers en vue de produire des pièces bonnes du premier coup en se basant sur les bonnes pratiques entreprises. En effet, une réintégration au niveau de la programmation d'usinage permettrait de s'appuyer sur des pratiques déjà validées. C'est pourquoi, la section suivante propose d'étudier les outils du Knowledge Management (KM) pour la chaîne numérique d'industrialisation.

2.4 Gestion des connaissances pour l'industrialisation

2.4.1 Définition du Knowledge Management

D'après (Lehaney, 2004) la gestion des connaissances – Knowledge Management (KM) – est définie comme une activité qui consiste à créer, extraire, intégrer et à réutiliser les connaissances et savoir-faire capitalisés de façon à atteindre des enjeux stratégiques tels que l'amélioration des performances, une réduction des coûts ou encore répondre aux contraintes législatives et sociales. La gestion des connaissances et du savoir-faire se révèle être une tâche complexe qui implique à la fois les personnes, les processus et toutes les interactions avec les solutions technologiques qui détiennent les connaissances et les savoir-faire métiers qui sont présents dans les bases de connaissances (Giannetti et al., 2004). En suivant cette approche, le KM peut être considéré comme la gestion des processus de transfert des connaissances. Pour la suite des travaux, nous considérerons la définition proposée par (Newman, 2002) qui présente le KM comme "l'ensemble des processus qui gèrent la création, la dissémination et l'utilisation des connaissances capitalisées". En se basant sur cette définition, il apparaît que le KM implique de nombreux processus itératif qui peuvent s'entrecroiser, mais surtout se dérouler simultanément (Serban and Luan, 2002).

Nous distinguons dans la littérature deux types de connaissances : les connaissances tacites et les connaissances explicites. Les connaissances explicites sont par nature objectives et rationnelles, correspondant ainsi à tout ce qui peut être extrait de documents tels que des textes, des tableaux, des formules, des diagrammes ou encore des spécifications produits. Par

opposition, les connaissances tacites sont considérées subjectives et ne peuvent être exprimées clairement. Bien que ce type de connaissances soit difficilement capitalisable, des travaux de recherche se sont intéressés à la représentation et la capitalisation des connaissances et savoir-faire tacites (Nonaka and Takeuchi, 1997).

En se focalisant sur les besoins de capitalisation des connaissances tacites, il apparaît donc nécessaire de mettre en place les processus du Knowledge Management. (Del-Rey-Chamorro et al., 2003) définissent le processus de création de connaissances en 4 phases successives qui sont illustrées sur la Figure 8.

- L'extraction des données
- La structuration et la capitalisation des informations
- La restitution des connaissances pertinentes
- L'utilisation des connaissances.

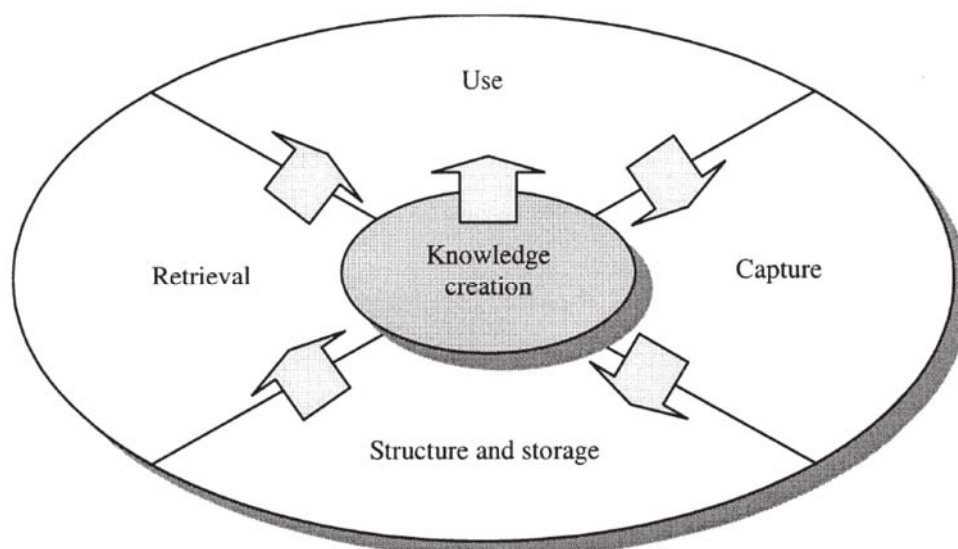


Figure 8 : Principe du Knowledge Management (Del-Rey-Chamorro et al., 2003)

Pour réaliser, ces quatre étapes du processus de création et de réutilisation des connaissances, de nombreuses solutions ont été développées dans les 40 dernières années. L'apparition de nouvelles technologies a notamment permis de développer les phases de stockage et de réutilisation du processus de KM, et cela, pour tout le cycle de vie des produits et, par extension pour la gestion des connaissances issues des phases de développement ou de production (Assouroko et al., 2014; Garetti et al., 2005).

Afin de se concentrer sur la gestion des connaissances pour la phase d'industrialisation, la section suivante propose d'étudier spécifiquement les solutions techniques de KM relative à cette phase.

2.4.2 Etude des solutions KM pour l'industrialisation

Comme vu précédemment, une des étapes majeures de l'industrialisation est la planification des procédés de fabrication. Cette étape consiste à définir les opérations d'usinage en fonction de la géométrie, le séquençage de ces opérations, le choix des outils, etc. de façon à pouvoir en déduire une estimation des temps et des coûts de production et ainsi déterminer les ressources à utiliser (Denkena et al., 2007). Afin de permettre les choix les plus pertinents possibles, la planification des procédés se fait par l'intermédiaire de connaissances sur les procédés et au travers de règles métiers spécifiques. De nombreux travaux de recherche se sont intéressés aux solutions pour la planification des procédés de fabrication dans les 30 dernières années : Les différentes études de la bibliographie en attestent (Alting and Zhang, 1989; Cay and Chassapis, 1997; Elmaraghy, 1993; Eversheim and Schneewind, 1993; Gouda and Taraman, 1989; Ham and Lu, 1988; Kamrani et al., 1995; Kiritsis, 1995; Leung, 1996; Marri et al., 1998; Nebel, 1965; Steudel, 1984; Xu et al., 2011; Yusof and Latif, 2014).

Dans les solutions pour la planification des procédés de fabrication, on retrouve deux grandes approches pour la sélection des opérations d'usinage: Les approches par variantes et les approches génératives.

2.4.2.1 Les approches par variantes

Les approches par variantes, aussi appelées approches par récupération d'informations, fonctionnent au travers de la technologie de groupe qui permet de sélectionner un procédé de fabrication générique qui colle le mieux à la pièce à fabriquer, en se basant sur les similarités qui existent entre plusieurs familles de groupe (Koenig, 1990). Dans le cas de la fabrication d'une pièce, des critères de similarité de formes et d'enchaînements de formes sont utilisés pour sélectionner le processus pour réaliser la nouvelle pièce.

Parmi les approches par variantes, on distingue plusieurs technologies: La technologie la plus répandue pour cette approche correspond aux Knowledge Based Systems (KBS) qui proposent une réponse basée connaissance à partir de Systèmes Expert (ES – Expert Systems). D'après (Kiritsis, 1995), les ES ont été largement utilisés dans ce domaine avec plus de 50 travaux traitant de la planification. Nous pouvons citer, comme exemple, les travaux de (Torres-Treviño et al., 2013) qui proposent un ES basé sur des règles métiers pour trouver le séquençage le plus adapté et la meilleure stratégie d'usinage. En utilisant des cas qui ont déjà été traités et capitalisés, la proposition permet au travers de régression algorithmique de construire des modèles pour la sélection des stratégies. Ces modèles sont ensuite vérifiés à l'aide d'analyse statistique pour trouver le meilleur séquençage pour le programme d'usinage. (Arezoo et al., 2000) ont développé EXCATS, un système qui permet de sélectionner l'outil de coupe et les conditions d'usinage, en se basant sur un système expert. Ce travail s'appuie sur quatre composantes : la base de connaissances, le module de sélection des conditions de coupe, le programme de sélection d'outils et la console du système expert qui contient l'interface utilisateur et qui propose la sélection de l'outil en fonction des conditions de coupe.

La reconnaissance de feature ou reconnaissance d'entité permet également d'appliquer une approche par variante. (Babic et al., 2008) identifient trois méthodes pour la détermination de feature : "design-by-feature", "automated feature recognition" et "interactive form feature definition". Ces trois méthodes correspondent à trois états différents pour la reconnaissance de features. La première prend en compte la conception native par feature pour une identification des entités naturelles, la deuxième réalise une détection des features et la troisième méthode se base sur les formes et les interactions pour la définition de feature. Ces reconnaissances de feature sont couplées à des règles métiers et des systèmes de requêtes dans les bases de connaissances. Nous pouvons citer en exemple (Hou and Faddis, 2006) qui proposent d'intégrer les systèmes d'IPAO au niveau des logiciels de CAO et FAO en se basant sur la description des features. Les entités d'usinage sont alors utilisées comme vecteur pour le transfert des informations sur la géométrie pour l'usinage et ainsi permettre au système FAO de générer la trajectoire outils. (Zhang et al., 2014) introduisent une reconnaissance d'entité d'usinage directement depuis le programme de coupe, de façon à pouvoir capitaliser les informations extraites au niveau de la machine-outil et, ainsi, pouvoir proposer des améliorations au niveau de l'industrialisation. Ce travail, basé sur le programme en Code-G, identifie les différences séquences d'usinage pour recomposer

les entités d'usinage. L'apparition du standard STEP-NC a favorisé la reconnaissance de feature d'usinage puisque décrivant directement la géométrie de la pièce à usiner.

De même, dans les approches par variantes, nous pouvons considérer les systèmes de Raisonnement à Base de Cas (CBR – Case-Base Reasoning). Pour le CBR, un agent de raisonnement permet de résoudre de nouveaux problèmes, en se référant aux similarités qui peuvent exister entre un, voire plusieurs cas qui ont déjà été traités par le passé. L'agent de raisonnement définit alors une adaptation des solutions trouvées au nouveau cas plutôt que de repartir d'une feuille blanche (Lopez De Mantaras, 2001). Par exemple, (Hashemi et al., 2014) proposent de déterminer la mise en position et le maintien en position (posage) à partir du CBR. Afin de définir le posage permettant une optimisation du programme de coupe, ils présentent une méthode en trois étapes: Un prétraitement de données issues des paramètres de la pièce, une sélection des cas présentant des similarités et la détermination des solutions les plus proches en utilisant un raisonnement sur la géométrie à partir des algorithmes d'Euclide. (Cao et al., 2013) introduisent une méthodologie pour déterminer les meilleures conditions de coupe à partir d'un raisonnement CBR. Pour cela, ils couplent à la méthodologie CBR un algorithme de fouille de données en se focalisant sur les similarités locales pour compléter les solutions avec des similarités globales.

2.4.2.2 Les approches génératives

Par opposition aux approches par variantes, les approches génératives proposent de créer la planification à partir de zéro, sans l'intervention humaine, en utilisant les outils propres à l'intelligence artificielle. Les technologies appartenant à la famille des approches génératives synthétisent, de façon automatique, les informations en se basant sur des règles logiques et en utilisant les bases de connaissances et la spécification des pièces (Chrysosouris, 2013). Parmi les approches génératives nous considérons différentes technologies pour réaliser une planification des opérations de fabrication, telles que les Réseaux Neuronaux, les Algorithmes Génétiques, la Logique Floue...

Depuis 1996, il apparaît que les Algorithmes Génétiques, qui consistent à incorporer des connaissances spécifiques à un domaine au travers d'algorithmes pour résoudre des problèmes complexes, ont été parfaitement transposés pour la planification de fabrication (Dereli and Filiz, 1999). Nous pouvons citer, comme exemple, (Yildiz, 2013) proposant

l'algorithme de recherche Cuckoo qui définit une solution pour l'amélioration du processus d'usinage, en donnant des paramètres et des conditions de coupe optimaux pour le fraisage de pièces mécaniques, en se focalisant sur les aspects qualité des pièces. (Kumar and Deb, 2012) génèrent des séquences d'usinage optimisées en utilisant des algorithmes génétiques. Cette optimisation intervient notamment en diminuant le nombre de changement d'outils pour le séquençage des opérations d'usinage.

La "logique floue" applique le principe de transformation des connaissances humaines en systèmes d'équations et d'espaces vectoriels et permet, ainsi, de combiner et de croiser de nombreux paramètres et informations issues des bases de connaissances (Beg and Shunmugam, 2003). Par exemple, (Kalaichelvi, 2012) propose une solution pour modéliser les états de surfaces en utilisant des régressions linéaires et la logique floue et en se basant sur des données déjà capitalisées. De même, (Kovac et al., 2013) exploitent les connaissances déjà capitalisées et les analyses faites par régression linéaire et utilisent les méthodes de classification de la logique floue pour déterminer l'usure des outils de coupe, de façon à être en mesure de réaliser le changement d'outil au bon moment.

Les Réseaux Neuraux proposent une méthode de raisonnement proche de celui réalisé par l'homme pour déterminer le processus le plus adapté à chaque cas. Les travaux de (Ming et al., 1999) présentent une modélisation pour un système logiciel de planification des procédés de fabrication automatique. Cette solution logicielle propose un raisonnement mature qui permet d'éliminer les solutions impossibles pour la planification en se basant sur les paramètres existants en bases de connaissances.

Dans la famille des approches génératives, on retrouve également d'autres méthodes basées sur l'intelligence artificielle telles que les réseaux de Pétri, les technologies par agent, les blocs de fonctions ou encore les technologies basées Web pour l'optimisation du programme et des conditions de coupe.

2.4.3 Les limites pour l'industrialisation

La section précédente a permis de mettre en avant les principales technologies utilisées pour réintégrer les connaissances capitalisées au niveau de la phase d'industrialisation et plus précisément, au niveau de l'élaboration des gammes et opérations, un domaine traité à de nombreuses reprises. On distingue deux approches distinctes, qui reposent sur l'utilisation de

base de connaissances, pour définir des programmes de coupe optimisés bien que les technologies les exploitent différemment. En effet, on observe des différences selon l'approche utilisée :

- les méthodes par variantes, bien que présentant une approche intéressante quant à la facilité de réutilisation des connaissances capitalisées si un cas similaire existe, le manque de processeur de calcul au niveau de la réintégration implique l'intervention et la mobilisation des connaissances du programmeur.
- les approches génératives, par leur capacité à raisonner de façon automatique, ont plus de mal à représenter, gérer et utiliser les expertises humaines et ainsi obtenir des entités utilisables (Chryssolouris, 2013).

Dans un souci de réponse au troisième verrou industriel formulé précédemment, la prise en compte des expertises humaines est donc un point essentiel. Ce critère obligatoire tend à orienter vers une approche par variantes, alors que l'optimum tendrait vers une combinaison des deux approches. De même, la question de capitalisation des connaissances métier au niveau de la production soulève l'interrogation sur la structuration et la capitalisation des données qui en sont issues.

En s'appuyant sur les études de la bibliographie réalisées par (Xu et al., 2011) et (Yusof and Latif, 2014), dans chacune des deux approches, les solutions "STEP-compliant" apparaissent également comme des supports pertinents pour permettre la capitalisation et la réintroduction des bonnes pratiques au niveau de l'élaboration des gammes. En effet, son format de données explicite permet de capitaliser des connaissances tacites pour une réutilisation ultérieure. Comme définies précédemment, les connaissances tacites peuvent être extraites et capitalisées du fait de leurs notions explicites. Cependant, la variété existant au niveau des méthodologies de réutilisation des connaissances a contraint les chercheurs à développer de multiples bases de données pour coller aux besoins spécifiques. Ce qui rend complexe la mutualisation des connaissances et induit une utilisation incomplète des données malgré un support de données standard. De plus, l'extraction des données issues, de la fabrication implique la gestion d'une masse d'informations conséquentes, difficile à maintenir. On constate que les bonnes pratiques des entreprises évoluent avec le temps et les nouvelles pratiques à capitaliser doivent remplacer les pratiques obsolètes. Les bases de données proposées dans les travaux traitant de la gamme s'appuient sur une gestion manuelle de la capitalisation des expériences et ne permet donc pas de gérer aisément l'évolution des

pratiques. La gestion par version, comme proposée par les systèmes PLM, permettrait alors une gestion simplifiée des bonnes pratiques en vue d'une réutilisation. Cela est renforcée par (Denkena et al., 2007) qui définit le PLM comme la colonne vertébrale technologique naturelle pour les informations et données produits depuis la conception jusqu'à la production incluant la définition des procédés de fabrication et gammes associées. Le PLM apparaît alors comme une solution évidente permettant ainsi de gérer et garantir la continuité des chaînes numériques.

L'analyse des travaux pour l'intégration de connaissances et savoir-faire métiers met en avant que les optimisations au niveau du programme d'usinage sont multiples : les séquençages machines, l'usure des outils, la sélection/changement d'outils, les états de surfaces, les paramètres machine, etc. Bien que ce niveau de précision soit intéressant pour certains types d'optimisation, il ne fournit pas le niveau de précision suffisant pour prendre en compte la stratégie d'usinage ou, inversement, le retour d'information sur la stratégie d'usinage ne prend pas en compte les paramètres de coupe. Or, pour être en mesure d'intégrer des connaissances pertinentes au niveau de la FAO, il est nécessaire de pouvoir fournir le maximum d'informations possibles en cumulant, à la fois, les informations sur la stratégie d'usinage et sur les paramètres de coupe.

Au vu de l'analyse réalisée dans cette section, il nous apparaît qu'une architecture spécifique doit être développée pour répondre à la question : "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation?". Cette architecture doit donc s'appuyer sur des solutions PLM pour proposer la plus grande disponibilité d'information et surtout pour uniformiser, sur le modèle entreprise étendue, la capitalisation et le retour de connaissance dans la chaîne numérique d'industrialisation. Le processus de gestion des connaissances devra également proposer les bons niveaux de granularité, pour les informations capitalisées en termes de stratégie et de paramètres d'usinage.

2.5 Synthèse de la bibliographie et conclusion

Le chapitre 1 sur le contexte industriel, nous avait permis de mettre en avant la problématique scientifique : "Comment assurer l'interopérabilité dans la chaîne numérique

d'industrialisation pour atteindre une conception-fabrication intégrée?". En effet dans le contexte d'entreprise étendue et d'usine du futur, l'intégration des savoir-faire et connaissances métiers au niveau de la chaîne numérique d'industrialisation nous apparaissent essentiels pour assurer la compétitivité des entreprises manufacturières.

L'analyse de la bibliographie sur l'interopérabilité réalisée dans la première partie de ce chapitre, nous permet de retrouver deux solutions plus fortement plébiscitées: l'utilisation de standard pour assurer l'échange d'information et les modèles ontologiques. Comme une première réponse à l'interopérabilité, l'analyse des standards pour assurer l'échange des informations sur la chaîne numérique révèle le standard STEP-NC. Par son format de données enrichies, le standard STEP-NC permet de réunir, en plus de la description complète de la géométrie de la pièce sous formes d'entités, toutes les informations relatives à la stratégie ainsi que les paramètres d'usinage en y associant également les informations sur les outils. Bien que peu implémenté au niveau des industries manufacturières, de nombreux travaux scientifiques s'intéressent à l'utilisation du standard STEP-NC pour favoriser le retour d'informations et comme support à l'optimisation de production. De plus, le standard STEP-NC, par sa couverture des différentes informations permet une propagation des informations sur toutes les étapes de la chaîne numérique. Comme illustré sur la Figure 9, l'utilisation du standard STEP-NC permet de s'affranchir du Post-Processeur en déplaçant l'intelligence d'usinage vers l'interpréteur de la machine-outil.

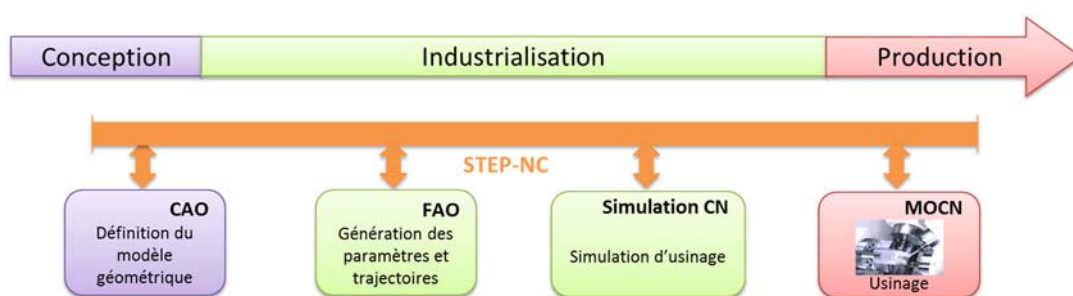


Figure 9 : Chaîne numérique STEP-NC

Bien que permettant d'assurer l'interopérabilité au niveau des applications métiers; le standard STEP-NC ne peut supporter, à lui seul, les échanges avec les systèmes d'information et notamment la capitalisation des connaissances en vue d'une réutilisation. Cette limite de

STEP-NC soulève alors la problématique suivante : "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation ?". Pour répondre à cette problématique, une analyse sur l'interopérabilité pour la phase d'industrialisation a été menée dans ce chapitre. Cette étude conduit à envisager des solutions différentes de l'utilisation des standards et oriente vers l'utilisation de modèles ontologiques, pour assurer l'interopérabilité sémantique et, ainsi, pouvoir favoriser les échanges d'informations. Cependant, bien qu'il existe de nombreuses ontologies produits pour l'échange et la capitalisation des informations de production, il n'existe actuellement pas de modèles ontologiques qui présentent une granularité suffisante pour supporter les informations spécifiques à l'usinage. Nous pouvons alors dégager la question suivante "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation?". Comme réponse à cette question, une solution envisageable pour notre cas, serait le développement d'un modèle ontologique basé sur le standard STEP-NC qui présente toute la granularité nécessaire pour assurer la bidirectionnalité des échanges sur la chaîne numérique d'industrialisation.

Tout en proposant une architecture intéressante pour la structuration des données pour assurer l'interopérabilité avec les systèmes d'information, un tel modèle ne nous apporte pas de réponse sur la capitalisation des savoir-faire métiers et la réutilisation de ce savoir-faire métier pour la production d'une pièce bonne du premier coup. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous avons également étudié les travaux qui traitent de la capitalisation de connaissances pour la réutilisation au niveau du process planning. De nombreuses solutions avec des méthodologies et des technologies différentes permettent de réinjecter des connaissances et savoir-faire métiers au niveau de la chaîne numérique des applications métiers, mais elles ne permettent pas de composer avec un niveau de granularité suffisant. En effet, les solutions existantes ne permettent pas d'englober aussi bien les informations liées aux paramètres d'usinage que celles liées à la stratégie d'usinage. Ce problème de granularité est renforcé par la multiplication des bases de connaissances qui ne permettent pas une gestion des connaissances optimisée et la réunification des données capitalisées et génère donc la question : "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation?". Une solution envisageable pourrait s'appuyer sur les solutions PLM des systèmes d'information pour favoriser le versionnement des bonnes pratiques et l'uniformisation des données extraites de la coupe.

Ce chapitre a permis de répondre à la bidirectionnalité de la chaîne numérique au travers du standard STEP-NC, mais il a également généré deux questions :

- "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation?"
- "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation?"

Les études menées dans ce chapitre ont permis d'identifier des pistes de propositions pour répondre à ces deux verrous scientifiques. La réponse à ces deux verrous scientifiques permettra ensuite, de répondre aux verrous industriels, pour l'obtention de pièce bonne du premier coup, en réutilisant des savoirs-métiers de l'entreprise. C'est pourquoi, le chapitre suivant s'attache à détailler les propositions OntoSTEP-NC, pour répondre à la première question, et Closed-Loop Manufacturing, pour répondre à la seconde question.

Proposition

Ce troisième chapitre apporte des réponses aux verrous scientifiques présentés à la fin du chapitre précédent via deux propositions. Le modèle OntoSTEP-NC, une ontologie basée sur le standard STEP-NC, comme support des échanges entre les chaînes numériques d'industrialisation et le processus Closed-Loop Manufacturing qui propose un cadre pour la capitalisation des connaissances et savoir-faire de fabrication en vue d'une intégration au niveau de l'industrialisation en s'appuyant sur trois étapes principales : l'extraction de données machines, la vérification puis la validation des bonnes pratiques pour l'usinage de futur cas et la réutilisation des connaissances au niveau de la phase d'industrialisation.

3.1 OntoSTEP-NC modèle pour l'interopérabilité de la chaîne numérique d'industrialisation

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en avant deux barrières scientifiques qui restent à lever pour répondre à la problématique scientifique établie dans le chapitre 1. La première question est : "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation ?". En se basant sur l'analyse de l'état de l'art effectuée, il apparaît que l'utilisation d'ontologies permet de structurer les informations de sorte à favoriser une connexion avec les systèmes d'information, pour exploiter la gestion des connaissances. De même, l'état de l'art a révélé que le standard STEP-NC offre une structure intéressante pour assurer l'interopérabilité au niveau des applications métiers de la chaîne numérique en englobant les informations géométriques, les paramètres outils et toute la logique de la gamme d'usinage. C'est pourquoi, la première partie de ce chapitre détaille notre proposition intitulée OntoSTEP-NC (cf. le schéma exposé en Figure 10), une ontologie basée sur STEP-NC, pour structurer les données issues des MOCN.

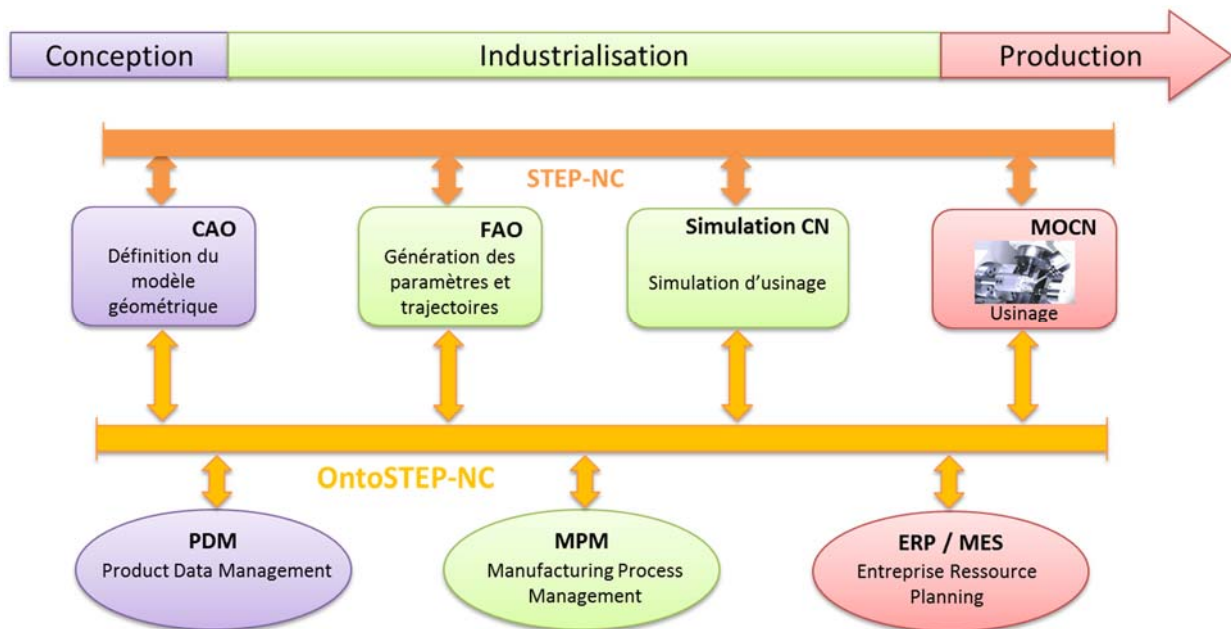


Figure 10 : Chaîne numérique OntoSTEP-NC

3.1.1 STEP-NC : un standard pour l'ontologie

3.1.1.1 Le choix de ISO 14649

Rappelons que le standard STEP-NC permet, au travers de sa structure, d'assurer l'interopérabilité au niveau des applications métiers en intégrant les informations liées au programme d'usinage. Il permet de déplacer l'intelligence vers l'interpréteur machine et de s'affranchir du post-processeur qui contenait alors l'intelligence machine et figeait le retour d'information. Rappelons également que STEP-NC est régi par deux normes ISO adressant deux niveaux d'information différents : ISO 14649 (Niveau ARM) et ISO 10303–238 (Niveau AIM). Au travers d'OntoSTEP-NC, nous recherchons un modèle permettant d'extraire les données depuis la phase de production et de structurer les informations de façon à pouvoir les réutiliser au niveau de la phase d'industrialisation. Ce modèle doit se baser sur les données exactes de production en s'intéressant spécifiquement au processus de fabrication. Le modèle proposé par l'ISO 14649 offre justement la possibilité de ne travailler qu'avec les informations de production sans prendre en compte les intentions de conception de la phase de conception. De plus, pour avoir une plus grande flexibilité et agilité du nouveau modèle pour assurer le lien avec les systèmes d'information, il est préférable d'avoir un format facile à programmer et à lire. Nous opterons donc pour l'utilisation de l'ARM ISO 14649 pour le développement d'OntoSTEP-NC plutôt que l'AIM ISO 10303 – AP238. C'est pourquoi, pour la suite des travaux exposés ici, nous considérerons le standard ISO14649 comme référence pour STEP-NC. Les sections suivantes proposent d'étudier la structure de l'ISO 14649.

Pour les besoins de création du modèle OntoSTEP-NC, nous nous intéresserons uniquement aux aspects fonctionnels du niveau ARM:

- Part10 : Elle décrit la structure générale du programme STEP-NC et contient également toutes les fonctions logiques pour l'exécution du programme de coupe;
- Part11: Elle décrit les opérations spécifiques pour le fraisage. Elle est rattachée à la Part 10 au travers de l'entité "NC_function";
- Part12 : Similairement à la Part 11, elle décrit les opérations spécifiques pour le tournage et est rattachée à la Part 10 par l'entité "NC_function";

- Part111 : Elle décrit la géométrie des outils spécifiques pour réaliser les opérations de fraisage et se raccroche au Part 11 par l'entité "milling_tool" elle-même directement rattachée à la Part 10 au travers de l'entité "machining_tool";
- Part121 : Elle décrit la géométrie des outils dédiés tournage. Elle est rattachée à la Part 12 par l'entité "turning_tool" elle-même rattachée à la Part 10 par l'entité "machining_tool".

L'intégration de ces fascicules de l'ISO14649 permet de reconstituer la partie fonctionnelle ainsi que la logique du programme d'usinage. Il s'agit du minimum d'information à retranscrire au niveau du modèle ontologique de façon à extraire et capitaliser l'intégralité des données machine et paramètres d'usinage. La section suivante introduit l'étude détaillée de la structure du programme en se basant sur les entités définies par les fascicules décrits précédemment.

3.1.1.2 Organisation du programme d'usinage

La structure du programme d'usinage STEP-NC se décompose en deux parties distinctes : HEADER et DATA. La première section comporte l'intégralité des informations liées aux propriétés du programme d'usinage. Celles-ci intègrent des données concernant le numéro de programme, le nom du programmeur, le type de produit et des caractéristiques propres à chaque entreprise. La section DATA comporte le programme d'usinage de la pièce à fabriquer ainsi que toutes la logique et le séquençage des opérations d'usinage ainsi que la géométrie de la pièce à réaliser. La combinaison de ces deux parties définit le programme d'usinage complet et fonctionnel comme illustré sur la Figure 11.

Contrairement aux programmes conventionnels en code-G, STEP-NC propose une stratégie orientée objet, organisée autour d'une entité appelé "Workingstep" qui spécifie les processus machine à mettre en place plutôt que de définir les parcours d'outils pour l'usinage de pièce. Il s'agit de la logique d'usinage à respecter pour assurer le bon déroulement du programme d'usinage. Cette logique est pilotée par l'entité "Workplan" qui propose une séquence des entités "Workingstep". Chaque "Workingstep" décrit une seule opération machine en y associant des instances telles que les outils, la stratégie, la technologie et les fonctions machines (sélection des paramètres) pour une seule entité d'usinage.

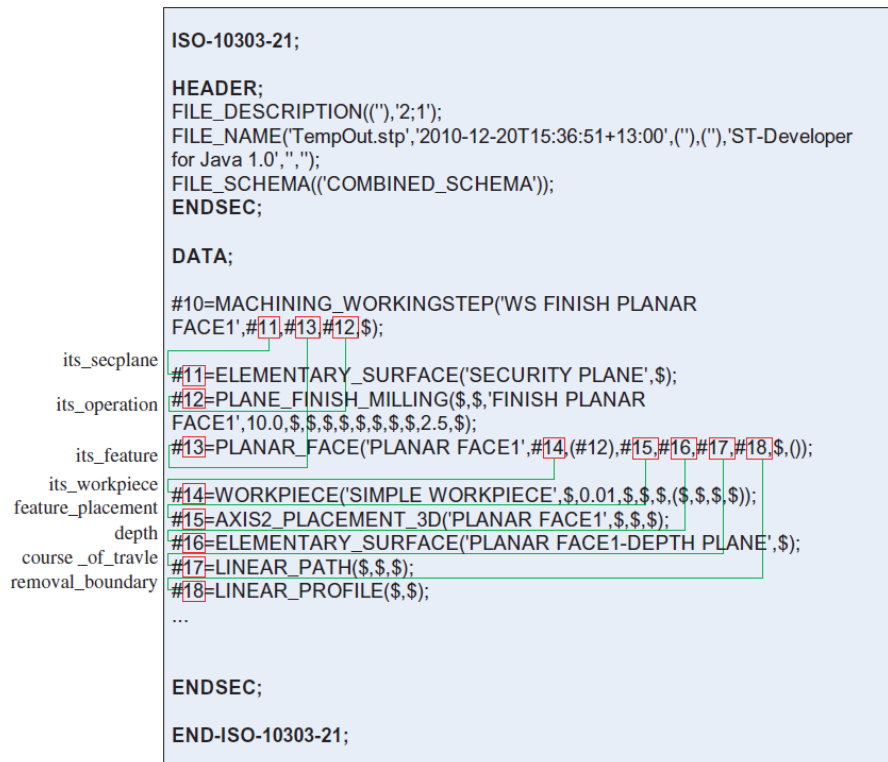


Figure 11 : Exemple de structure de programme STEP-NC (Wang and Xu, 2013)

L'ensemble des fonctions machines et des instances se retrouve exprimé par des entités directement liées à une entité mère "Workingstep" et imbriquées les unes dans les autres comme montré sur la Figure 11. La structuration sous forme d'entités et d'une logique orientée objet permet de décrire l'intégralité du programme d'usinage en partant d'une entité racine "Project" pour aller vers les entités filles, décrivant le choix des paramètres et les spécificités géométriques à l'aide d'une ramification liant les entités les unes aux autres. La structure active de STEP-NC décrit explicitement la logique du programme d'usinage ainsi que les différentes opérations à réaliser pour la fabrication d'une pièce mécanique en se basant sur un modèle géométrique exact issu des phases de conception.

Bien que le programme STEP-NC offre une structure très intéressante pour l'extraction des données, la création du modèle ontologique présente quelques difficultés et n'apparaît pas automatique. En effet, EXPRESS est un langage défini par la norme STEP de façon à décrire les caractéristiques géométriques et les informations produit sous forme d'entités qui n'existent pas sous la même forme dans le monde ontologique. C'est pourquoi dans la section suivante nous proposons d'étudier la méthodologie de création de l'ontologie en OWL (le

choix du langage et du logiciel d'édition sont détaillés en Annexe C) permettant la modélisation et la mise en œuvre d'OntoSTEP-NC en conservant les propriétés et les informations du standard STEP-NC.

3.1.2 Méthodologie de création

Contrairement au langage EXPRESS qui décrit la norme STEP-NC et qui définit simplement les relations existantes entre les entités et les attributs, en langage OWL, les concepts d'entités, d'attributs et de cardinalités n'existent pas. Ces concepts sont remplacés en OWL par les *Classes*, les *Object properties* et les *Data properties*. Il apparaît donc nécessaire de faire des choix pour transformer la norme STEP-NC décrite en EXPRESS en OntoSTEP-NC décrits en OWL. La Figure 12 propose une vue d'un modèle OntoSTEP-NC et des liens sémantiques entre entités après transformation en OWL.

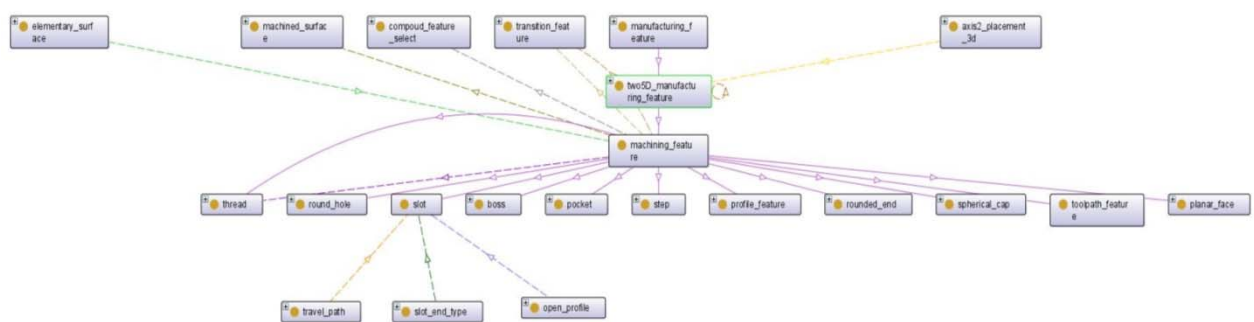


Figure 12 : Graphe OntoSTEP-NC (Entité Manufacturing_Feature)

Comme décrit précédemment dans notre état de l'art sur STEP-NC, ce standard propose une structure orientée entité d'usinage (surface plane, poche, rainure, step, trou rond, demi-sphère, queue d'aronde, parcours outils et le profil libre). Toute la logique du programme est organisée autour des séquences d'opérations qui s'appuient elles-mêmes sur les entités d'usinage. Les informations de chaque opération sont donc incluses dans la description de l'entité et sont reliées aux opérations. C'est pourquoi il est essentiel de conserver les liens entre les entités d'usinage, les opérations et les paramètres d'usinage. Les sections suivantes présentent les choix que nous avons réalisés pour conserver les liens lors de traduction de STEP-NC vers OntoSTEP-NC

3.1.2.1 Modélisation des entités

Le premier choix qui est effectué est la traduction des "Entity" du langage EXPRESS de STEP-NC en "Classes" du langage OWL pour OntoSTEP-NC. Avec ce choix, deux entités en EXPRESS qui seront qualifiées de mère-fille se transformeront en classes mère-fille en OWL. Ainsi la relation définissant le lien en EXPRESS "SUBTYPE OF (...)" devient "SubClassOf" en OWL comme présenté sur l'exemple en Figure 13 avec les entités "radiused_slot_end_type" et "slot_end_type".

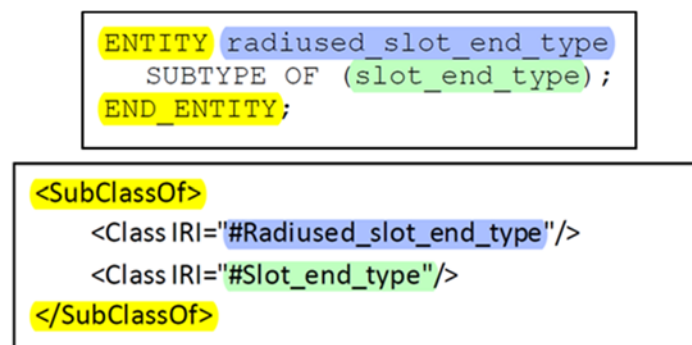


Figure 13 : Transformation des entités en Classes

Bien que de nombreuses entités en EXPRESS soit des "SUBTYPE OF (...)", il existe de nombreuses entités qui ne sont pas considérées comme des caractères hérités mais comme des attributs. Ces attributs seront également décrits par des classes au niveau du modèle OWL donnant ainsi la création de 403 entités. La section suivante détaille la modélisation des attributs associés aux classes en OWL.

3.1.2.2 Modélisation des attributs et des cardinalités

De même que pour les entités en EXPRESS, les attributs de la norme STEP-NC ne sont pas interprétables en OWL, c'est pourquoi il faut créer des "Object properties" pour chacun des attributs. Ainsi, les attributs de chaque entité en EXPRESS seront traduits par les "Classes" et seront reliés à l'entité de niveau supérieur par des "Object properties". Ces "Object properties" prendront par défaut la forme suivante : "Entité niveau n_has_attribut". Ces "Object properties" seront positionnés sur l'Entité de niveaux n-1 de façon à assurer les liens sémantiques complets entre les "Classes" au niveau entités et les "Classes" au niveau attributs. La création de l'ensemble des attributs conduit à la création de 494 liens sémantiques.

En prenant l'exemple de l'entité racine "project", l'attribut concernant le statut "approval" peut-être défini en créant une entité dans les "Object properties" du modèle OntoSTEP-NC avec la création de "Project_has_status" permettant ainsi de relier les Classes "Approval" et "Project" pour assurer le lien sémantique. La Figure 14 illustre la modélisation de l'attribut "status" en OWL (surligné en orange sur la figure).

```

ENTITY project;
  its_id:          identifier;
  main_workplan:   workplan;
  its_workpieces:  SET [0:?] OF workpiece;
  its_owner:       OPTIONAL person_and_address;
  its_release:     OPTIONAL date_and_time;
  its_status:      OPTIONAL approval;
  (*
  Informal proposition:
  its_id shall be unique within the part programme.
  *)
END_ENTITY;

```

```

<SubClassOf>
  <Class IRI="#Approval"/>
  <ObjectSomeValuesFrom>
    <ObjectProperty IRI="#Project_has_status"/>
    <Class IRI="#Project"/>
  </ObjectSomeValuesFrom>
</SubClassOf>

```

Figure 14 : Exemple d'Object Property

La création des "Object properties" permet donc de convertir les attributs de la norme STEP-NC d'EXPRESS en OWL. Cependant, les attributs en EXPRESS présentent des aspects de cardinalités qui ne peuvent être transcrits directement au travers du modèle OWL. Le Tableau 6 ci-dessous présente l'équivalence des traductions entre les cardinalités présentes en EXPRESS et celles choisies en OWL.

Tableau 6 : Traduction des cardinalités EXPRESS-OWL

EXPRESS	OWL
OPTIONAL	Some
SET [0; ?]	Min = 0
LIST [1;?]	Min = 1
LIST [0; 2] ou LIST [0; N]	Max = 2 ou Max=N
ONEOF	Min = 1 + Disjoint Classes
Pas de quantifieur	Exactly = 1

En suivant les règles de correspondances exposées dans le Tableau 6 ci-dessus, nous retrouvons avec l'exemple choisi en Figure 14 l'expression "OPTIONAL" de l'attribut "approval" en EXPRESS qui est traduit en OWL par la cardinalité "*ObjectSomeValuesFrom*" et qui permet ainsi de conserver la majorité des propriétés de cardinalité. Afin de compléter la modélisation des attributs, nous exploitons également la définition des types comme exposé dans la section suivante.

3.1.2.3 Modélisation des types

Contrairement au langage EXPRESS, en OWL tout ce qui n'est pas contraint est considéré comme possible. C'est pourquoi pour assurer la cohérence des données, il est nécessaire de contraindre les attributs en une entité spécifiant leur type (decimal, integer, double, string...). Pour cela il faut déclarer des "*Data properties*" sur l'attribut concerné. La création d'entité de type permet au travers de liens sémantiques de définir le type. Par défaut, on trouvera alors "*Entité_niveau_n_is_Entité_niveau_n-1*" et l'"*Entité_niveau_n-1*" sera, à son tour, typée selon les spécifications STEP-NC.

En reprenant l'exemple de l'entité "Project", l'attribut qui concerne le statut représenté en OWL par la classe "Approval" doit être spécifié comme étant du texte. C'est pourquoi, il faut créer dans les "*Data properties*" une entité qui contraint le type : "*approval_is_label*" et lui affecte la valeur "string" comme représenté sur la Figure 15.

```

<SubClassOf>
  <Class IRI="#Approval"/>
  <DataAllValuesFrom>
    <DataProperty IRI="#approval_is_label"/>
    <Datatype abbreviatedIRI="xsd:string"/>
  </DataAllValuesFrom>
</SubClassOf>

```

Figure 15 : Exemple de Data Property

3.1.3 Mise en œuvre d'OntoSTEP-NC

3.1.3.1 Le cas d'illustration

La Figure 16 présente la pièce qui a été choisie pour illustrer nos propositions. Cette pièce est directement issue de la norme STEP-NC ISO 14649 qui fournit deux entités d'usinage différentes (un trou et une poche fermée) et une opération de surfacage. Pour illustrer nos propositions, nous nous intéresserons à l'entité trou débouchant : Le trou possède un diamètre de 20mm et est débouchant sur l'ensemble du volume (profondeur 50mm).

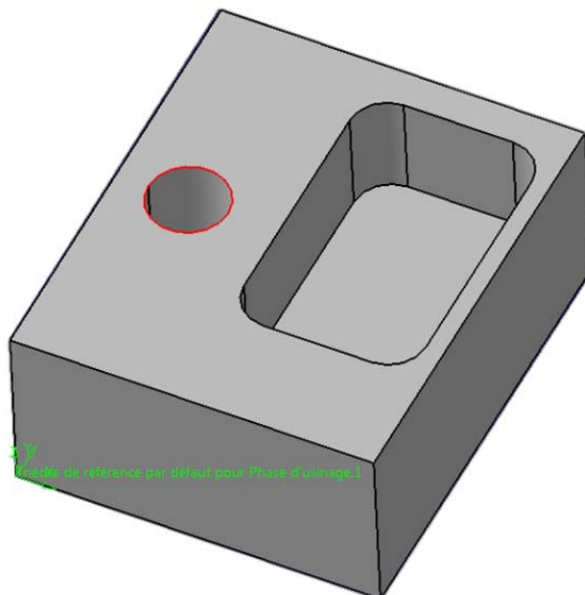


Figure 16: Cas d'illustration

3.1.3.2 Le programme STEP-NC

La Figure 17 présente un extrait du programme d'usinage du cas d'illustration en se focalisant sur les lignes concernant la géométrie de l'entité d'usinage (ou manufacturing feature) "Trou" pour des soucis de visibilité (le code complet du programme d'usinage se trouve en Annexe A). On observe qu'il s'agit d'une opération de perçage du trou nommé "Hole1" (ligne #11 et #21). Ce trou est un trou débouchant (ligne #25) et a un diamètre de 20mm (ligne #111). L'intégralité de ces informations permet d'obtenir une description géométrique complète de l'entité "trou" telle que proposée dans le programme d'usinage. Il s'agit des informations minimum qui vont permettre d'assurer la traduction des informations issues du programme STEP-NC dans le modèle OntoSTEP-NC. Le détail de l'instanciation de ce modèle est proposé dans la section suivante.

```
DATA;
#0= PROJECT('EXECUTE EXAMPLE1',#1,{#2},$, $, $);
#1= WORKPLAN('MAIN WORKPLAN',{#10,#11,#12,#13,#14},$, #3, $);
#2= WORKPIECE('CUBOID WORKPIECE', $, 0.01, $, $, $, {#91,#92,#93,#94});
#3= SETUP('MAIN SETUP', #62, #60, {#4});
#4= WORKPIECE_SETUP(#2, #63, $, $, {});

#11= MACHINING_WORKINGSTEP('WS DRILL HOLE1', #60, #21, #32, $);
#21= ROUND_HOLE('HOLE1 D=20MM', #2, {#32}, #67, #70, #111, $, #25);
#25= THROUGH_BOTTOM_CONDITION();
#111= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(20.00, #115);
[...]
ENDSEC;
```

Figure 17 : Programme STEP-NC du cas d'illustration

3.1.3.3 La transformation en OntoSTEP-NC

En s'appuyant sur les informations extraites du programme d'usinage de notre cas d'illustration et sur le modèle d'OntoSTEP-NC présenté précédemment, les informations peuvent être traduites en OWL. En effet, le modèle OntoSTEP-NC peut-être instancié au travers des entités individus qui exploitent le squelette du modèle précédemment établi. Ainsi le programme STEP-NC peut être entièrement reconstruit en OWL au niveau d'OntoSTEP-NC par la création d'individus pour chaque nouvelle entité appelée par le programme STEP-NC (une ligne du programme correspondant à un nouvel individu dans le modèle OntoSTEP-NC).

Les Figure 18 et Figure 19 présentent un exemple de transformation du programme STEP-NC détaillé dans la section précédente en s'appuyant sur les entités sélectionnées. La Figure 18 décrit la création des individus au niveau de l'interface du logiciel Protégé que nous utilisons pour la modélisation d'OntoSTEP-NC. Précisons alors que le feature "*Diameter1*" est rattaché en tant qu'individu à la classe "*toleranced_length_measure*". L'individu "*Diameter1*" est également défini comme étant une caractéristique de l'individu "*Hole1*" en tant qu'attribut d'un "*Round_hole*" possédant une "*Object Property*" : "*Round_hole_has_diameter*". Enfin, la caractéristique de valeur pour l'individu "*Diameter1*" avec un nombre considéré comme une variable "*double*" est égale au diamètre de 20mm du trou. La Figure 19 propose, quant à elle, des individus en code OntoSTEP-NC qui retranscrivent l'intégralité des informations présentes dans le programme de coupe et également exploitables par des systèmes connexes.

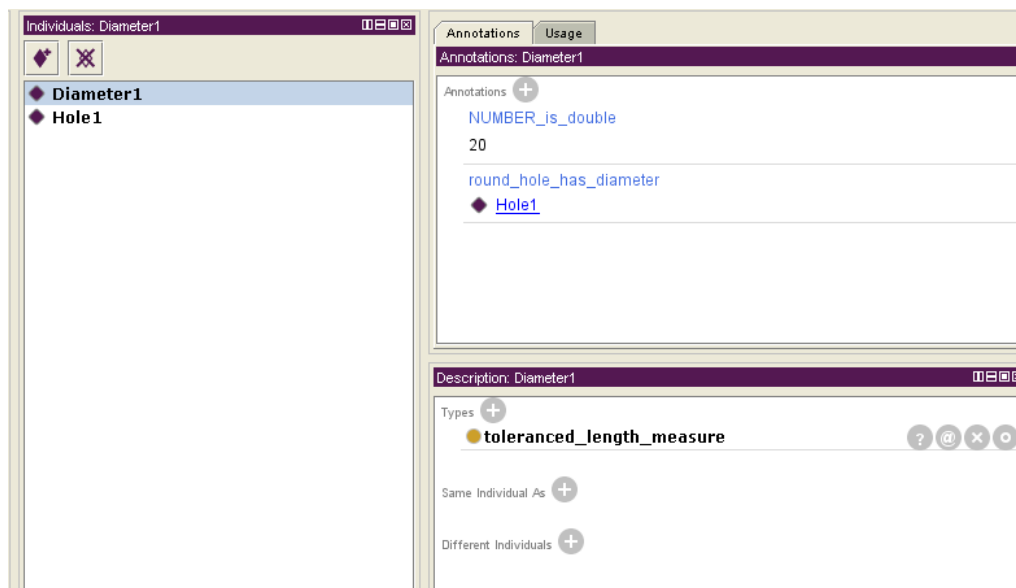


Figure 18 : Vue Protégé d'OntoSTEP-NC avec le cas d'illustration

```
<NamedIndividual rdf:about="&OntoSTEP-NC;Diameter1">
  <rdf:type rdf:resource="&OntoSTEP-NC;toleranced_length_measure"/>
  <OntoSTEP-NC:NUMBER_is_double>20</OntoSTEP-NC:NUMBER_is_double>
  <OntoSTEP-NC:round_hole_has_diameter rdf:resource="&OntoSTEP-NC;Hole1"/>
</NamedIndividual>

<NamedIndividual rdf:about="&OntoSTEP-NC;Hole1">
  <rdf:type rdf:resource="&OntoSTEP-NC;round_hole"/>
</NamedIndividual>
```

Figure 19 : Code OntoSTEP-NC avec le cas d'illustration

3.1.4 Apport et cadre d'utilisation d'OntoSTEP-NC

Cette partie détaille une solution pour transformer la norme STEP-NC définie en EXPRESS en OntoSTEP-NC, une ontologie en OWL. La difficulté majeure rencontrée pour la création d'OntoSTEP-NC vient du fait qu'il n'y a pas la possibilité de convertir directement et simplement les entités avec leurs attributs et leurs cardinalités en langage OWL. C'est pourquoi pour traduire des attributs, il faut utiliser les "*Object properties*" et les "*Data properties*". Comme vu précédemment, la création de ces propriétés permet alors de contraindre l'ontologie et de définir ses propriétés. En effet, l'environnement de modélisation ontologique étant différent de l'environnement STEP-NC, il est nécessaire de créer des conditions sur OntoSTEP-NC pour conserver les propriétés minimales définies par la norme. La création de propriétés connexes dépendrait alors des applications qui inter opèrent avec l'ontologie mais ne peuvent être imputés à OntoSTEP-NC.

La création d'OntoSTEP-NC permet ainsi de répondre à la question que nous avons exposée précédemment sur l'extraction et la structuration des informations issues de la MOCN en vue d'une réutilisation ultérieure. En effet, la limite majeure, qui avait été avancée au niveau de l'état de l'art sur les modèles permettant d'assurer l'interopérabilité, mettait en avant l'utilisation des ontologies comme piste la plus sérieuse pour la connexion avec les différents systèmes d'information. Cependant, après analyse des ontologies déjà existantes, il apparaissait des problèmes de granularité d'informations : ces modèles ne proposaient pas de gérer les données spécifiques de l'usinage mais uniquement des méta-données de fabrication et/ou production. Afin de répondre au problème de granularité, il a été décidé de créer OntoSTEP-NC pour répondre à ce besoin. Cette ontologie basée sur le standard STEP-NC doit permettre de retrouver les informations nécessaires à la fabrication incluses dans le programme d'usinage.

La création d'OntoSTEP-NC et notamment les choix de conception permettent également de répondre en partie à la problématique industrielle avec la possibilité d'intégrer la chaîne numérique avec les systèmes d'information. Par l'utilisation du format standard ontologique OWL, OntoSTEP-NC peut s'appuyer sur la stratégie des descripteurs logiques (description logic based) qui permettent ainsi de fournir rapidement et avec précision des informations en vue d'une réutilisation en raisonnant sur les axiomes reliant les entités et les individus qui peuplent

l'ontologie. De plus, le choix d'utilisation du logiciel Protégé qui permet l'exportation de l'ontologie en plusieurs formats de données tels que RDF/RDFS ou XML permet d'optimiser la réutilisation des données d'OntoSTEP-NC. L'ensemble des choix réalisés ici pour la conversion de STEP-NC en ontologie fait d'OntoSTEP-NC un support pour l'extraction et la structuration des informations issues de la production en vue d'une réutilisation future et permet également d'assurer l'interopérabilité des systèmes d'information en ce qui concerne les données d'usinage.

OntoSTEP-NC fournit donc un modèle capable de supporter les données issues de la fabrication et plus précisément des MOCN. Bien qu'OntoSTEP-NC permette de traduire un programme d'usinage STEP-NC en vue d'une réutilisation à différents niveaux de la chaîne numérique d'industrialisation, le cadre d'exploitation n'a pas encore été défini pour répondre à la seconde question : "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation?". C'est pourquoi la partie suivante s'intéresse à établir un processus pour la réutilisation des connaissances capitalisées au travers de Closed-Loop Manufacturing.

3.2 Définition de la Closed-Loop Manufacturing

Notre état de l'art au chapitre 2 a mis en avant que le standard STEP-NC permet de gérer de nombreuses informations pour l'usinage de pièces mécaniques et qu'il assure également la couverture de toute la chaîne numérique. Cependant, bien que le standard STEP-NC soit un vecteur pour l'échange des données sur l'ensemble de la chaîne numérique, il ne constitue pas une solution pour la gestion des connaissances issues de l'usinage. C'est donc pour répondre à la question "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation?" que nous proposons le processus Closed-Loop Manufacturing (CLM). Ce processus permet d'obtenir un retour d'information depuis la MOCN vers les systèmes FAO en utilisant les systèmes d'information et plus précisément le MPM. La boucle proposée par le processus CLM possède un périmètre fonctionnel couvrant les systèmes FAO, la simulation d'usinage et les MOCN comme illustré sur la Figure 20. La proposition se base sur les informations propres à l'usinage qui sont présentes dans les fichiers STEP-NC et qui sont ensuite capitalisées au travers des systèmes d'information. Cette

intégration repose sur la capacité à assurer une interopérabilité entre les systèmes d'information et la chaîne numérique des applications métiers. C'est pourquoi OntoSTEP-NC sera utilisé comme support pour les échanges de l'ensemble des informations entre les différentes solutions logicielles et technologiques. Nous distinguons dans le processus CLM trois étapes distinctes qui assurent le retour d'information depuis la phase de production vers la phase d'industrialisation:

- (1) La première étape concerne l'extraction des données machines depuis la MOCN.
- (2) La seconde étape propose un processus de validation des données extraites de façon à ne capitaliser que les bonnes pratiques conformes aux standards d'entreprise et qui serviront de référence pour le programme d'usinage de futures pièces mécaniques.
- (3) La troisième étape permet la réutilisation des connaissances capitalisées qui ont été stockées dans le MPM qui se pose en tant que base de connaissance de façon à fournir les bonnes pratiques au programmeur FAO pour la programmation d'usinage.

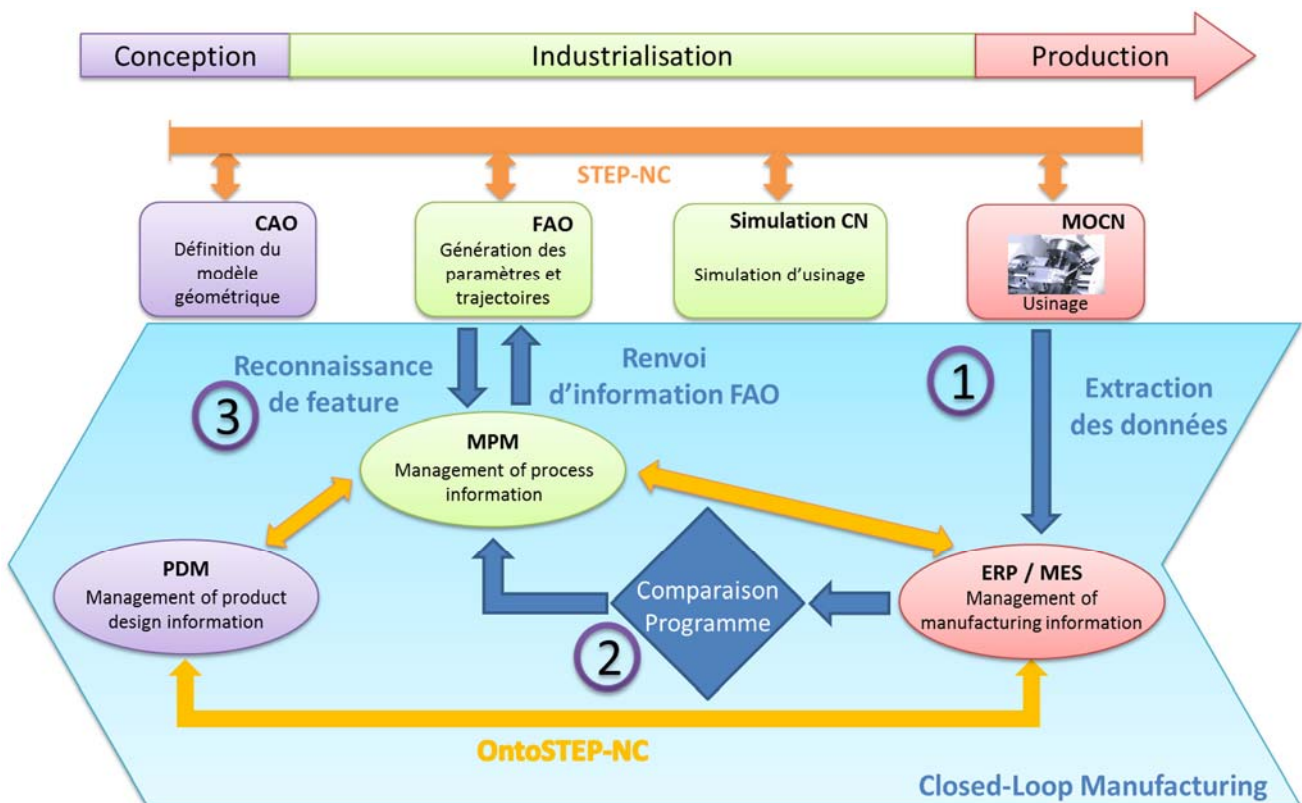


Figure 20 : Closed-Loop Manufacturing

3.2.1 CLM : Système à base de connaissances pour l'usinage

3.2.1.1 Extraction des données d'usinage

3.2.1.1.1 Optimisation du programme de la FAO à la MOCN

Le programme d'usinage prend naissance au niveau du logiciel de FAO en s'appuyant sur le modèle géométrique généré par la CAO. A la suite de l'élaboration du programme, une phase de simulation d'usinage est effectuée de sorte à vérifier ce dernier avec l'environnement machine. Si des collisions ou des problèmes de tolérances sont détectés durant cette étape de simulation, certaines modifications sur les paramètres de coupe peuvent être opérées : vitesse d'avance, vitesse de broche, taux de recouvrement, tolérance de fabrication, etc. Le programme est alors simulé une nouvelle fois et le processus est répété si nécessaire jusqu'à l'obtention d'un programme qui ne présente plus de problèmes relatifs à la mise en œuvre du processus. Le programme est ensuite envoyé vers la production pour la fabrication de pièces usinées.

Une fois le programme en production, celui-ci doit être validé pour assurer l'obtention d'une première pièce bonne. En cas de nécessité, le programme peut être modifié au pied machine pour réaliser des optimisations des parcours d'outils et des macros d'approches/retraits en fonction des capacités machines. Ces modifications mineures amènent encore une fois le programme à évoluer. C'est pourquoi la référence qui sera considérée pour l'ensemble de CLM correspondra au programme ayant permis d'obtenir la dernière pièce bonne en production. Ce programme correspond en effet à la référence d'usinage optimisée à la fois au niveau de la simulation mais aussi en fabrication sur machine physique. Les derniers programmes joués sont donc considérés comme référence et l'hypothèse est ici faite que les variations des conditions de coupes liées aux outils coupants seront compensées par les jauges outils, les préfs et dec machines.

3.2.1.1.2 Extraction du STEP-NC

De façon à créer une boucle entre les phases de production et d'industrialisation, il est nécessaire d'avoir une extraction des données issues de la fabrication et plus précisément des MOCN. En se basant sur le programme d'usinage STEP-NC validé et ayant permis d'obtenir la dernière pièce conforme aux exigences de production, nous procédons à l'extraction des

paramètres de coupe et des données machine : les vitesses d'avance, les vitesses de broche, les outils coupants, les avances par dent, les macros d'approches, les macros de retrait, les taux de recouvrement, les taux d'engagement, les parcours outils. Si le même travail peut être effectué sur un programme en Code-G, l'extraction sur un programme STEP-NC s'avère plus aisée puisque cette norme offre une structure orientée entité comme présentée en Figure 21.



Figure 21 : Ensemble des manufacturing feature 2.5D du standard STEP-NC (Dipper et al., 2011)

L'extraction des données issues du programme STEP-NC est alors convertie au niveau d'OntoSTEP-NC et interprétée dans CLM comme le support d'information de fabrication pour l'interopérabilité entre la chaîne numérique des applications métiers et les systèmes d'information. Cette extraction vise à mettre en relation les paramètres d'usinage et les entités pour archivage dans un premier temps au niveau de l'ERP pour permettre une traçabilité des programmes d'usinage répartis par moyen de production et, dans un deuxième

temps, assurer la capitalisation en vue d'une réutilisation future des paramètres et données d'usinage comme référence. La section suivante détaille le processus de capitalisation des données issues de la production au niveau de la phase d'industrialisation pour réutilisation en tant que bonnes pratiques d'entreprise.

3.2.1.2 Processus de vérification et mise en base

3.2.1.2.1 Stratégie de validation des bonnes pratiques

En repartant de la possibilité de modifier un programme d'usinage généré par la FAO, il peut être observé des différences entre le programme extrait et celui issu de la FAO. C'est pourquoi avant de valider les données issues de la production comme bonnes pratiques qui deviendront les standards de l'entreprise, il est nécessaire d'observer une phase de vérifications des modifications qui ont pu être réalisées lors de la phase de simulation d'usinage ou directement au pied machine. Pour cela, une comparaison des paramètres d'usinage associés aux entités et qui ont été programmés au niveau de la FAO avec ceux qui ont été effectivement joués au niveau de la MOCN est effectuée. Cette comparaison est menée par le programmeur FAO qui a réalisé la programmation au niveau du logiciel de FAO. Deux scénarii s'offrent alors à lui :

- La comparaison ne révèle pas de différence entre les paramètres de coupe issus de la FAO et ceux issus du programme d'usinage qui a été joué sur la MOCN. Dans ce cas, les paramètres de coupes peuvent être intégrés comme des bonnes pratiques et peuvent directement être capitalisés dans la base de données pour servir de standard d'entreprise pour la programmation de futures pièces usinées.
- La comparaison révèle une ou des différence(s) au niveau des paramètres de coupe entre les entités d'usinage issues du programme FAO et celles de la MOCN. Dans ce cas, le programmeur FAO doit investiguer afin d'identifier les raisons des modifications et ainsi pouvoir décider s'il s'agit de bonnes pratiques ou non. Dans le cas où les modifications sont considérées comme des bonnes pratiques, le programme peut être intégré comme un standard d'entreprise et peut être stocké dans la base de connaissances.

3.2.1.2.2 Le rôle central du MPM pour la capitalisation

L'acteur en charge de l'étape de validation étant le programmeur FAO, la plateforme MPM fournit un support pour la vérification et la validation des données. En effet, dans le processus CLM, le MPM possède donc un rôle clé. Le programme d'usinage créé en FAO est directement archivé au niveau du MPM avec le statut "In-Process". Cette montée du programme en base est de nouveau supportée par OntoSTEP-NC qui, au travers de sa structure et des raisonneurs logiques, permet d'extraire les entités d'usinage. La comparaison se fait entre les paramètres associés aux entités d'usinage présentes en base avec le statut "In-Process" et les paramètres associés aux entités d'usinage du programme issues de la MOCN. Si les paramètres sont cohérents alors le statut "In-Process" évolue en statut "Release". Les informations deviennent alors des références pour l'utilisation des paramètres pour la programmation de futures pièces et le processus d'intégration dans la base de connaissances peut être effectué. L'intégration dans la base de connaissances repose sur un processus automatique d'analyses de la présence d'un nouveau cas ou d'un cas déjà traité et capitalisé.

En cas de modification au pied-machine sur une entité qui possède déjà le statut "Release" c'est-à-dire qui a déjà été validée comme bonne pratique pour l'entreprise, le process de capitalisation est différent. En effet, si le feature possède le statut "Release" cela signifie qu'il a été utilisé comme référence pour la programmation d'usinage et que des modifications ont été apportées sur ce qui a été capitalisé en base comme des bonnes pratiques. Dans ce cas précis, le programmeur FAO a la responsabilité de générer un groupe de travail en lien avec la production pour déterminer si les bonnes pratiques déjà capitalisées doivent évoluer ou rester identiques. En cas d'évolution des bonnes pratiques, l'entité d'usinage qui avait jusqu'alors le statut "Release" sera transformée en statut "Obsolete" et la nouvelle entité aura alors le statut "Release" et pourra donc servir comme bonne pratique. Ce processus d'évolution de bonnes pratiques permet d'éviter des doublons pour référencer l'utilisation d'entités.

L'utilisation du MPM dans un rôle central comme proposé au niveau de CLM implique de proposer une structure orientée entité pour le système MPM. Une architecture orientée

entité (comme OntoSTEP-NC) permet ainsi de gérer des informations à un niveau de granularité suffisamment fin pour couvrir les besoins de la programmation FAO et des MOCN en vue de la réutilisation des connaissances d'usinage. Cette structure mise en regard de la problématique soulevée au niveau de notre état de l'art est ainsi déployée. La section suivante étudie la réutilisation des connaissances capitalisées en s'appuyant sur le système MPM.

3.2.1.3 Réutilisation des connaissances capitalisées.

3.2.1.3.1 Stratégie générale de réutilisation des connaissances

Pour fermer la boucle entre la production et l'industrialisation, la réutilisation des connaissances d'usinage capitalisées doit être pertinente et doit s'effectuer au bon moment. L'intégration de ces connaissances se fait sous forme d'aide au programmeur FAO pour l'assister dans ses choix. Ainsi, l'aide se présente sous forme d'une ou plusieurs solution(s) accompagnée(s) des paramètres valués pour chaque hypothèse de sorte que le programmeur FAO puisse valider directement et importer les paramètres au niveau de son logiciel FAO. Ainsi, si ce programmeur est en train de définir une entité "trou" qui présente les mêmes caractéristiques en termes de diamètre et de géométrie qu'une entité déjà capitalisée dans la base, il pourra se servir des informations de la base de connaissances (vitesse de broche, vitesse d'avance,...) pour programmer cette entité. La Figure 22 présente le diagramme séquence d'intégration des connaissances d'usinage au niveau de la programmation FAO.

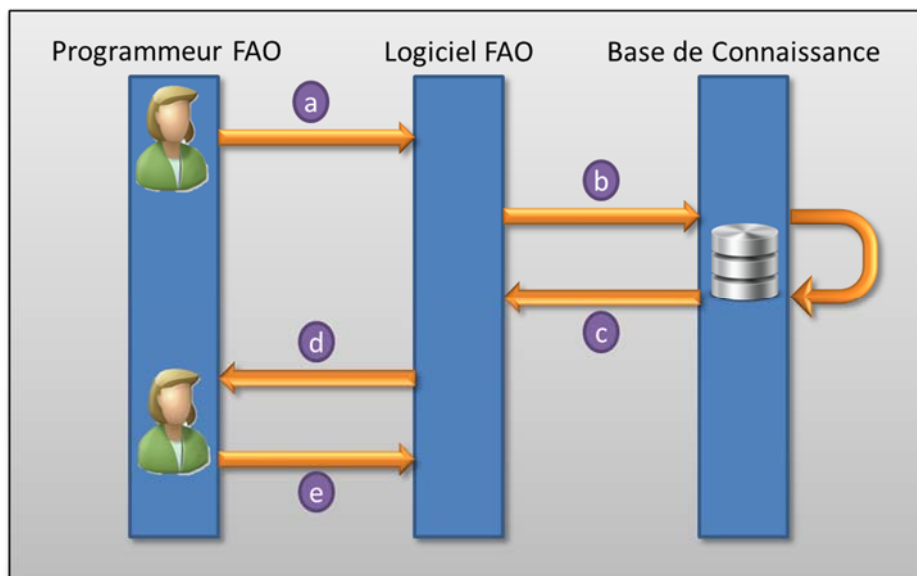


Figure 22 : Diagramme séquence d'intégration des connaissances d'usinage capitalisées

Le processus se compose de cinq phases distinctes pour l'intégration des informations capitalisées :

- La séquence (a) propose au programmeur d'initier le programme d'usinage en introduisant toutes les références liées à la programmation : brut, pièce à réaliser, choix de la machine, etc. Il est également demandé à l'expert FAO d'initier la séquence de programmation d'une entité en sélectionnant l'entité à réaliser et la fonction souhaitée. Il peut également s'il le souhaite spécifier l'outil coupant à utiliser pour assurer l'entité d'usinage.
- La séquence (b) consiste à interroger la base de connaissances pour la recherche d'un cas similaire dans la plateforme MPM de façon automatique directement depuis le logiciel FAO qui exploite les paramètres pré-intégrés par le programmeur FAO dans la séquence (a).
- La séquence (c) renvoie les informations depuis la base de connaissances vers le logiciel de FAO en proposant une solution ou une liste de solutions qui correspondent aux spécificités de l'entité d'usinage à réaliser.
- La séquence (d) demande au programmeur FAO s'il souhaite sélectionner une solution parmi la ou les réponses fournie(s) par l'interface au niveau du logiciel FAO. Il a ainsi la possibilité d'importer ces paramètres pour la programmation de la nouvelle séquence d'usinage.
- La séquence (e) consiste en la validation ou non de l'importation des paramètres d'usinage. Si les paramètres sont importés, alors l'expert FAO pourra répéter les séquences (a; b; c et d) jusqu'à couvrir toutes les entités d'usinage. S'il décide de ne pas importer les paramètres, il reprend alors le contrôle pour une programmation manuelle.

3.2.1.3.2 Reconnaissance de l'entité d'usinage

La requête depuis le logiciel de FAO vers la base de connaissance s'effectue en partie en utilisant les informations fournies par le programmeur FAO mais exploite également les informations propres aux entités d'usinage. En effet, au niveau de l'interrogation de la base de connaissances nous possédons différents critères de sélection classés par ordre d'importance dans la requête :

- Les matériaux du brut matière (Acier, Aluminium, Titane...)

- Le type de machine-outil
- Les propriétés de l'entité d'usinage considérant tout d'abord son type (trou, poche, etc.) et ensuite ses dimensions (longueur, largeur, diamètre, etc.)
- Les outils coupants

En effet, de façon à avoir la meilleure réponse possible en termes de pertinence, il apparaît essentiel que les caractéristiques géométriques soient bien identifiées. Ainsi, les réponses permettront d'avoir des réponses exactes pour une entité d'usinage ou, le cas échéant, avoir une solution la plus proche. Cette reconnaissance d'entité s'effectue directement à partir des informations géométriques contenues dans le modèle CAO sur lequel repose le programme FAO. Cette reconnaissance est complétée par l'initialisation réalisée par l'expert FAO. Ces informations sur les "machining feature" permettent de générer directement une requête au niveau du système MPM pour la recherche d'entités similaires. La structure orientée entités permet non-seulement une extraction sur les entités mais assure également une intégration simplifiée des données au travers des manufacturing features. Similairement à la stratégie mise en place au niveau du Case Base Reasoning, la reconnaissance par l'entité permet de renvoyer des solutions pertinentes à l'expert FAO pour la programmation des séquences d'usinage ou le cas échéant les solutions les plus approchantes.

Le processus de réponse propose deux évolutions possibles qui dépendent directement de la présence ou non de manufacturing feature similaire dans la base de connaissances:

- Au moins un manufacturing feature identique existe dans la base de connaissance, dans ce cas la réponse s'effectuera sous forme d'une réponse 100% conforme ou sous forme de liste de solutions si plusieurs solutions existent. Cette configuration permettra au programmeur FAO de valider une solution dans la liste ou de continuer manuellement la programmation.
- Il n'existe pas de solutions identiques au niveau des dimensions géométriques, dans ce cas une nouvelle requête est générée en interrogeant la base sur toutes les entités d'usinage de même type et en ne tenant pas compte des dimensions géométriques. Cela permettra de fournir une réponse au programmeur FAO qui pourra choisir de valider une solution approchante qu'il pourra toujours adapter après importation des paramètres ou réutiliser sans modification après vérification de la cohérence des séquences d'usinage.

Le processus CLM s'appuie sur trois étapes pour offrir une boucle fermée permettant le retour d'informations de la production vers la phase d'industrialisation : extraction des données, capitalisation et validation des informations d'usinage et enfin réutilisation des connaissances métiers.

3.2.2 Mise en œuvre de CLM

3.2.2.1 La mise en base de connaissances

En reprenant le cas d'illustration de la Figure 16, nous trouvons deux entités d'usinage distinctes en 2D½ : une poche de type poche fermée et un trou de type débouchant.

Nous proposons, ici, de nous intéresser à la mise en base des informations contenues dans le programme STEP-NC de la Figure 17 qui est directement extrait de la MOCN. Les informations géométriques issues du programme STEP-NC sont résumées dans le Tableau 7 et détaillées par entité d'usinage. Ainsi pour l'entité Trou rond nommé "RoundHole1", nous obtenons toutes les informations géométriques nécessaires à la description du trou : son orientation selon l'axe Z, la position du centre du trou, son diamètre de 20mm, et sa profondeur, comme il s'agit d'un trou débouchant sur une fin de surface à 50mm. De même, nous caractérisons l'entité Poche fermée de type rectangulaire nommée "Pocket 2" avec des dimensions de 80mm par 50mm possédant une profondeur de 30mm avec un fond plat et un rayon orthogonal de 10mm. L'ensemble de ces paramètres permet alors de spécifier les entités d'usinage et d'initialiser la base de connaissances avec l'ensemble des informations contenues dans le programme STEP-NC.

Tableau 7 : Données extraites du programme STEP-NC

Nom Feature	Type Feature	Paramètres Géométriques	Valeurs
RoundHole 1	Trou rond	axis	(0, 0, 1.)
		axis position	(20., 60., 25.)
		diameter	20.
		depth	50.
		bottom condition	Thru
Pocket 2	Poche fermée	axis	(0, 0, 1.)
		profile centroid	(70., 70., 50.)
		profile shape	rectangle

length	80.
width	50.
orthogonal_radius	10.
maximum depth	30.
bottom condition	Planar

3.2.2.2 Réutilisation des paramètres d'usinage en base de connaissance

Lorsque les informations du programme STEP-NC ont été intégrées dans la base de connaissances, elles sont disponibles pour réutilisation au niveau du logiciel de FAO en tant que bonnes pratiques. Ainsi, en interrogeant la base de connaissances sur les paramètres d'usinage de la poche fermée avec les critères suivants, nous obtenons les résultats présentés dans le Tableau 8:

- Entité : Poche fermée
- Type : Rectangulaire
- Dimensions : 80mm*50mm
- Profondeur : 30mm

Tableau 8 : Paramètres d'usinage présents dans la base de connaissance

Nom Feature	Type Feature	Paramètres d'usinage	Valeurs
Pocket 2	Poche fermée	Spindle	3978.45 turn_mm
		Feedrate	795.77mm_mn
		Overhang ratio	0.5
		Radial depth of cut	0.01
		Strategy	External Spiral

Ces paramètres sont ensuite intégrés au niveau du module de FAO pour la programmation d'usinage et l'opération pourra être répétée jusqu'à ce que toutes les entités d'usinage, relatives à la réalisation de la pièce, aient été couvertes. Le programme pourra ensuite être joué sur la MOCN, après une étape de simulation d'usinage pour s'assurer qu'il n'y ait pas de collision.

3.2.3 Apport et cadre d'utilisation de CLM

Dans cette section est exposée une solution proposant une boucle fermée qui permet d'assurer le retour d'informations de la production vers la phase d'industrialisation. La

principale limite rencontrée pour la création de la boucle fermée repose sur la difficulté de conserver le niveau de granularité satisfaisant pour couvrir toutes les étapes de la chaîne numérique, essentiellement entre FAO et MOCN. En s'appuyant sur le modèle OntoSTEP-NC, le processus de Closed-Loop Manufacturing s'appuie sur trois étapes pour permettre la réutilisation de connaissances : l'extraction des données du programme de la MOCN, la vérification et la capitalisation des connaissances dans le MPM et la réutilisation des connaissances métiers au niveau de la FAO.

Pour permettre de conserver le bon niveau de granularité des informations et en regard des limites qui avaient été identifiées par l'analyse des systèmes de gestion des connaissances, une nouvelle structure orientée entité a été proposée pour le système MPM. En effet, en positionnant le MPM dans un rôle fédérateur, ce système constitue la base de connaissances et devient le média du retour d'information. Cette nouvelle architecture orientée sur les entités d'usinage à l'instar de STEP-NC permet de couvrir les besoins de production et de mettre en relations les entités d'usinage et les paramètres de coupe pour faciliter l'élaboration des programmes MOCN. Cette structure proposée au niveau du processus CLM permet également d'offrir une uniformisation du flux d'information au niveau de la chaîne numérique et de contribuer ainsi à la création de standard de connaissances et de bonnes pratiques pour l'entreprise étendue.

De plus, avec sa fonction de gestion des révisions et versions, le système MPM fournit une structure idéale pour la gestion des standards et des bonnes pratiques capitalisées en vue d'une réutilisation des connaissances au niveau de la programmation. La gestion du versionnement facilite également la gestion des évolutions du programme d'usinage entre la FAO et la MOCN avec des changements qui peuvent intervenir au pied machine.

En plus de répondre au second besoin concernant l'intégration des connaissances au niveau de la phase d'industrialisation, le processus CLM permet d'adresser le troisième verrou industriel concernant la capitalisation des savoir-faire et ce, même au travers de l'entreprise étendue. Avec la proposition d'uniformisation des structures orientées sur les entités d'usinage et grâce à la gestion des versions, tous les savoir-faire peuvent être capitalisés et réutilisés en tant que standards et bonnes pratiques d'entreprise étendue pour les cas de futurs usinages de pièces mécaniques.

3.3 Discussion des propositions

L'analyse de l'état de l'art et les limites identifiées avaient permis de caractériser deux verrous scientifiques :

- "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation?"
- "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation?"

La proposition de créer OntoSTEP-NC, une ontologie modélisée à partir du standard STEP-NC permet au travers des choix techniques effectués d'offrir une structure équivalente à celle définie dans la norme STEP-NC. De plus, la structure OWL permet d'embarquer des descripteurs logiques qui facilitent les requêtes dans le modèle OntoSTEP-NC de façon à exploiter les données plus efficacement. Notre proposition de modèle permet ainsi de lever le premier verrou scientifique.

De même, le processus Closed-Loop Manufacturing facilite la création d'une boucle entre les phases de production et d'industrialisation pour assurer l'extraction de données depuis la MOCN et les intégrer au niveau de la FAO sous forme de standards et de bonnes pratiques d'entreprise. En s'appuyant sur le modèle OntoSTEP-NC comme vecteur d'interopérabilité entre les différentes chaînes numériques et en positionnant le MPM dans un rôle fédérateur, le processus CLM contribue également à la réutilisation des connaissances capitalisées depuis la production vers la phase d'industrialisation.

La réponse aux deux questions au travers des propositions OntoSTEP-NC et Closed-Loop Manufacturing permet ainsi d'adresser la problématique que nous avons définie dans le chapitre 1 : "Comment assurer l'interopérabilité dans la chaîne numérique d'industrialisation pour atteindre une conception-fabrication intégrée ?".

Dans un premier temps, le standard STEP-NC nous permettait de répondre à la contrainte de continuité de la chaîne numérique d'industrialisation en offrant un échange bidirectionnel dans les phases de conception, d'industrialisation et de fabrication.

La proposition OntoSTEP-NC par sa structure en OWL et le choix d'utiliser Protégé comme modeleur permettent d'assurer l'interopérabilité des deux chaînes numériques : celle des

applications métiers basées sur la norme STEP-NC et celle des systèmes d'information au travers d'OntoSTEP-NC comme support pour l'échange.

Enfin, le processus CLM, au travers de sa capacité à capitaliser les connaissances issues de la production et à structurer les données avec une architecture orientée entité, favorise la réutilisation des informations pour assurer l'obtention d'une pièce bonne du premier coup et de réduire les temps d'industrialisation.

Bien que nos propositions OntoSTEP-NC et CLM offrent de nombreux avantages par leur flexibilité et leur capacité à favoriser l'interopérabilité pour les données de production au niveau des chaînes numériques des applications métiers et des systèmes d'information, elles présentent deux limites majeures.

En effet, ces propositions reposent sur l'utilisation de STEP-NC qui apparaît ici comme une solution prometteuse pour assurer l'échange de données dans la chaîne numérique des applications métiers en supportant à la fois les intentions de conception et les informations de fabrication. Cependant, même si la norme STEP-NC assure les échanges entre les systèmes XAO, elle n'est pas encore implémentée dans les industries manufacturières. En effet, l'implémentation de STEP-NC est conditionnée par la capacité des MOCN à lire et interpréter le format STEP-NC. Cela a pour conséquence de compliquer l'extraction des connaissances de production et impose de trouver des détours pour mettre en place la structure CLM dans la chaîne numérique actuelle.

De même, la structure orientée entité proposée au niveau du processus CLM affiche également certaines limites. En effet, la structure MPM telle qu'implémentée aujourd'hui ne propose pas une structure orientée entité. Même si le système MPM permet aujourd'hui la gestion des données de fabrication issues de l'atelier et des types de machines, il ne donne pas satisfaction pour les paramètres d'usinage et les caractéristiques machines spécifiques. De par leurs manques de granularité dans la gestion d'information, les systèmes MPM sont orientés processus alors que CLM requiert une structure orientée entités. Une solution pour lever cette barrière dans l'implémentation actuelle des chaînes numériques réside dans la transformation d'OntoSTEP-NC en tant que base de connaissances qui assurerait à la fois l'extraction de données de production au niveau de la MOCN et les requêtes pour l'intégration des connaissances métiers au niveau de la FAO.

Implémentation et application

Ce quatrième chapitre propose une application en se basant sur un démonstrateur qui s'approche de la chaîne numérique d'industrialisation implémentée chez un grand groupe de l'industrie aéronautique. De plus, un cas d'étude permettant de valider les chaînes numériques de l'industrie aéronautique nous permettra de tester et valider les propositions OntoSTEP-NC et Closed-Loop Manufacturing.

Pour tester l'intégralité des fonctionnalités intervenant dans Closed-Loop Manufacturing et la complétude d'OntoSTEP-NC, nous nous appuierons sur trois scénarii qui valideront la mise en œuvre des propositions en testant les fonctionnalités de Closed-Loop Manufacturing dans différentes configurations.

4.1 Démonstrateur

4.1.1 Architecture globale

Rappelons que le standard STEP-NC fait l'objet de nombreux travaux de recherche pour l'échange de données dans la chaîne numérique des applications métiers. Cependant, bien que certains adressent l'utilisation de STEP-NC comme solution prometteuse pour les échanges de données, il n'est pas encore implémenté au niveau industriel. En effet, les parcs machines des industriels manufacturiers n'acceptent qu'une programmation en Code-G ISO 6983. C'est pourquoi pour mettre en œuvre nos propositions présentées au chapitre précédent et dues aux limitations technologiques, certains choix ont été effectués comme décrit en Figure 23.

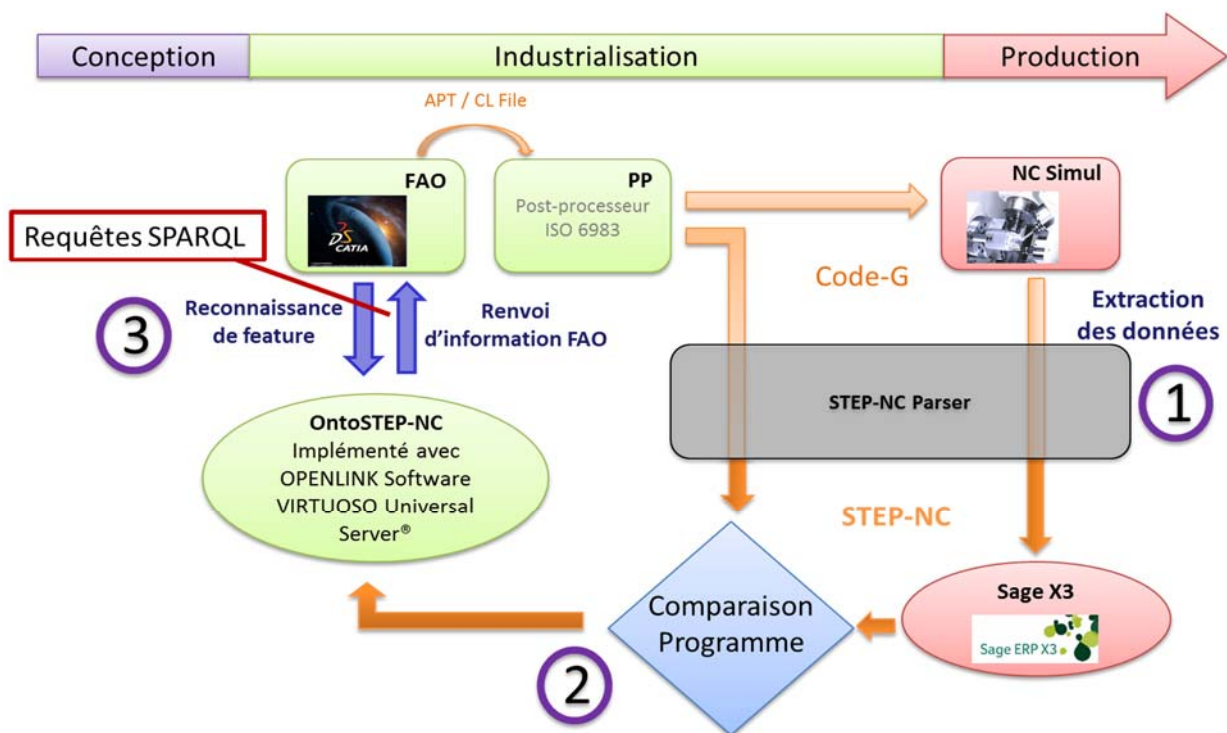


Figure 23: Démonstrateur CLM et OntoSTEP-NC

En se basant sur la chaîne numérique (proche de la configuration industrielle d'un grand groupe de l'industrie aéronautique) actuellement composée de la FAO et du Post-Processeur dans la phase d'industrialisation, les choix suivants ont été effectués:

- Le logiciel CATIA V5-6 R2013 développé par Dassault Systèmes est utilisé pour réaliser la FAO et le programme d'usinage du cas d'étude. Cette solution a été retenue pour sa capacité à offrir de nombreuses interfaces et des possibilités de connexion avec des systèmes externes.

- La MOCN sera, dans le cadre du simulateur remplacé par le logiciel NC Simul Machine 9 développé par Spring Technologies. Il s'agit de considérer les résultats de simulation d'usinage obtenus, auprès du logiciel NC Simul, comme résultat de l'usinage sur une MOCN. Ce choix permet ainsi d'offrir une plus grande flexibilité pour le passage de cas sur le démonstrateur, aussitôt que la modélisation d'une machine est disponible au niveau de la bibliothèque du logiciel. En effet, les propositions peuvent ainsi être testées sur différentes pièces, sans nécessiter la disponibilité de nombreuses machines différentes.
- Dans la configuration actuelle de la chaîne numérique, comme les technologies ne sont pas prêtes à accueillir le format STEP-NC, le démonstrateur se base sur une chaîne en code-G. Afin de pouvoir mettre en place la proposition CLM, un parseur STEP-NC est mis en place, au niveau de l'extraction des données machines, avant la capitalisation. Le même processus sera effectué au niveau du programme, issu de la FAO, pour permettre la mise en œuvre de l'étape de comparaison.
- L'archivage du programme de coupe sera proposé au niveau de l'ERP au travers de la plateforme SAGE X3 sous forme STEP-NC. L'extraction est faite manuellement et permettra d'entrer directement dans l'étape de comparaison et validation.
- Pour réaliser la validation des programmes et la vérification de modifications post FAO, un comparateur de texte/syntaxe est utilisé de façon à mettre en relief les changements qui ont pu être apportés au programme d'usinage. En effet, la structure STEP-NC qui permet de raisonner sur les entités conservera la même syntaxe et, seules les valeurs accrochées seront modifiées, contrairement au Code-G qui entraînerait la modification de la structure du programme.
- Le dernier choix effectué concerne la mise en place de la base de connaissances. Comme la structure MPM ne propose pas un modèle orienté entités, pour les besoins du démonstrateur, il sera proposé une implémentation d'OntoSTEP-NC comme base de connaissances. Cette implémentation sera réalisée au travers de la plateforme OPENLINK Software VIRTUOSO Universal Server® ("Virtuoso universal server®").

L'ensemble des choix technologiques, qui ont été exposés ici, permettent de mettre en œuvre la proposition CLM et s'appuie sur une solution qui implémente OntoSTEP-NC en tant que base de connaissances complétant ainsi sa fonctionnalité de support des échanges entre

les systèmes d'information. La section suivante propose de détailler les choix technologiques pour le démonstrateur.

4.1.2 Implémentation dans les logiciels métiers et les systèmes d'information.

Cette section détaille les interfaces et les choix techniques mis en place au niveau du démonstrateur et propose de suivre le processus défini par Closed-Loop Manufacturing dans l'ordre suivant:

- La programmation CATIA
- Le parseur STEP-NC
- L'archivage SAGE
- La comparaison de programmes
- L'implémentation d'OntoSTEP-NC en base de connaissances.

4.1.2.1 CATIA

Pour les besoins du démonstrateur, il a été choisi d'intégrer le processus CLM au logiciel FAO CATIA V5-6_R2013. En effet, la requête de la recherche des entités similaires peut être générée directement depuis le logiciel CATIA. Cette requête s'appuie sur l'initialisation réalisée par le programmeur FAO en parcourant l'arbre de fabrication et, plus précisément, sur les entités d'usinage qui apparaissent au niveau du programme de fabrication comme illustré sur la Figure 24.

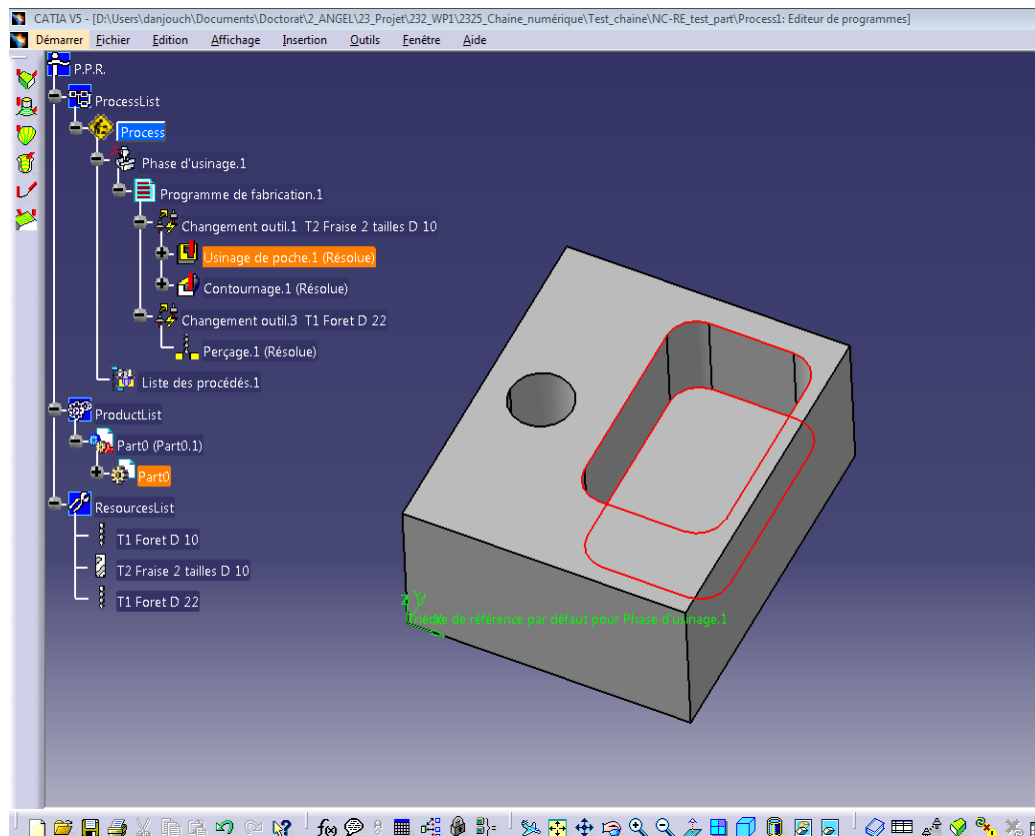


Figure 24 : Interfaces d'intégration du démonstrateur dans CATIA

L'intégration se fait, au niveau de l'interface CATIA, au travers du lancement d'une macro VBA, qui vient parcourir l'arbre de fabrication et, qui permet de générer la requête en SPARQL, pour interroger la base de connaissances, en s'appuyant sur les paramètres et caractéristiques des entités d'usinage détectées. Ainsi, en fonction des entités, la requête est directement générée sur les caractéristiques géométriques (poche, trou, rainure...) et les dimensions géométriques (diamètre, longueur, largeur, profondeur...).

4.1.2.2 Transformation de G-Code en STEP-NC

La proposition de CLM se basant sur STEP-NC et, celui-ci n'étant pas implémentable sur la chaîne numérique des applications métier actuelles, il est proposé de repartir d'une chaîne en Code-G, qui sera complétée par une transformation du Code-G en STEP-NC, pour implémenter CLM au niveau des systèmes d'information. Pour la traduction du programme du Code-G dans le format STEP-NC, nous nous appuyons sur un parseur de STEP-NC, qui permet de récupérer les informations au niveau du Code-G, pour les interpréter et ainsi les traduire en STEP-NC.

L'outil proposé dans le cadre du démonstrateur a été développé dans le cadre du projet ANGEL (Xu et al., 2014) et repose sur la méthodologie suivante:

- Contrairement au programme STEP-NC, le Code-G est pauvre en informations et traite le programme comme un parcours outils. La première étape consiste donc à enrichir explicitement les données. Il faut alors identifier et caractériser les changements d'outils, les changements de vitesse et les zones machine. Cela permet de retrouver des informations sur les opérations d'usinage et le type de contrôleur de MOCN.
- La seconde étape consiste, au travers de l'interpréteur développé, à séparer par bloc d'opérations le programme d'usinage en analysant les changements de commandes comme "G0" pour les mouvements rapides ou encore les commandes consécutives comme "G1" ou "G2/G3" pour identifier les séquences d'usinage machine. La Figure 25 illustre le découpage du programme en Code-G en fonction des commandes G0, G1 et G2 : chaque apparition des commandes entraîne un commentaire, entre parenthèses, explicitant le découpage entre changement d'opération et changement de profondeur de passes.
- La troisième étape consiste à reconstituer les entités d'usinage en se basant sur les étapes du parcours outils définis dans la liste des blocs précédemment obtenus. L'analyse permet de reconstruire les entités d'usinage, en dissociant les différentes passes notamment d'usinage et, en dissociant les phases d'ébauches et les phases de finition.
- La dernière étape concerne la redéfinition du programme au travers des manufacturing features, exprimés en 2D½, en cohérence avec les entités définies par la norme STEP-NC. Il faut alors s'appuyer sur les types d'outils pour définir les features. Ainsi, une fraise à surfacer ou un foret permettront de définir des surfaces planes et des trous. En revanche pour les fraises 2 tailles, l'analyse des valeurs suivant les axes x, y et z permet de repérer des variations et donc les différentes passes de façon à définir les différents features en 2D½.

G54 G90 G21 G40 G49 M5 M9 T1 M6 (Use an endmill, diameter 18mm) G43 H1 (Length compensation by 50mm) M8 S720 M3 G0 X91.9 Y-13.5 Z100. (To finish top face of rawpiece in 2 layers) Z15. G1 Z2.5 F240. (1st layer, depth 2.5mm) Y133.5 X74.8 Y-13.5 X57.7 Y133.5 X40.6 Y-13.5 X23.5 Y133.5 X6.4 Y-13.5 G0 Z15. X91.9 G1 Z0. (2nd layer, depth 2.5mm) Y133.5 X74.8 Y-13.5 X57.7 Y133.5 X40.6 Y-13.5 X23.5 Y133.5 X6.4 Y-13.5 (To drill and ream a thru hole) G0 Z15. G49 M9 M5 T2 M6 (Use a spiral drill, diameter 20mm) G43 H2 (Length compensation by 70mm) M8 M3 F900. S720 G0 Z30. G90 G99 G81 X20. Y60. Z-18. R10. G99 G81 X20. Y60. Z-36. R10. F1800. G99 G81 X20. Y60. Z-60. R10. F1350. G1 Z10. F1800. G80 G49 M5 M9 (end of drilling cycle) T3 M6 (Use a reamer, diameter 22mm) G43 H3 (Length compensation by 50mm) M8 M3 S1080 G90 G99 G85 X20. Y60. Z-60. R10. G80 G49 M5 M9 (End of reaming cycle) (To cut a pocket, rough & finish) T1 M6 (Use an endmill, diameter 18mm) G43 H1 (Length compensation by 50mm) M8 S1200 M3 F2400. G0 Z30. X64.754 Y50.069 Z15.	(To rough pocket in 5 layers, 5.9/layer) (First 2 blocks: to run helical approach) G2 X77.2 Y55. Z-5.9 I5.246 J4.932 G2 X70. Y55. I-3.60 J0. G1 Y90. X75. Y50. X65. Y90. X70. Y95. X80. Y45. X60. Y95. X70. Y100. X85. Y40. X55. Y100. X70. Z0. G0 X69.532 Y47.815 (End of 1st layer) (Code of next 4 layers omitted) (To finish pocket in 6 layers. 5mm/layer) (Bottom allowance 0.5, side allowance 1) G0 Z30. X74.890 Y60.285 Z15. (First 2 blocks: to run helical approach) G2 X77.2 Y55. Z-2. I-4.891 J-5.285 G2 X70. Y55. I-3.60 J0. G1 Y93. X78. Y47. X62. Y93. X70. Y101. X85. G2 X86. Y100. I0. J-1. G1 Y40. G2 X85. Y39. I-1. J0. G1 X55. G2 X54. Y40. I0. J1. G1 Y100. G2 X55. Y101. I1. J0. G1 X70. Z0. (End of 1st layer)(Code of rest of layers omitted) G2 X55. Y101. I1. J0. (now Z-30.00) G1 X70. Z15. (End of finishing) M30
--	--

Figure 25 : Exemple du programme en Code-G en fonction des "G0; G1; G2;G3" (Xu et al., 2014)

L'ensemble des étapes présentées ci-dessus permet ainsi de transformer un programme, initialement en Code-G, en un programme d'usinage sous STEP-NC. Cependant, malgré la traduction automatique du programme, certaines vérifications sont nécessaires et, des informations doivent être ajoutées manuellement pour obtenir un programme STEP-NC complet.

4.1.2.3 Sage X3

Pour assurer la capitalisation de l'information, pour les besoins du démonstrateur, il est proposé d'utiliser la plateforme Sage X3 comme ERP. Dans ce cadre, nous devons d'abord définir des gammes dans l'ERP qui intègrent et archivent les programmes d'usinages extraits de la machine-outil. L'interface Sage X3 permet de lier le programme de fabrication à une gamme et assure ainsi la mise en relation des programmes STEP-NC avec la gamme correspondante dans Sage X3, comme illustré sur la Figure 26.

Sélection

Production > Données techniques > Gammes > Gestion gammes

Graphique Cas d'emploi Multi niveaux

Gamme CT01

Alternative gamme 11 Feb MAG

Date de référence

Entête

Désignation entête CAS_ETUDE

Dates validité 12/03/15 11/03/16

Statut utilisation ☐ Elaboration ☒ Exploitation

Unité de temps ☒ Heures ☐ Minutes

Statut ☐ Validée

En-tête Gammes Jalonnement

Mode gestion OF

☐ Pas de modification

☐ Modification matières

☐ Modification opérations

☒ Modif matières et opérations

Critères lancement

Quantité mini UN

Quantité maxi UN

Dernier lancement

Date

Quantité UN

Documents

Plan NC_BZ33950Z01.stp

Image

Figure 26 : Implémentation dans Sage X3

Le programme ainsi stocké permet d'alimenter le comparateur de programme, qui validera les connaissances extraites de la machine-outil en tant que bonne pratique d'entreprise, et ainsi, fournira une aide au programmeur FAO pour la définition des séquences d'usinage de futures pièces.

4.1.2.4 Comparaison de programme

Pour la validation du programme d'usinage, qui aura été joué et extrait de la machine, nous proposons d'utiliser un comparateur syntaxique. En effet, en fournissant le programme,

initialement réalisé au niveau de la FAO, traduit au niveau du parseur STEP-NC et en le comparant au programme issu de la MOCN, également traduit au niveau du parseur, nous pouvons observer les modifications qui ont été réalisées. Dans le cadre de ce démonstrateur, il est proposé d'utiliser la fonctionnalité de comparaison de version de document de Microsoft® Word, qui permet ainsi de coller au plus proche d'une comparaison textuelle entité par entité au sein du programme comme illustré sur la Figure 27. La vérification porte sur une comparaison syntaxique et sur des valeurs inhérentes à chaque entité de façon indépendante. Ce mode de vérification permet alors de servir de base pour la validation, ou non, de bonnes pratiques, avant capitalisation dans la base de connaissances.

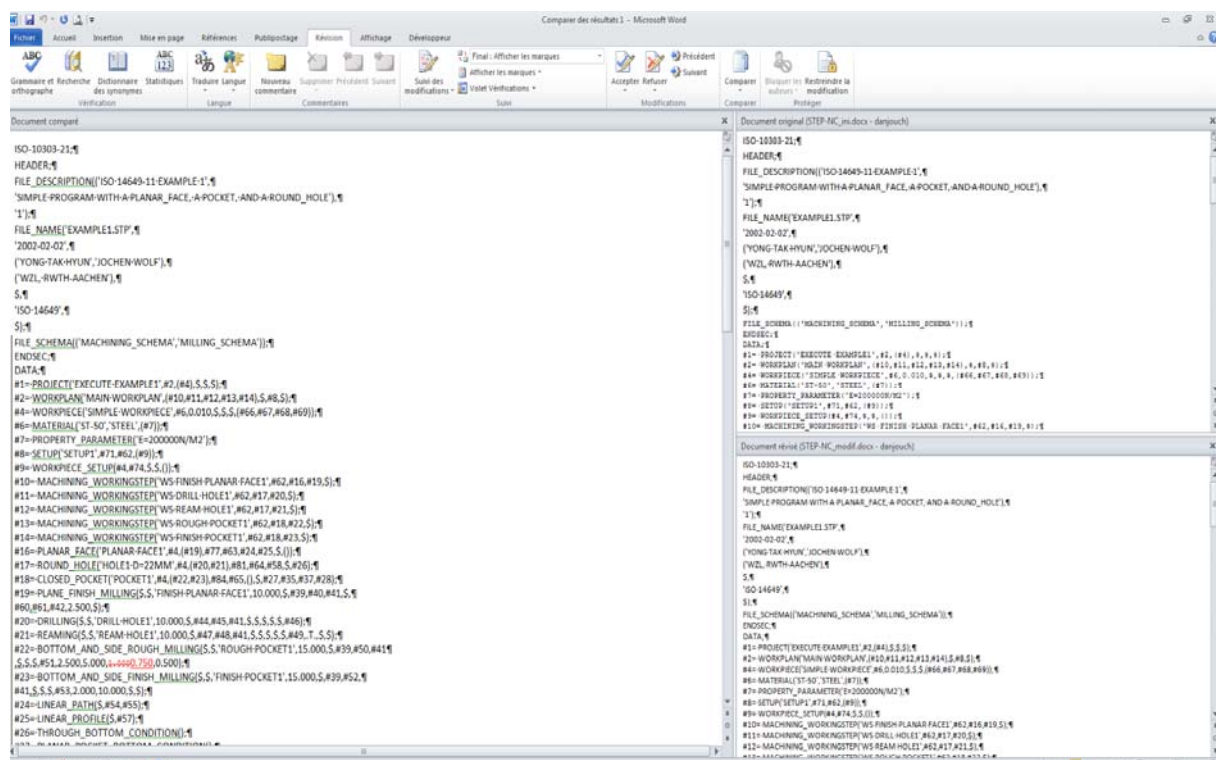


Figure 27 : Comparaison de programme STEP-NC

4.1.2.5 Implémentation d'OntoSTEP-NC

La solution MPM, de la proposition CLM, ne permet pas, actuellement, de gérer une granularité suffisante pour les données issues des MOCN. En effet, la structure des plateformes MPM n'offre pas de modèle de données orienté entités d'usinages. Pour faire face aux problèmes de capitalisation de connaissances, nous proposons d'instancier

OntoSTEP-NC pour créer une base de connaissances orientée entités d'usinage. Cette instantiation d'OntoSTEP-NC est effectuée au travers de la plateforme OPENLINK Software VIRTUOSO Universal Server® et se décompose en quatre étapes majeures.

La première étape concerne l'extraction des données depuis le programme STEP-NC et le remplissage d'OntoSTEP-NC. Ce remplissage permet de transformer un programme STEP-NC en OntoSTEP-NC et, ainsi, d'exploiter les données plus tard. Ici, on propose de définir et de remplir la base, manuellement, au travers du logiciel "Protégé". Cette définition, par individu au niveau de Protégé, permet l'export d'OntoSTEP-NC en fichier OWL/RDF contenant l'intégralité de la structure OntoSTEP-NC et, l'ensemble des individus qui alimentent la structure, avec les données issues du programme d'usinage. Bien que le remplissage soit, à terme, géré par requête automatique, cette initialisation manuelle est nécessaire afin de générer la structure du modèle individu et, ainsi, pouvoir en disposer en tant que base de connaissances.

La seconde étape s'intéresse à la séparation de la structure d'OntoSTEP-NC et des individus du programme STEP-NC. Nous définissons alors deux ontologies distinctes "tbox#" et "abox#": "tbox#" correspond au squelette d'OntoSTEP-NC qui devient le dépositaire de la logique et "abox#" correspond à la partie d'OntoSTEP-NC qui comporte les individus et qui devient le dépositaire de la connaissance extraite du programme de coupe. Cette séparation inclut la reprise des syntaxes d'entête de préfixe pour la fonctionnalité des deux modèles "abox#" et "tbox#". La Figure 28 présente une comparaison des structures des modèles "abox#" et "tbox#" en se basant sur le cas d'illustration des propositions (section 3.1.3). Ainsi, nous retrouvons les mêmes paramètres pour les préfixes et, seules les parties de déclaration varient d'un modèle à l'autre.

<pre> <Ontology xmlns="http://www.w3.org/2002/07/owl#" xml:base="http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC" xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#" xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace" ontologyIRI="http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC"> <Prefix name="" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" /> <Prefix name="owl" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" /> <Prefix name="rdfs" IRI="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#" /> <Prefix name="xsd" IRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" /> <Prefix name="rdf" IRI="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#" /> [...] <SubClassOf> <Class IRI="#round_hole" /> <Class IRI="#machining_feature" /> </SubClassOf> [...] </Ontology> </pre>	<pre> <Ontology xmlns="http://www.w3.org/2002/07/owl#" xml:base="http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC" xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#" xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace" ontologyIRI="http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC"> <Prefix name="" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" /> <Prefix name="owl" IRI="http://www.w3.org/2002/07/owl#" /> <Prefix name="rdfs" IRI="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#" /> <Prefix name="xsd" IRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" /> <Prefix name="rdf" IRI="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#" /> [...] <NamedIndividual rdf:about="#OntoSTEP-NC;Diameter1"> <rdf:type rdf:resource="#OntoSTEP-NC;toleranced_length_measure" /> <OntoSTEP-NC:NUMBER_is_double>20</OntoSTEP-NC:NUMBER_is_double> <OntoSTEP-NC:round_hole_has_diameter rdf:resource="#OntoSTEP-NC;Hole1" /> </NamedIndividual> <NamedIndividual rdf:about="#OntoSTEP-NC;Hole1"> <rdf:type rdf:resource="#OntoSTEP-NC;round_hole" /> </NamedIndividual> [...] </Ontology> </pre>
---	--

Figure 28 : Structure des modèles tbox# et abox# d'OntoSTEP-NC

La troisième étape consiste à implémenter les modèles "abox#" et "tbox#" dans Virtuoso, au travers de l'interface de chargement des fichiers en OWL/RDF. Une fois les modèles entrés en base, nous obtenons les schémas implémentés dans la base de connaissances Virtuoso comme décrit sur la Figure 29.

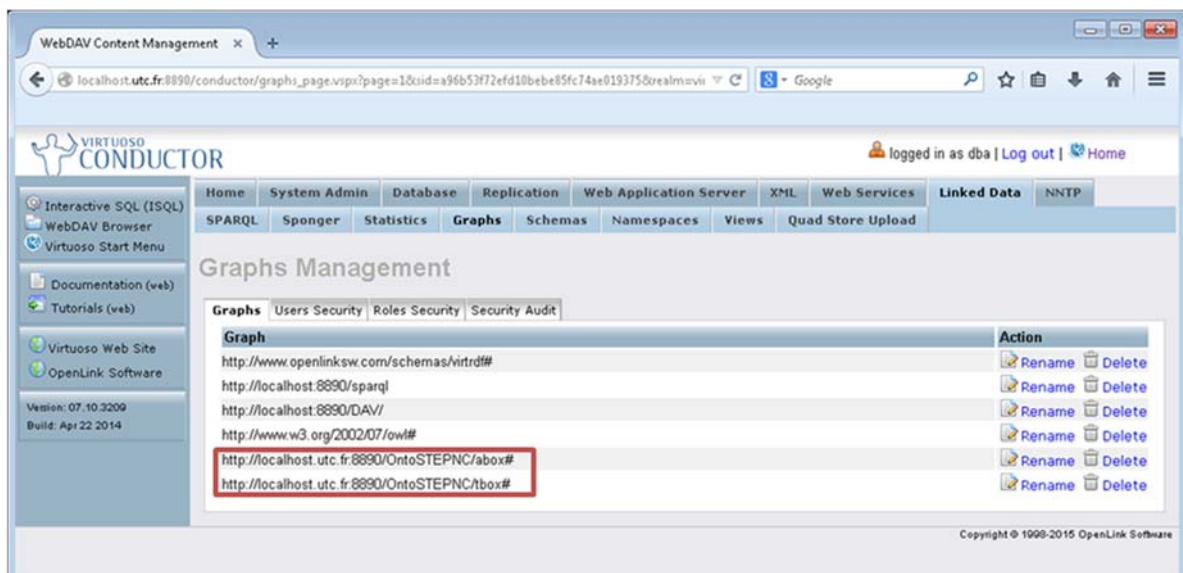


Figure 29 : Implémentation des modèles abox# et tbox# dans Virtuoso

La dernière étape de l'implémentation d'OntoSTEP-NC, comme base de connaissances, concerne la capacité à formaliser les savoir-faire et la capacité à intégrer les connaissances

capitalisées. Des requêtes en SPARQL permettent d'adresser directement les connaissances capitalisées, en parcourant le modèle "abox#", qui contient les informations propres aux opérations d'usinage. En se basant sur le cas d'illustration qui a permis d'illustrer notre proposition, la Figure 30 présente un exemple de requête et la réponse associée qui porte sur l'entité d'usinage "trou" possédant un diamètre caractéristique de 20mm.

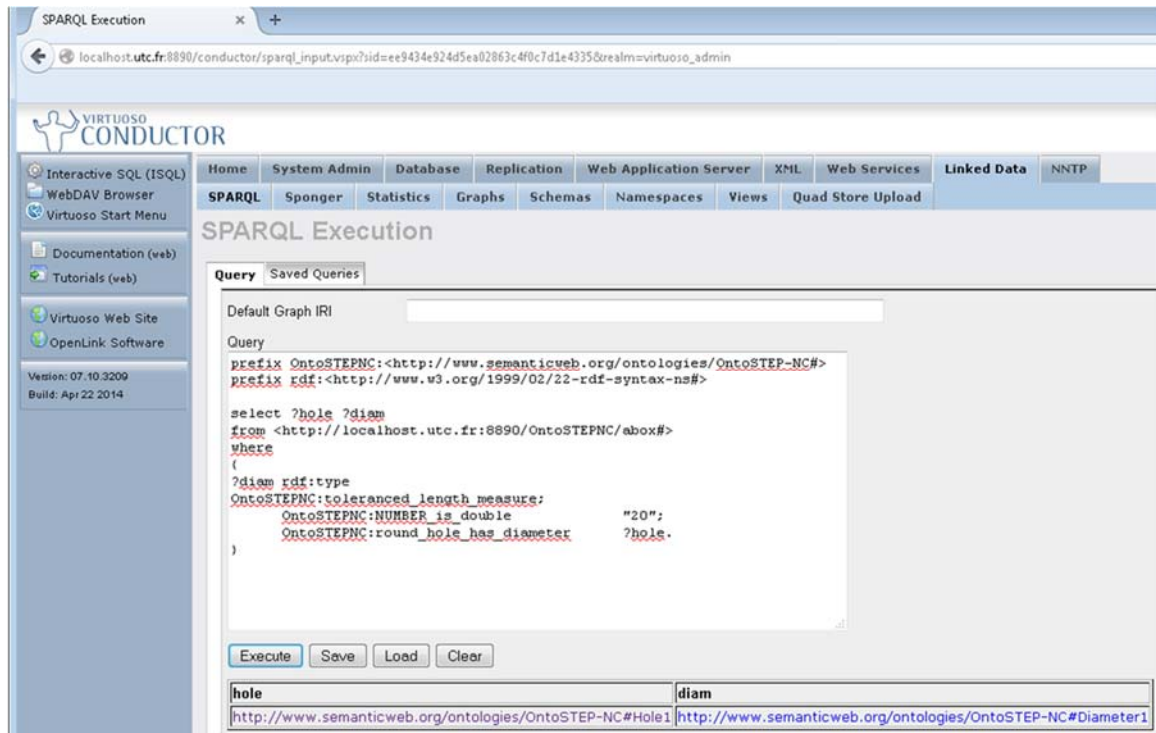


Figure 30 : Exemple de requête SPARQL sur OntoSTEP-NC implémenté

4.2 Cas d'étude

4.2.1 Présentation du cas d'étude

4.2.1.1 Présentation de la pièce

La Figure 31 décrit la pièce test qui a été retenue pour la validation de la proposition au travers du démonstrateur. Cette pièce test a été fournie par la société Spring Technologies dans le cadre du projet ANGEL pour la validation de nos propositions et des cas d'étude du projet. Bien que non-fonctionnelle, cette pièce présente de nombreuses entités d'usinage qui permettent une multitude de tests dans différentes configurations. Cette pièce permet, originellement, de tester les développements de post-processeurs pour l'industrie

aéronautique. Pour des raisons de confidentialité, certaines surfaces et certains features ne seront pas décrits et seront masqués.

L'usinage de la pièce test est réalisé sur une machine CN 5 axes continus avec un seul posage, en considérant que les surfaces de mises en position et les références ont été pré-usinées dans un premier posage, fournissant ainsi un parallélépipède de référence.

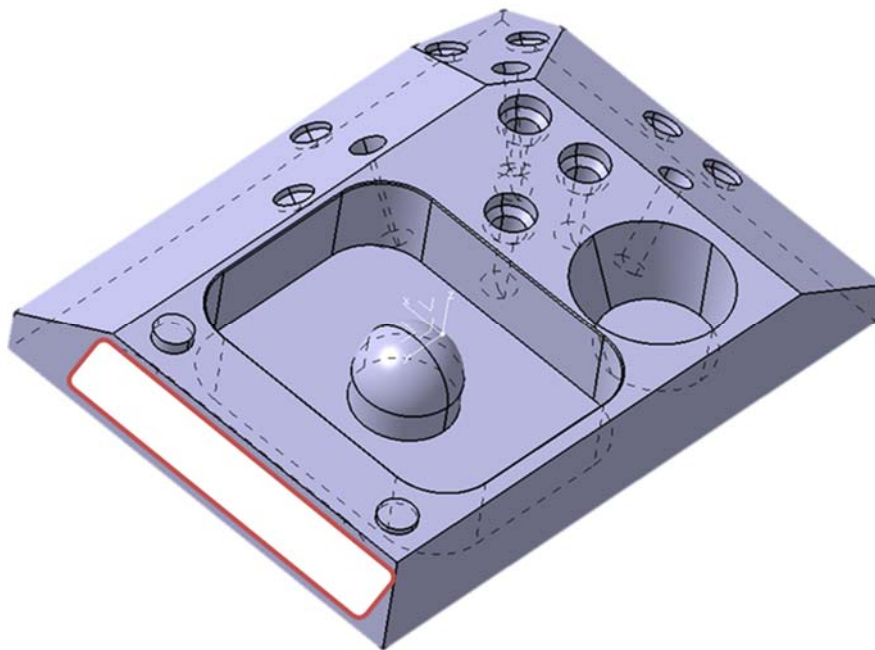


Figure 31 : Pièce test du cas d'étude

4.2.1.2 Présentation des entités d'usinage considérées

La pièce test se compose de 22 entités d'usinage en considérant 4 surfaçages, 1 poche avec 1 dôme, 2 "plots" et 14 trous. L'ensemble de ces entités d'usinage ne tient pas compte des surfaces cachées. Ces 22 entités d'usinage font appel à 19 opérations d'usinage différentes, en considérant les imbrications de plusieurs entités composées.

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons nous focaliser sur l'entité d'usinage correspondant à la poche rectangulaire qui comprend un dôme sphérique au centre de la poche. Cette poche a pour dimensions: 84mm de largeur, 105mm de longueur et 26mm de profondeur. Le dôme a un rayon de 16mm. La Figure 32 présente le programme STEP-NC définissant les caractéristiques géométriques et les fonctions d'usinage relatives à la poche rectangulaire, qui va supporter la mise en œuvre du démonstrateur. Ainsi, les lignes #10157 et #10158 précisent les dimensions du profil rectangulaire de la poche et la ligne #10156

spécifie les informations de profondeur de la poche. De même, sur la ligne #1602 et #10172, nous retrouvons les informations concernant le rayon de la poche et la localisation de son centre et, sur la ligne #10176, nous retrouvons la profondeur de la poche.

L'intégralité du programme d'usinage de la pièce test en STEP-NC est présentée en Annexe B.

```
DATA;
#1=PROJECT('SPRING EXAMPLE',#2,(#3),$,,$,$);
#2=WORKPLAN('MAIN WORKPLAN',(#10,#11,#12,#13,#14,#15,#16,#17,#18,#19,#20,#21,#22,#23,#24,#25,#26,#27,#28,#29),$,,$,$);
#3=WORKPIECE('BLOCK WORKPIECE','TITANIUM',0.1,$,$,$,(#10001,#10002,#10003,#10004));
#4=SETUP('MAIN SETUP',#10005,#10006,(#5));
#5=WORKPIECE_SETUP(#3,#10007,$,$,{});

#14=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_POCKET_RECTANGULAR',#10006,(#1400,#1450),$);

#70=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL103_ENDMILL',#71,(#72),80.,$,,$);/*rough milling pocket, cone*/
#71=TAPERED_ENDMILL(#73,4.,RIGHT.,F.,$,,$);
#72=CUTTING_COMPONENT(40.,$,,$,$,$);
#73=MILLING_TOOL_DIMENSION(16.,$,,$,30.,0,$,$);

#80=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL104_BALL_ENDMILL',#81,(#82),80.,$,,$);/*finish dome*/
#81=BALL_ENDMILL(#83,4.,RIGHT.,F.,$,,$);
#82=CUTTING_COMPONENT(40.,$,,$,$,$);
#83=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.,0,0,30.,5.,5.,0);/*ball_endmill*/

#1400=CLOSED_POCKET("POCKET_RECTANGULAR",#3,#1450,#10150,#10151,(#2000),$, #1401,$,#1402,#1403);
#1401=PLANAR_POCKET_BOTTOM_CONDITION();
#1402=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(18.00,#10159);
#1403=RECTANGULAR_CLOSED_PROFILE($,#10157,#10158);

#1450= BOTTOM_AND_SIDE_ROUGH_MILLING($,$,'MACHINING_POCKET_RECTANGULAR',15.00,$,#70,#1451,#1452,
$, $,$,#1453,2.,10.,$,,$);
#1451= MILLING_TECHNOLOGY(0.04,5500,0,002,-20.,$,F.,F.,F.,$);
#1452= MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,F.,$,(),.T.,$,,$,());
#1453= CONTOUR_PARALLEL($,$,CW.,CONVENTIONAL.);

#1600=SPHERICAL_CAP("DOME",#3,(#1650),#10170,#10171,#1601,#1602);
#1601=NUMERIC_PARAMETER('INTERNAL_ANGLE',180,'DEGREE');
#1602=NUMERIC_PARAMETER('RADIUS',16,'MM');
#1650=BOTTOM_AND_SIDE_FINISH_MILLING($,$,'MACHINING_DOME',15.00,$,#80,#1451,#1452,$,$,#1651,1.5.,10.,$,,$);
#1651= CONTOUR_PARALLEL(0.05, .T., .CW., .CONVENTIONAL.);

#10150=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_RECTANGULAR:PLACEMENT',#10152,#10009,#10010);
#10151=PLANE('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH',#10155);
#10152=CARTESIAN_POINT('POCKET_RECTANGULAR:LOCATION',{61.,58.5,36.});
#10155=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH_PLAIN',#10156,#10009,#10010);
#10156=CARTESIAN_POINT('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH-Z',{0,0,-26.});
#10157= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(84.,#10159);
#10158= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(105.,#10159);
#10159=PLUS_MINUS_VALUE(0.1,0.1,3);

#10170=AXIS2_PLACEMENT_3D('DOME:PLACEMENT',#10172,#10009,#10010);
#10171=PLANE('DOME:DEPTH',#10175);
#10172=CARTESIAN_POINT('DOME:LOCATION',{61.,58.5,20.});
#10175=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_CONE:DEPTH_PLAIN',#10176,#10009,#10010);
#10176=CARTESIAN_POINT('POCKET_CONE:DEPTH-Z',{0,0,-16.});

ENDSEC;
```

Figure 32 : Programme STEP-NC de la poche composée

4.2.2 Mise en œuvre du cas d'étude

Afin de vérifier l'implémentation et la mise en œuvre des propositions, un cas d'étude couvrant les différents scénarii possibles est proposé dans cette section. Ces différents scénarii reposent sur la présence dans la base de connaissances des informations nécessaires (features exactement identiques, features approchants...) pour fournir une aide au programmeur FAO. Ces scénarii dépendent également des modifications qui peuvent être réalisées dans l'atelier, au pied de la machine, et qui entraînent alors une investigation du programmeur FAO, afin de déterminer s'il s'agit de bonnes pratiques à intégrer dans la base de connaissances, ou, dans le cas contraire, qui ne doivent pas être capitalisées. Les configurations possibles sont représentées sur la Figure 33 en précisant les différents chemins.

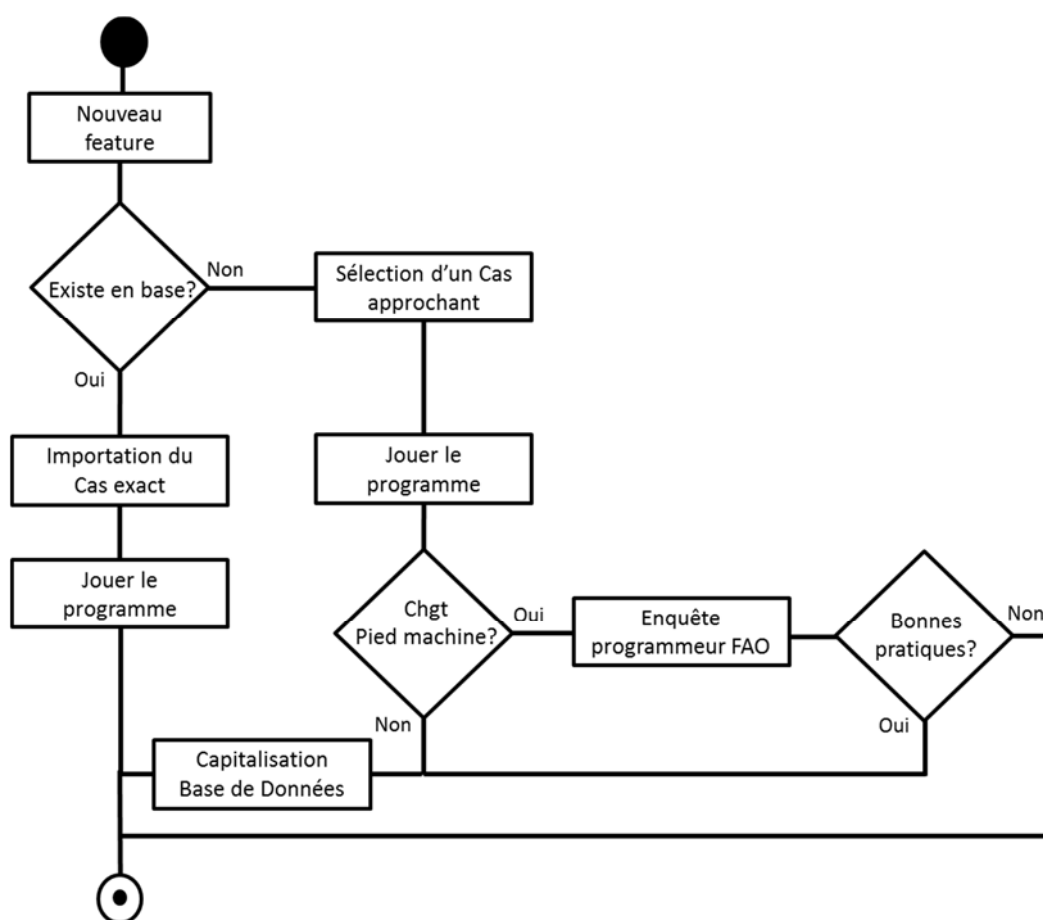


Figure 33 : Logigramme du cas d'étude

Pour tester nos propositions, trois scénarii sont étudiés de façon à couvrir toutes les étapes essentielles du cas d'études :

- La reconnaissance d'entité d'usinage

- Les requêtes dans la base de connaissance
- La réutilisation des paramètres d'usinage sous forme de bonnes pratiques
- L'extraction du programme d'usinage depuis la MOCN,
- La comparaison puis la validation
- L'intégration des connaissances dans la base.

4.2.2.1 Scénario 1

Dans le scénario 1, il existe déjà une entité poche dans la base de connaissances, qui présente exactement les mêmes caractéristiques que la poche que l'on souhaite réaliser. Le programmeur FAO importe les paramètres pour la programmation d'usinage et, les opérations seront jouées en fabrication au niveau de la MOCN. Comme il s'agit de bonnes pratiques qui ont été capitalisées en base, aucune modification ne sera apportée au programme d'usinage, comme illustré sur la Figure 34, présentant le workflow du scénario 1.

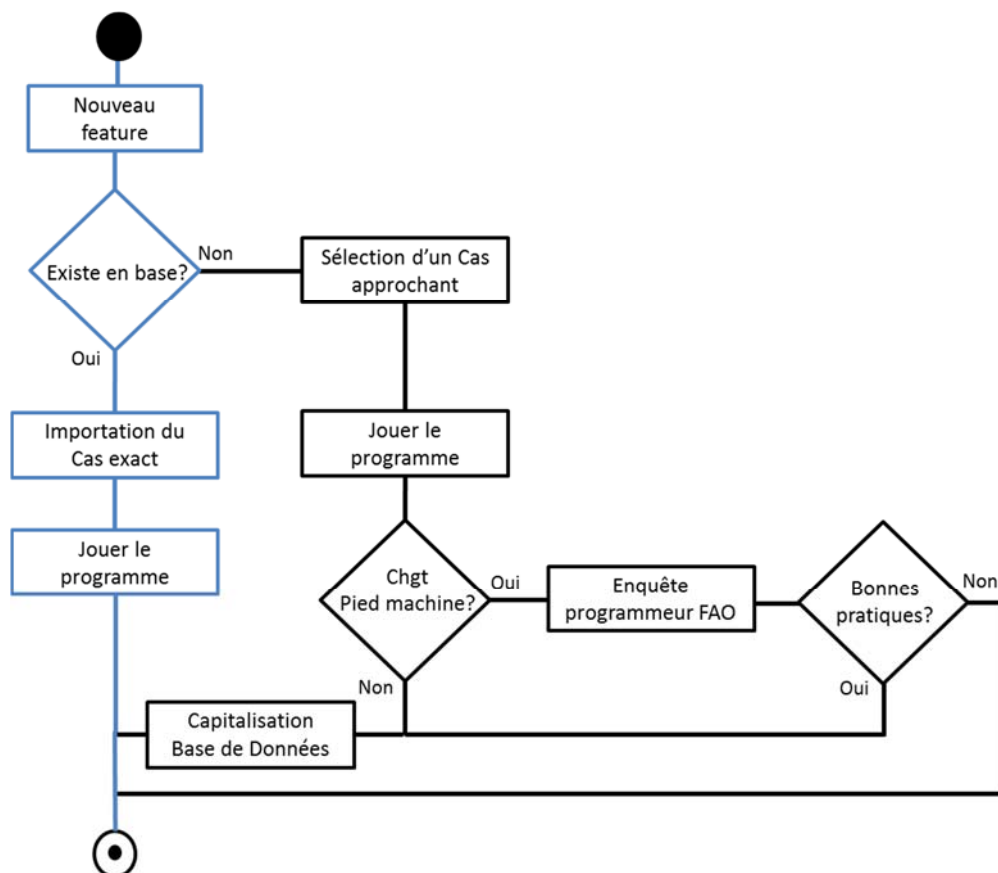


Figure 34 : Workflow du scénario 1

Dans ce scénario, la requête sur la base de connaissances, qui est lancée depuis le logiciel de FAO, propose une réponse avec un cas exactement similaire. La requête du cas d'étude qui nous intéresse ici est présentée sur la Figure 35.

```

prefix OntoSTEP-NC: <http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC#>
select distinct ?ws from <http://localhost:8890/Dem1>
where

{
  ?ws a OntoSTEP-NC:machining_workingstep.
  ?cp a OntoSTEP-NC:closed_pocket.
  ?rcp a OntoSTEP-NC:rectangular_closed_profile.
  ?tlmW a OntoSTEP-NC:toleranced_length_measure.
  ?tlmL a OntoSTEP-NC:toleranced_length_measure.
  ?np a OntoSTEP-NC:numeric_parameter.
  ?mt a OntoSTEP-NC:material

  ?rcp OntoSTEP-NC:rectangular_closed_shape_profile_has_closed_boundary ?cp.
  ?sc OntoSTEP-NC:machining_workingstep_has_feature ?ws.

  ?cp OntoSTEP-NC:machining_workingstep_has_feature ?ws.
  ?tlmW OntoSTEP-NC:INTEGER_is_integer "84".
  ?tlmW OntoSTEP-NC:rectangular_closed_profile_has_profile_width ?rcp.
  ?tlmL OntoSTEP-NC:INTEGER_is_integer "105".
  ?tlmL OntoSTEP-NC:rectangular_closed_profile_has_profile_length ?rcp.

  ?np OntoSTEP-NC:spherical_cap_has_radius ?sc.
  ?np OntoSTEP-NC:INTEGER_is_integer "16".

  FILTER(?mt OntoSTEP-NC:workpiece_has_material "TITANIUM").
}

```

Figure 35 : Requête sur la base de connaissance pour la reconnaissance d'entité du cas exact

Avec la requête, nous recherchons les entités d'usinage composées d'une poche et d'un dôme, en s'appuyant sur les dimensions de la poche et des paramètres identifiés au niveau du logiciel de FAO. Ainsi, par ordre d'importance, des requêtes sont lancées sur la base avec les critères suivants :

- Au vu des caractéristiques actuelles des logiciels FAO, le premier critère de recherche dans la base de connaissances se fait sur le type de MOCN ; Dans ce cas, nous souhaitons identifier une machine 5 axes.
- Le second critère s'intéresse au matériau de la pièce ; Dans le cas présenté ici, il s'agit du Titane.
- Le troisième critère concerne l'entité d'usinage, composée ici d'une poche rectangulaire et d'un dôme.
- Le quatrième paramètre de recherche considère les valeurs géométriques et les dimensions spécifiques.

Comme dans le scénario 1 un cas similaire existe en base de connaissances. Les réponses peuvent être restituées directement au niveau du logiciel FAO, sous forme de liste de paramètres dans une fenêtre pop-up. Comme décrit sur la Figure 36, les informations de la requête sont disponibles au niveau de la fenêtre ainsi que les paramètres d'usinage, avec la possibilité de les importer directement dans le logiciel FAO.

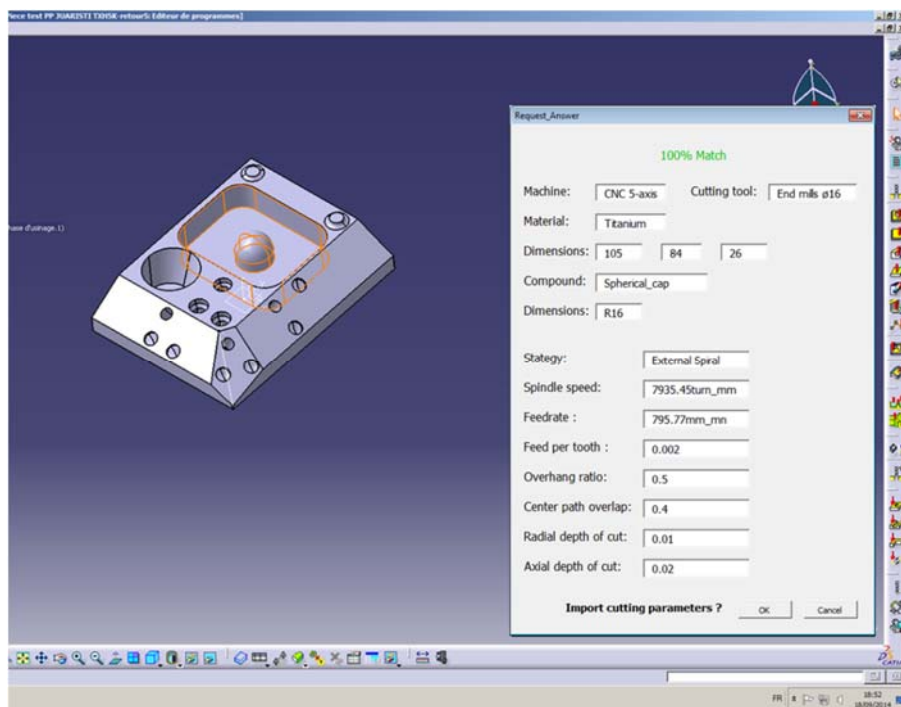


Figure 36 : Cas d'étude avec une réponse exactement similaire

Une fois les paramètres importés, le programme peut être validé, simulé puis joué sur la MOCN. Comme il s'agit de bonnes pratiques déjà capitalisées en base, aucune modification, au pied de la machine, ne devrait être faite entre le programme issu de la FAO et le programme extrait de la MOCN.

4.2.2.2 Scénario 2

Contrairement au scénario 1, dans le scénario 2, il n'y a pas de cas exactement similaire dans la base de connaissances. Bien qu'aucun cas similaire n'existe dans le scénario 2, le programmeur FAO importe les paramètres d'un cas approchant (par ses dimensions) de l'entité à usiner. Après vérification de la cohérence des paramètres par le programmeur FAO, le programme est joué en fabrication et aucune modification au pied de la machine n'est enregistrée. Les paramètres, pour l'usinage de l'entité, sont alors entrés en base de connaissances conformément au workflow décrit sur la Figure 37.

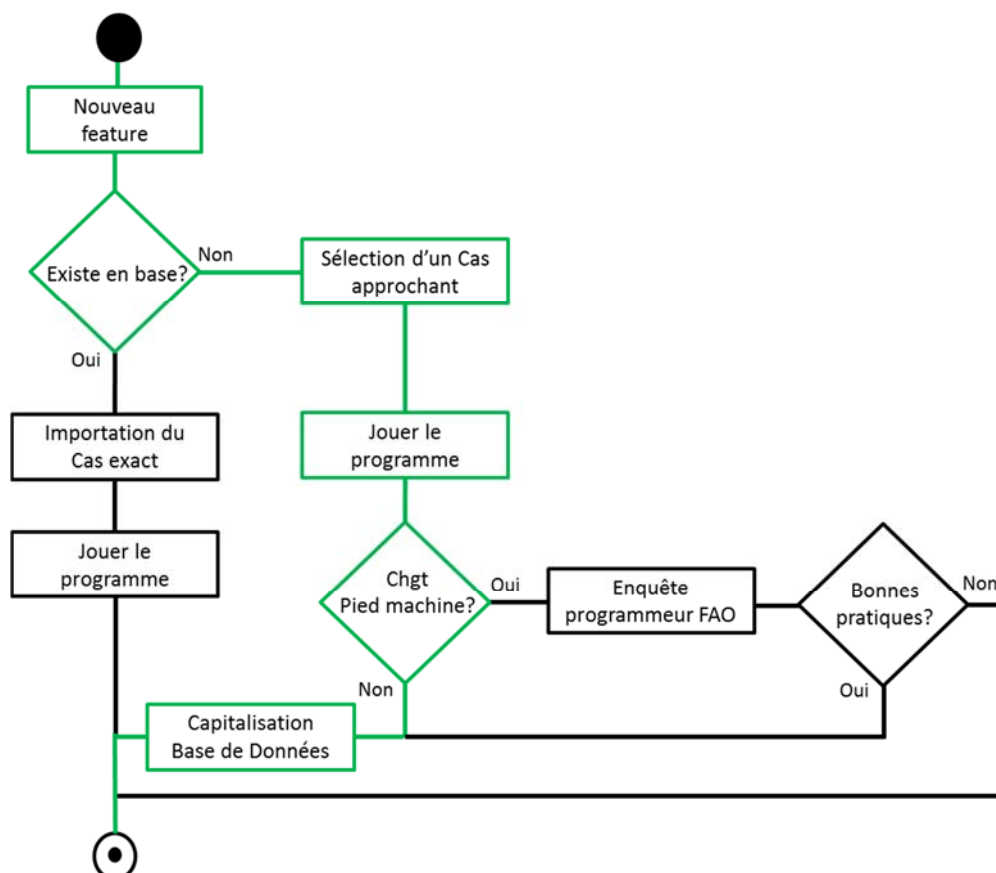


Figure 37 : Workflow du scénario 2

Dans le scénario 2, après une première requête (similaire à celle présentée dans le scénario 1), nous obtenons une réponse vide, signifiant qu'aucun cas similaire n'est présent en base. C'est pourquoi, une seconde requête est lancée, pour recenser toutes les entités similaires. La requête est présentée sur la Figure 38.

```
prefix OntoSTEP-NC: <http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC#>
select distinct ?ws from <http://localhost:8890/Dem1>
where

{
  ?ws a OntoSTEP-NC:machining_workingstep.
  ?cp a OntoSTEP-NC:closed_pocket.
  ?rcp a OntoSTEP-NC:rectangular_closed_profile.
  ?sc a OntoSTEP-NC:spherical_cap.

  ?rcp OntoSTEP-NC:rectangular_closed_shape_profile_has_closed_boundary ?cp.
  ?sc OntoSTEP-NC:machining_workingstep_has_feature ?ws.

  FILTER(?mt OntoSTEP-NC:workpiece_has_material "TITANIUM").
}
```

Figure 38 : Requête sur la base de connaissance pour la reconnaissance d'entité approchante

La requête parcourt toutes les entités d'usinage dans la base de connaissances qui sont composées d'une poche et d'un dôme en s'affranchissant du critère des dimensions géométriques. Une fois les cas recensés, ils sont regroupés dans le menu déroulant, présentant les différents cas avec les dimensions approchantes, avec la liste des paramètres associés à chaque cas, comme illustré sur la Figure 39.

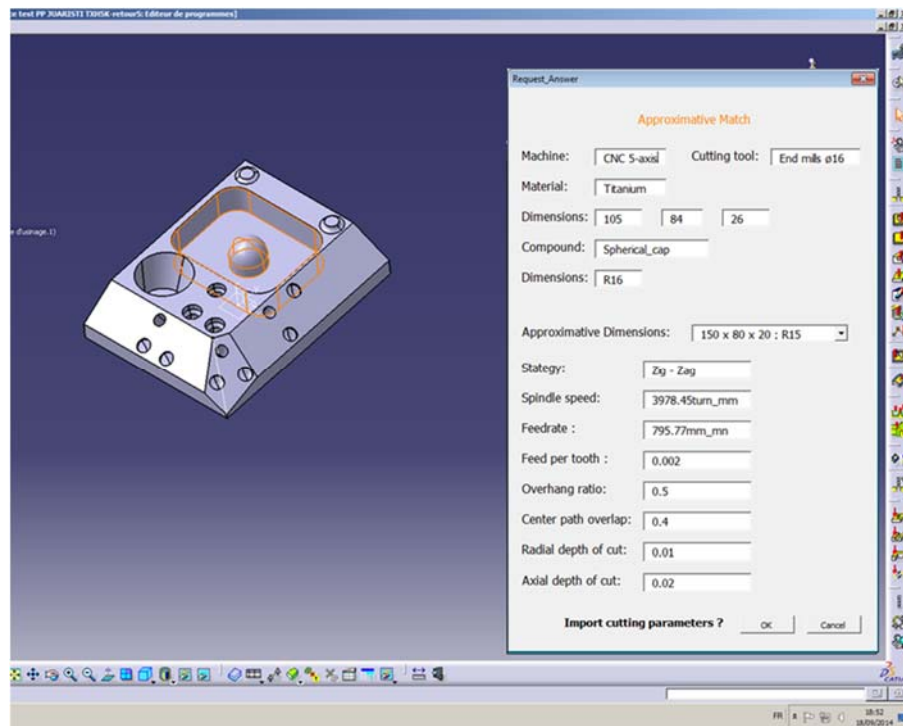


Figure 39 : Cas d'étude avec une réponse approchante

Une fois les paramètres importés et la cohérence vérifiée par le programmeur FAO, la séquence d'opérations peut être jouée sur la MOCN. Dans ce scénario, aucune modification n'a été effectuée, l'étape de comparaison ne révèle donc aucune différence entre le programme issu de la FAO et le programme issu de la MOCN. Une fois la vérification réalisée, les nouveaux paramètres, pour l'entité d'usinage choisie, peuvent être entrés dans la base de connaissances, comme illustré sur la Figure 40, au travers d'une requête pour favoriser l'automatisation de la capitalisation des connaissances d'usinage.

```

prefix OntoSTEP-NC: <http://www.semanticweb.org/ontologies/OntoSTEP-NC#>
insert ?Pocket3
from <http://localhost:8890/Dem1>
where

{
  ?tImW a OntoSTEP-NC:toleranced_length_measure.
  ?tImL a OntoSTEP-NC:toleranced_length_measure.

  ?tImW rdf:type OntoSTEPNC:toleranced_length_measure;
           OntoSTEP-NC:INTEGER_is_integer "84";
           OntoSTEP-NC:rectangular_closed_profile_has_profile_width ?Pocket3.
  ?tImL rdf:type OntoSTEPNC:toleranced_length_measure;
           OntoSTEP-NC:INTEGER_is_integer "150";
           OntoSTEP-NC:rectangular_closed_profile_has_profile_length ?Pocket3.
}

```

Figure 40 : Requête pour la mise en base du nouveau cas

La requête d'entrée en base propose de venir recréer, au niveau de la partie "abox#" d'OntoSTEP-NC, l'intégralité des individus correspondants à des entités présentes dans le programme d'usinage. Cette requête recrée, aussi bien les entités que l'ensemble des liens sémantiques, associant ces entités, en respectant le formalisme défini par le squelette d'OntoSTEP-NC "tbox#". Cette opération permet de capitaliser l'ensemble des nouvelles bonnes pratiques de l'entreprise dans la base de connaissances, en vue d'une réutilisation ultérieure pour l'usinage de futures pièces.

4.2.2.3 Scénario 3

Le scénario 3 se rapproche fortement du scénario 2 puisque la base de connaissances ne contient que des cas approchant qui seront importés par le programmeur FAO. Cependant, à la différence du scénario 2, le scénario 3 présente des différences au niveau des modifications au pied de la machine. En effet, dans le scénario 3, ces modifications ont été opérées et sont détectées au moment de l'étape de comparaisons des programmes issus de la FAO et ceux joués sur la MOCN. La validation des nouveaux paramètres est laissée à la discrétion du programmeur FAO, au regard des standards d'entreprise. Le workflow scénario 3 est détaillé sur la Figure 41.

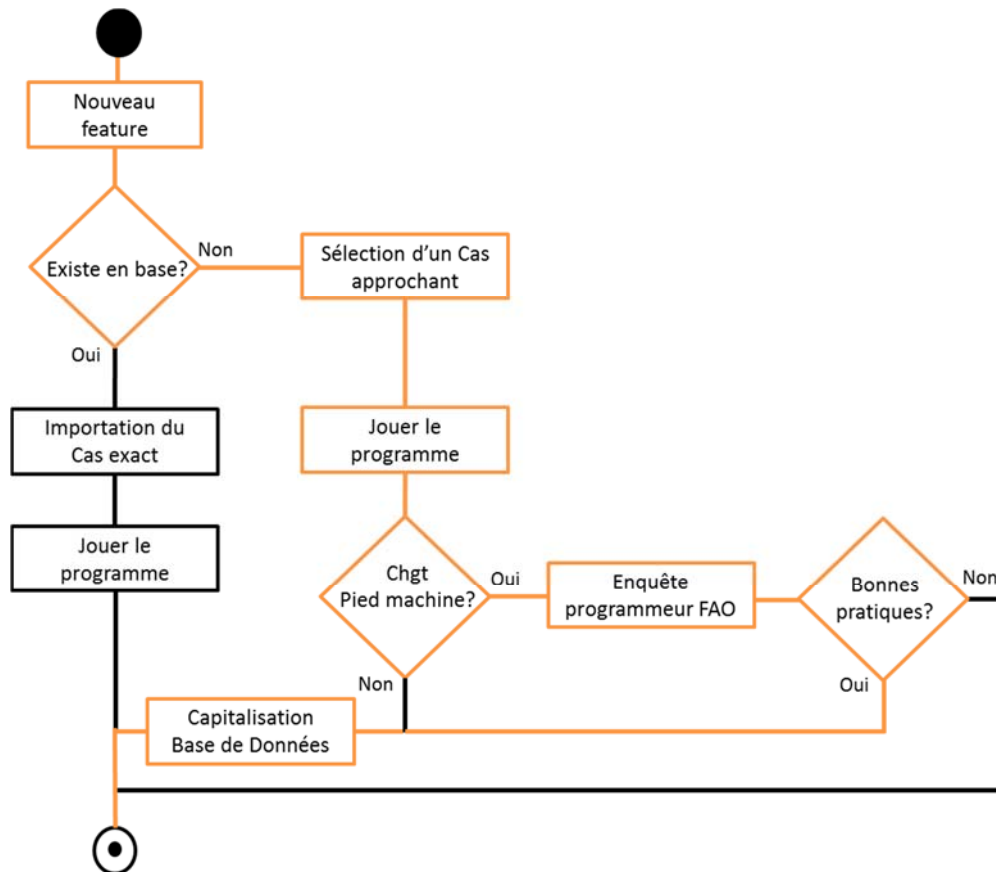


Figure 41 : Workflow du scénario 3

Les modifications, qui peuvent intervenir au pied de la machine, concernent généralement des valeurs ou des paramètres, mais ne touchent pas à la structure générale du programme d'usinage. Ainsi les valeurs ou paramètres principaux qui vont être modifiés vont concerner des vitesses d'avance, des vitesses de broche, etc.

Comme le démonstrateur est implémenté sur la chaîne numérique actuelle, nous sommes contraints de travailler à partir du programme en Code-G, sur la machine. Nous ne pouvons donc pas modifier les paramètres autres que les vitesses de broche, les vitesses d'avance, l'avance par dent, sans risquer de compromettre le programme d'usinage contrairement à un programme en STEP-NC où, par exemple, les surépaisseurs auraient pu être modifiées. Nous choisissons donc d'agir sur la vitesse de broche directement dans le programme en Code-G comme illustré sur la Figure 42. La vitesse qui était de 5700 a été abaissée à 5500 comme illustré sur la ligne "N1067" au travers de la commande "spindle S"

```

; OPERATION NAME : Ebauche.1
; Début de génération de: Ebauche.1
N1067 S5500 M3 D1
N1068 X-33.166 Y-1.813 Z186.
N1069 Z43.02
N1070 G1 Z38.02 F500.
N1071 X-32.279 Y-1.874 Z37.782
N1072 X-31.081 Y-2.066 Z37.457
N1073 X-29.935 Y-2.346 Z37.14
N1074 X-28.816 Y-2.716 Z36.825
N1075 X-27.744 Y-3.168 Z36.513
[...]
N4465 X-54.832 Y-7.846 Z14.144
N4466 X-54.823 Y-7.309 Z14.289
N4467 X-54.933 Y-6.783 Z14.433
N4468 X-55.158 Y-6.295 Z14.577
N4469 X-55.486 Y-5.869 Z14.722
N4470 X-55.9 Y-5.526 Z14.866
N4471 X-56.38 Y-5.285 Z15.01
N4472 Z20.01 F500.
N4473 G0 Z186.
; Fin de génération de: Ebauche.1
; DUREE OP: 9 MINUTES ET 31.4332 SECONDES
; DUREE PROG: 29 MINUTES ET 14.4363 SECONDES

```

Figure 42 : Modification pied-machine du programme de coupe

Bien que les structures et syntaxes en Code-G et STEP-NC sont différentes, le parseur permet de retranscrire ces modifications au niveau du programme généré en STEP-NC. Ainsi, l'étape de vérification syntaxique, visant à détecter les différences entre le programme issu du logiciel FAO et le programme extrait de la MOCN, met en évidence la modification au niveau du paramètre de la vitesse de broche comme illustré sur la Figure 43. Le deuxième paramètre de la fonction "MILLING_TECHNOLOGY" sur la ligne #1451 a été modifié et le comparateur textuel le met en évidence par une surbrillance lors de la comparaison des deux programmes en STEP-NC.


```

DATA;
#1=PROJECT('SPRING-EXAMPLE',#2,{#3},$,,$,,$);
#2=WORKPLAN('MAIN-WORKPLAN',{#10,#11,#12,#13,#14,#15,#16,#17,#18,#19,#20,#21,#22,#23,#24,#25,#26,#27,#28,#29},$,,$,,$);
#3=WORKPIECE('BLOCK-WORKPIECE','TITANIUM',0.1,$,$,,$,{#10001,#10002,#10003,#10004});
#4=SETUP('MAIN-SETUP',#10005,#10006,{#5});
#5=WORKPIECE_SETUP(#3,#10007,$,$,,$);
#14=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_POCKET_RECTANGULAR',#10006,{#1400,#1450},$);
#70=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL103_ENDMILL',#71,{#72},80.,$,,$);/*rough-milling-pocket,-cone*/
#71=TAPERED_ENDMILL(#73,4,RIGHT,.,F,,$,,$);
#72=CUTTING_COMPONENT(40.,$,,$,,$,,$);
#73=MILLING_TOOL_DIMENSION(16.,$,,$,30.,0,$,,$);
#80=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL104_BALL_ENDMILL',#81,{#82},80.,$,,$);/*finish-dome*/
#81=BALL_ENDMILL(#83,4,RIGHT,.,F,,$,,$);
#82=CUTTING_COMPONENT(40.,$,,$,,$,,$);
#83=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.,0,0,30.,5.,$,,$);/*ball_endmill*/
#1400=CLOSED_POCKET('POCKET_RECTANGULAR',#3,#1450,#10150,#10151,{#2000},$,#1401,$,#1402,#1403);
#1401=PLANAR_POCKET_BOTTOM_CONDITION();
#1402=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(18.00,#10159);
#1403=RECTANGULAR_CLOSED_PROFILE($,#10157,#10158);
#1450=BOTTOM_AND_SIDE_ROUGH_MILLING($,$,'MACHINING-POCKET_RECTANGULAR',15.00,$,#70,#1451,#1452,
.....$,,$,#1453,2.,10.,$,,$);
#1451=MILLING_TECHNOLOGY(0.04,55005700,0.002,-20.,$,F,.,F,.,$,,$);
#1452=MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T,,$,,$,.,F,,$,,$,.,T,.,$,,$,,$);
#1453=CONTOUR_PARALLEL($,$,.,CW,.,CONVENTIONAL.);
#1600=SPHERICAL_CAP("DOME",#3,{#1650},#10170,#10171,#1601,#1602);
#1601=NUMERIC_PARAMETER('INTERNAL_ANGLE',180,'DEGREE');
#1602=NUMERIC_PARAMETER('RADIUS',16,'MM');
#1650=BOTTOM_AND_SIDE_FINISH_MILLING($,$,'MACHINING-DOME',15.00,$,#80,#1451,#1452,$,$,#1651,1.5.,10.,$,,$);
#1651=CONTOUR_PARALLEL(0.05,.,T,.,.,CW,.,CONVENTIONAL.);
#10150=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_RECTANGULAR:PLACEMENT',#10152,#10009,#10010);
#10151=PLANE('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH',#10155);
#10152=CARTESIAN_POINT('POCKET_RECTANGULAR:LOCATION',{61.,58.5,36.});
#10155=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH-PLAIN',#10156,#10009,#10010);
#10156=CARTESIAN_POINT('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH-PLAIN',{0.,0.,0.});

```

Figure 43 : Comparaison des programmes STEP-NC FAO/MOCN

En considérant ici, que le programmeur FAO valide les nouveaux paramètres comme des bonnes pratiques, nous obtenons alors la requête exposée sur la Figure 40 pour l'entrée en base de connaissances dans le modèle "abox#", pour servir de référence pour les cas futurs.

4.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté notre cas d'étude pour mettre en avant l'implémentation et la mise en œuvre des propositions Closed-Loop Manufacturing et OntoSTEP-NC. Bien que des limitations, au niveau technologique et implémentations logicielles, apparaissent au niveau industriel, des choix technologiques ont permis de mettre en place un démonstrateur pour s'approcher des propositions Closed-Loop Manufacturing et OntoSTEP-NC. En effet, le parseur, permettant de transformer un programme "Code-G" en un programme STEP-NC, est mis en œuvre pour coller à la chaîne numérique actuelle, dont les procédés et technologies

ne supportent pas encore le standard STEP-NC. De même, pour pallier le problème d'architecture des systèmes d'information, et plus précisément du MPM, qui n'offre pas une structure orientée entité d'usinage, nous avons proposé d'implémenter le modèle OntoSTEP-NC pour recréer une base de connaissances adaptée.

Une pièce test permettant la validation des post-processeurs pour l'industrie aéronautique a été choisie. Bien que non fonctionnelle, cette pièce présente des caractéristiques intéressantes, notamment au niveau de l'entité d'usinage choisie, puisqu'elle combine plusieurs entités élémentaires. Ce choix complexe permet de mettre en avant la complétude de notre proposition, qui s'appuie sur l'intégralité des informations disponibles au niveau de la géométrie, afin de faciliter l'utilisation des connaissances de fabrication capitalisées pour la programmation d'usinage de nouvelles pièces mécaniques.

En se basant sur la pièce test, nous avons choisi de décliner trois scénarii qui permettent de couvrir l'intégralité des étapes présentes dans notre proposition : Closed-Loop Manufacturing. Le scénario 1 propose de retrouver dans la base de connaissances un cas exactement identique à celui que l'on souhaite programmer. Il permet de vérifier et de tester la logique et l'importation des paramètres en se basant sur la reconnaissance d'entités. Le scénario 2 s'intéresse à la recherche, dans la base de connaissances, des cas approchants qui présentent des similarités géométriques pour importer les paramètres d'usinage. Il permet également de tester la mise en base de connaissances et l'intégration de bonnes pratiques pour l'usinage de futurs cas. Le scénario 3 valide le processus d'extraction, de structuration et de validation des bonnes pratiques avant intégration en base de connaissances. Ainsi les trois scénarii proposés au niveau du cas d'étude permettent de vérifier et de tester les trois étapes majeures de la Closed-Loop Manufacturing : La reconnaissance des entités d'usinage au niveau du logiciel FAO, pour fournir une aide à la programmation, la validation et la capitalisation des bonnes pratiques d'entreprise, en fonction de nouveaux cas et de nouveaux paramètres, aussi bien issus de la programmation FAO, qu'issus de la MOCN, et l'étape d'extraction des données issues de la MOCN.

Conclusion et perspectives

Dans un contexte d'entreprise étendue et de développement des technologies de l'information pour l'usine du futur qui s'oriente vers une intégration flexible et agile des phases de conception et fabrication, la volonté de l'industrie aéronautique, de réaliser une pièce bonne du premier coup, en s'appuyant sur l'optimisation de la chaîne numérique, s'inscrit parfaitement dans cette vision. En effet, avec un objectif de réduction des masses des matériaux tels que l'inconel et le titane sont préférés à l'acier, notamment pour les pièces soumises à de fortes contraintes mécaniques (ex : train d'atterrissage) ou thermiques (ex : pièces mécaniques des réacteurs) et l'usinage de ces matériaux, dans certaines conditions, n'est pas encore bien maîtrisé.

En repartant des besoins de maîtrise des processus et du pilotage agile des opérations d'usinage, il apparaît essentiel de pouvoir capitaliser les savoir-faire métier issus de la fabrication. Cette vision est renforcée par la diversité des moyens et technologies de production, tels que les parcs machines et ressources logicielles, qui devient alors un des enjeux à prendre en compte pour la maîtrise et la flexibilité des processus de fabrication. En repartant des verrous industriels pour la capitalisation des données et paramètres d'usinage, nous avons pu aboutir à la problématique suivante : Comment élaborer un modèle d'interopérabilité de la chaîne numérique d'industrialisation, pour assurer une intégration agile de la conception et de la fabrication ?

Pour apporter une réponse à la question de recherche, une analyse de l'état de l'art a été proposée. L'étude bibliographique sur l'interopérabilité, réalisée dans la première partie du chapitre 2, nous permet d'identifier deux solutions plus largement mises en œuvre : l'utilisation de standard, pour assurer l'échange d'informations, et les modèles ontologiques. Une première réponse avec l'utilisation de la norme STEP-NC nous permet de résoudre la problématique de la bidirectionnalité des échanges sur la chaîne numérique, en fournissant un support pour les informations de la conception à la fabrication.

Bien que cette norme couvre les échanges dans la chaîne numérique d'industrialisation, seule, elle ne permet pas une gestion des connaissances satisfaisante. C'est pourquoi, cette étude a été complétée par une analyse des ontologies pour l'industrialisation qui apparaissaient prometteuses mais n'offraient pas encore de granularité suffisante pour intégrer les informations issues des MOCN.

Pour répondre à la problématique de capitalisation des savoir-faire, une étude bibliographique sur les méthodes de gestion des connaissances en industrialisation a été menée. Il apparaît clairement une limite dans la complétude des informations gérées qui n'intègre pas la capitalisation des stratégies et des paramètres d'usinage simultanément. Suite à l'analyse de l'état de l'art, nous pouvons dégager deux verrous scientifiques qui permettent de détailler notre problématique :

- "Comment structurer les données pour l'interopérabilité des chaînes numériques d'industrialisation ?"
- "Comment intégrer et réutiliser les connaissances métiers capitalisées de la fabrication vers l'industrialisation ?"

Nous avons donc développé deux propositions pour répondre à ces deux verrous scientifiques. La première proposition, le modèle OntoSTEP-NC, est une ontologie qui se base sur la norme STEP-NC permettant ainsi de répondre aux limites identifiées dans l'état de l'art. Il s'agit en effet d'une ontologie qui présente le même niveau de granularité que STEP-NC et qui permet ainsi d'extraire l'intégralité des informations depuis la MOCN en assurant les échanges d'information entre applications métier et systèmes d'information.

La seconde proposition, le processus Closed-Loop Manufacturing, offre une boucle d'information fermée entre la fabrication et l'industrialisation. CLM permet la réutilisation des standards et bonnes pratiques capitalisées issues des MOCN au niveau des logiciels de FAO en proposant à l'expert FAO une aide pour la programmation. Cette aide à la programmation assure la réutilisation des paramètres d'usinage, en se basant sur des cas similaires déjà capitalisés. Pour mettre en œuvre CLM, le processus respecte trois étapes principales : l'extraction des données, issues des MOCN, la vérification puis la validation des informations de production, pour capitalisation des bonnes pratiques, et enfin, l'intégration qui s'appuie sur la reconnaissance des entités d'usinage, pour proposer au programmeur FAO, les bonnes pratiques d'entreprise les plus pertinentes.

Nos travaux ont été, ensuite, mis en œuvre sur un cas d'étude, permettant de répondre respectivement aux deux verrous scientifiques énoncés. Ils proposent à la fois, une architecture facilitant l'extraction et la structuration des informations issues de la production, mais aussi, un processus de capitalisation et d'intégration des bonnes pratiques au niveau de

la programmation d'usinage, en s'appuyant sur le modèle OntoSTEP-NC. En levant ainsi nos deux verrous scientifiques, nous répondons à la problématique en intégrant, au niveau de la phase de conception des processus de fabrication, les informations directement issues de la phase de fabrication. En effet, les solutions proposées améliorent l'interopérabilité pour les données de production, tant au niveau des applications métiers, que des systèmes d'information, et permettent la capitalisation des savoir-faire et expériences, pour tendre vers l'obtention d'une pièce bonne du premier coup.

La mise en œuvre des propositions OntoSTEP-NC et Closed-Loop Manufacturing assure, non seulement une réponse à la problématique identifiée dans nos travaux, mais permet également d'adresser des enjeux plus larges.

Le modèle OntoSTEP-NC, qui sert de support à la proposition Closed-Loop Manufacturing, est une ontologie basée sur la norme STEP-NC. Développé pour permettre d'extraire et de structurer les informations depuis les MOCN, OntoSTEP-NC offre une granularité suffisante pour s'intéresser à la fois aux stratégies d'usinage et aux paramètres machines. OntoSTEP-NC permet ainsi de conserver le lien sémantique entre les applications métiers et les systèmes d'information, pour les connaissances de fabrication, et d'adresser, ainsi, un objectif d'interopérabilité sémantique plus large. Cette proposition s'inscrit, ainsi, dans l'évolution de la chaîne numérique pour l'Usine du Futur. En effet, en s'appuyant sur la définition de l'EFFRA donné précédemment, le modèle OntoSTEP-NC favorise l'intégration numérique des machines et des systèmes d'information multi-sites pour les données de fabrication et paramètres d'usinage.

La proposition Closed-Loop Manufacturing propose un processus unifié de capitalisation de connaissances, depuis les MOCN, en vue d'une intégration au niveau de la FAO. Cette proposition permet de créer un retour d'information, depuis la fabrication vers la phase d'industrialisation. Ce processus, unifié et basé sur la norme STEP-NC, permet ainsi d'extraire les informations machines et les paramètres d'usinage de toutes les MOCN capables de lire un programme STEP-NC. Ainsi, cette extraction peut être menée dans le cadre d'entreprise étendue en exploitant un parc machine qui peut jouer un programme STEP-NC. En ce qui concerne la capitalisation en elle-même, la proposition Closed-Loop Manufacturing s'appuie sur les systèmes d'information tels que l'ERP et le MPM. L'utilisation de ces systèmes, et notamment le MPM, comme plateforme fédérative du CLM, permet d'uniformiser la gestion

des standards et des bonnes pratiques d'entreprise. Au travers de sa capacité à gérer les révisions et versions, le système MPM assure la capitalisation pour l'ensemble des extractions réalisées dans une entreprise étendue. En tant que base de connaissances, il devient alors le système intérateur dans l'entreprise étendue, média de la réutilisation des bonnes pratiques au niveau des logiciels FAO pour la programmation d'usinage de pièces mécaniques. Nous obtenons ainsi une harmonisation des pratiques, ce qui permet de diffuser les savoir-faire et les connaissances métiers dans toute l'entreprise étendue en s'affranchissant des contraintes technologiques et organisationnelles ainsi que de l'hétérogénéité du parc machine capable ou non d'interpréter du STEP-NC.

Bien que les travaux proposés dans ce manuscrit présentent des aspects intéressants pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances, certaines limites peuvent apparaître et délimiter un périmètre pour des recherches futures. La faible implémentation de STEP-NC au niveau des parcs machines de l'industrie manufacturière ne permet pas aujourd'hui de mettre en place une chaîne numérique complète et basée sur cette norme. Cependant, certains éditeurs logiciels ont commencé à développer des logiciels "STEP-NC ready" dans l'attente de la mise en place d'une telle chaîne numérique. De même, la structure MPM, actuellement orientée sur une vue produit, ne donne pas la pleine puissance à une approche comme le processus CLM orientée entité d'usinage. Ces axes de progrès, bien que très pénalisants pour la mise en œuvre complète des propositions, ne s'apparentent qu'à des problématiques d'implémentations.

En raisonnant sur les entités définies en 2D½ telles que présentées dans STEP-NC, nos propositions ne permettent de traiter que les entités formellement identifiables. Ainsi, la reconnaissance d'entités au niveau de l'intégration ne peut être effectuée que sur des géométries déjà référencées, telles que des poches, des trous, des rainures, des obstacles, des bosses, des surfaçages, etc. Bien que la norme permette également de réaliser des formes libres au niveau du programme d'usinage en décrivant explicitement le parcours d'outil, les propositions exposées dans nos travaux ne peuvent pas encore les prendre en compte. Un axe de progrès pourra s'intéresser à la caractérisation de ces formes gauches et libres pour

pouvoir mettre en place une reconnaissance géométrique et ainsi, pouvoir importer les données et paramètres associés pour la programmation d'usinage au niveau des logiciels FAO.

En fournissant une aide à la programmation au niveau des logiciels FAO, nos travaux favorisent l'importation des paramètres pour l'élaboration de programme d'usinage. En s'appuyant sur l'initialisation réalisée par le programmeur FAO, une requête est lancée sur la base de connaissances, afin de permettre une intégration d'informations pertinentes. Cette initialisation, qui s'avère essentielle, s'appuie sur la définition des gammes de fabrication et d'opérations d'usinage qui auront été précédemment réalisées. Un axe de travail pourra être la capacité à exploiter directement le modèle géométrique CAO, pour la gestion des requêtes et l'intégration des paramètres. Pour mettre en œuvre cette intégration à partir du modèle CAO, il y aura alors nécessité d'intégrer, au niveau du logiciel de FAO, ou en amont, un IPAO capable de définir les gammes et les séquences d'usinage, en mode automatique ou semi-automatique.

En s'inscrivant ainsi dans un contexte d'échange d'informations et d'interopérabilité entre les phases de fabrication et d'industrialisation, nos travaux adressent les enjeux de l'intégration des chaînes numériques dans l'Usine du Futur. Un travail d'adaptation et de complément pourra être réalisé pour s'adapter aux technologies émergentes, telles que le Cloud Design and Manufacturing et les modèles agiles, pour le pilotage des performances de fabrication et la flexibilité des processus qui se font jour.

Références

- AFM, 2015. LIVRE BLANC DE LA RECHERCHE EN MÉCANIQUE - Enjeux industriels et sociétaux Recherche, innovation, formation.
- Afsharizand, B., Zhang, X., Newman, S.T., Nassehi, A., 2014. Determination of Machinability Considering Degradation of Accuracy Over Machine Tool Life Cycle, in: *Procedia CIRP - Variety Management in Manufacturing*. pp. 760–765. doi:10.1016/j.procir.2014.02.048
- Alting, L., Zhang, H., 1989. Computer Aided Process Planning: the state-of-the-art survey. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207548908942569
- Antoniou, G., Harmelen, F. Van, 2004. Web Ontology Language : OWL, in: *Handbook on Ontologies*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 67–92.
- Arezoo, B., Ridgway, K., Al-Ahmari, A.M.A., 2000. Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system. *Computers in Industry* 42 (1), 43–58. doi:10.1016/S0166-3615(99)00051-2
- Assouroko, I., Ducellier, G., Boutinaud, P., Eynard, B., 2014. Knowledge management and reuse in collaborative product development—a semantic relationship management-based approach. *International Journal of Product Lifecycle Management* 7 (1), 54–74.
- Assouroko, I., Ducellier, G., Eynard, B., Boutinaud, P., 2011. Semantic-based approach for the integration of product design and numerical simulation, in: *International Conference on Product Lifecycle Management*. Eindhoven, Netherlands.
- ATHENA, 2004. Document Deliverable D.A1.1.1, Project A1: Enterprise Modelling in the Context of Collaborative Enterprises ATHENA, EU IP- Project - No 507849.
- Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., 2010. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks* 54 (15), 2787–2805. doi:10.1016/j.comnet.2010.05.010
- Babic, B., Nesic, N., Miljkovic, Z., 2008. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition. *Computers in Industry* 59 (4), 321–337. doi:10.1016/j.compind.2007.09.001
- Barbau, R., Krifa, S., Rachuri, S., Narayanan, A., Fiorentini, X., Fofou, S., Sriram, R.D., 2012. OntoSTEP: Enriching product model data using ontologies. *Computer-Aided Design* 44 (6), 575–590. doi:10.1016/j.cad.2012.01.008
- Beg, J., Shunmugam, M.S., 2003. Application of fuzzy logic in the selection of part orientation and probe orientation sequencing for prismatic parts. *International Journal of Production Research* 41 (12), 2799–2815. doi:10.1080/0020754031000095130
- Bénaben, F., Touzi, J., Rajsiri, V., Pingaud, H., 2006. Collaborative Information System Design, in: *AIM Conferences*. Luxembourg, pp. 281–296.

- Bergman, M., 2010. The Sweet Compendium of Ontology Building Tools [WWW Document]. 01/2010. URL <http://www.mkbergman.com/862/the-sweet-compendium-of-ontology-building-tools/>
- Bernard, A., Delplace, J.-C., Perry, N., Gabriel, S., 2003. Integration of CAD and rapid manufacturing for sand casting optimisation. *Rapid Prototyping Journal* 9 (5), 327–333. doi:10.1108/13552540310502220
- Biahmou, A., Fröhlich, A., Stjepandic, J., 2010. Improving Interoperability in Mechatronic Product Development, in: *International Conference on Product Lifecycle Management..* Bremen, Germany, pp. 510–521.
- Bock, C., Zha, X., Suh, H., Lee, J., 2010. Advanced Engineering Informatics Ontological product modeling for collaborative design. *Advanced Engineering Informatics* 24 (4), 510–524. doi:10.1016/j.aei.2010.06.011
- Booth, D., Haas, H., McCabe, F., Newcomer, E., Champion, M., Ferris, C., Orhcard, D., 2004. Web Services Architecture. W3C Working Group. W3C Working Group Note.
- Borgia, S., Matta, A., Tolio, T., 2013. STEP-NC compliant approach for setup planning problem on multiple fixture pallets. *Journal of Manufacturing Systems* 32 (4), 781–791. doi:10.1016/j.jmsy.2013.09.002
- Borgia, S., Pellegrinelli, S., Petrò, S., Tolio, T., 2014. Network part program approach based on the STEP-NC data structure for the machining of multiple fixture pallets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 27 (3), 281–300. doi:10.1080/0951192X.2013.814158
- Browne, J., Zhang, J., Browne, J., 1999. Extended and virtual enterprises-similarities and differences. *International Journal of Agile Management Systems* 1 (1), 30–36.
- Cao, Y., Cao, S., Bai, Y., Yang, X.F., 2013. CBR-Based Cutting Parameter Selection System and Searching Algorithm for Metal Machining Operations. *Advanced Materials Research* 710, 554–557. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.710.554
- Catalano, C.E., Camossi, E., Ferrandes, R., Cheutet, V., Sevilmis, N., 2008. A product design ontology for enhancing shape processing in design workflows. *Journal of Intelligent Manufacturing* 20 (5), 553–567. doi:10.1007/s10845-008-0151-z
- Cay, F., Chassapis, C., 1997. An IT view on perspectives of computer aided process planning research. *Computers in Industry* 34 (3), 307–337. doi:10.1016/S0166-3615(97)00070-5
- Charles, S., 2005. Gestion Intégrée des données CAO et EF - Contribution à la liaison entre conception mécanique et calcul de structures. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes.

- Chen, D., Doumeingts, G., 2003. European initiatives to develop interoperability of enterprise applications—basic concepts, framework and roadmap. *Annual Reviews in Control* 27 (2), 153–162.
- Chen, D., Doumeingts, G., Vernadat, F., 2008. Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future. *Computers in Industry* 59 (7), 647–659.
- Chen, Y., Chen, Y., Chu, H., 2009. Development of a mechanism for ontology-based product lifecycle knowledge integration. *Expert Systems With Applications* 36 (2), 2759–2779. doi:10.1016/j.eswa.2008.01.049
- Cho, J., Han, S., Kim, H., 2006. Meta-ontology for automated information integration of parts libraries. *Computer-Aided Design* 38, 713–725. doi:10.1016/j.cad.2006.03.002
- Chryssolouris, G., 2013. *Manufacturing systems: theory and practice*, Springer S. ed.
- Chungoora, N., Young, R.I., Gunendran, G., Palmer, C., Usman, Z., Anjum, N. a., Cutting-Decelle, A.F., Harding, J. a., Case, K., 2013. A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. *Computers in Industry* 64 (4), 392–401. doi:10.1016/j.compind.2013.01.003
- Del-Rey-Chamorro, F.M., Roy, R., Van Wegen, B., Steele, A., 2003. A framework to create key performance indicators for knowledge management solutions. *Journal of Knowledge Management* 7 (2), 46–62. doi:10.1108/13673270310477289
- Demoly, F., Toussaint, L., Eynard, B., Kiritsis, D., Gomes, S., 2011. Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning. *Computer-Aided Design* 43 (12), 1654–1673. doi:10.1016/j.cad.2011.09.006
- Denkena, B., Shpitalni, M., Kowalski, P., Molcho, G., Zipori, Y., 2007. Knowledge management in process planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (1), 175–180. doi:10.1016/j.cirp.2007.05.042
- Dereli, T., Filiz, I.H., 1999. Optimisation of process planning functions by genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering* 36 (2), 281–308. doi:10.1016/S0360-8352(99)00133-3
- Dipper, T., Xu, X., Klemm, P., 2011. Defining, recognizing and representing feature interactions in a feature-based data model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27 (1), 101–114. doi:10.1016/j.rcim.2010.06.016
- Effra, 2012. *Factories of the Future PPP - FoF 2020 Roadmap*. Advanced Manufacturing 1–89.
- EIF, 2004. *European Interoperability Framework for pan-European eGovernment Services*, in: *Interoperable Delivery of European eGovernment Services to Public Administrations*.

- El Kadiri, S., Grabot, B., Thoben, K.-D., Hribernik, K., Emmanouilidis, C., von Cieminski, G., Kiritsis, D., 2015. Current trends on ICT technologies for enterprise information systems. *Computers in Industry*. doi:10.1016/j.compind.2015.06.008
- El Kadiri, S., Kiritsis, D., 2015. Ontologies in the context of product lifecycle management: state of the art literature review. *International Journal of Production Research* 1–12. doi:10.1080/00207543.2015.1052155
- Elmaraghy, H. a., 1993. Evolution and Future Perspectives of CAPP. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42 (2), 739–751. doi:10.1016/S0007-8506(07)62537-2
- Etienne, A., Guyot, E., Wijk, D. Van, Roucoules, L., 2011. Specifications and Development of Interoperability Solution dedicated to Multiple Expertise Collaboration in a Design Framework. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 1–14.
- Eversheim, W., Schneewind, J., 1993. Computer-aided process planning—State of the art and future development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 10 (1-2), 65–70. doi:10.1016/0736-5845(93)90027-H
- Eynard, B., Gallet, T., Nowak, P., Roucoules, L., 2004. UML based specifications of PDM product structure and workflow. *Computers in Industry* 55 (3), 301–316. doi:10.1016/j.compind.2004.08.006
- Feeney, A.B., Kramer, T., Proctor, F., Hardwick, M., Loffredo, D., 2003. STEP-NC implementation - ARM or AIM? ISO TC184/SC4 WG3 N 1223.
- Fenves, S.J., Foufou, S., Bock, C., Sriram, R.D., 2008. CPM : A Core Model for Product Data. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 8 (1), 1–14.
- Fortin, C., Huet, G., 2007. Manufacturing Process Management: iterative synchronisation of engineering data with manufacturing realities. *International Journal of Product Development* 4, 280. doi:10.1504/IJPD.2007.012496
- Garetti, M., Terzi, S., Bertacci, N., Brianza, M., 2005. Organisational change and knowledge management in PLM implementation. *International Journal of Product Lifecycle Management* 1 (1), 43. doi:10.1504/IJPLM.2005.007344
- Garrido Campos, J., Rodriguez Miguez, L., 2011. Standard process monitoring and traceability programming in collaborative CAD/CAM/CNC manufacturing scenarios. *Computers in Industry* 62 (3), 311–322. doi:10.1016/j.compind.2010.09.003
- Giannetti, C., Ransing, R.S., Ransing, M.R., Bould, D.C., Gethin, D.T., Sienz, J., 2004. Knowledge management and knowledge discovery for process improvement and sustainable manufacturing : a foundry case study, in: *Sustainable Design and Manufacturing*. pp. 254–266.
- GIFAS, 2015. Réduire la consommation de kérosène des avions.

- Gouda, S., Taraman, K., 1989. CAPP: AAST, present and future. Society of Manufacturing Engineers.
- Grosse, I., Benoit, J., Wileden, J., 2005. Ontologies for supporting engineering analysis models. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 19 (1), 1–18.
- Gruber, T., 1993a. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition* 5 (2), 199–220. doi:10.1.1.101.7493
- Gruber, T., 1993b. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human-Computer Studies*. doi:citeulike-article-id:230211
- Guarino, N., 1998. Formal Ontology and Information Systems, in: *Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the First International Conference (FOIS'98)*. Trento, Italy, pp. 3–15.
- Ham, I., Lu, S.C.Y., 1988. Computer-Aided Process Planning: the present and the future. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 37 (2), 591–601.
- Hardwick, M., Zhao, Y.F., Proctor, F.M., Nassehi, a., Xu, X., Venkatesh, S., Odendahl, D., Xu, L., Hedlind, M., Lundgren, M., Maggiano, L., Loffredo, D., Fritz, J., Olsson, B., Garrido, J., Brail, A., 2013. A roadmap for STEP-NC-enabled interoperable manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (5-8), 1023–1037. doi:10.1007/s00170-013-4894-0
- Harik, R., Capponi, V., Lombard, M., Ris, G., 2006. Enhanced functions supporting process planning for aircraft structural parts, in: *Computational Engineering in Systems Applications*. Beijing, China.
- Harik, R.F., Derigent, W.J.E., Ris, G., Henri, U., Nancy, P., 2008. Computer Aided Process Planning in Aircraft Manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications* 5 (6), 1–10.
- Hashemi, H., Shaharoun, A.M., Sudin, I., 2014. A case-based reasoning approach for design of machining fixture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-014-5930-4
- Hoffmann, P., 2008. Similarité sémantique inter-ontologies basée sur le contexte. Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard - Lyon 1.
- Hou, M., Faddis, T., 2006. Automatic tool path generation of a feature-based CAD/CAPP/CAM integrated system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 19 (4), 350–358. doi:10.1080/09511920500504354
- IEEE, 1990. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers): Standard Computer Dictionary- A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries.

- International Standards Organization, ISO 10303-209. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 209: Composite and metallic structural analysis and related design, 2001.
- International Standards Organization, ISO 10303-242. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering, 2014.
- International Standards Organization, ISO 14258 - Industrial automation systems - Concepts and rules for enterprise models, 1998.
- International Standards Organization, ISO 14649-1. Industrial automation systems and integration — Physical device control — Data model for computerized numerical controllers — part 1: Overview and fundamental principles., 2003.
- International Standards Organization, ISO/IS 10303-238. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 238: Application interpreted model for computerized numerical controllers, 2006.
- INTEROP, 2004. Knowledge map of research in interoperability in the INTEROP NoE, Deliverable D1.1, EU-NoE Project IST-508 011, www.interop.noel.org.
- Jagdev, H.S., Browne, J., 1998. The extended enterprise-a context for manufacturing. *Production Planning & Control* 9 (3), 216–229. doi:10.1080/095372898234190
- Jiang, Y., Peng, G., Liu, W., 2009. Research on ontology-based integration of product knowledge for collaborative manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 49 (9-12), 1209–1221. doi:10.1007/s00170-009-2463-3
- Jun, H.-B., Kiritsis, D., Xirouchakis, P., 2007. Research issues on closed-loop PLM. *Computers in Industry* 58 (8-9), 855–868. doi:10.1016/j.compind.2007.04.001
- Kalaichelvi, V., 2012. Tool Wear Classification Using Fuzzy Logic for Machining of Al/SiC Composite Material. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science* 02 (02), 28–36. doi:10.4236/mnsms.2012.22003
- Kamrani, A.K., Sferro, P., Handelman, J., 1995. Critical issues in design and evaluation of computer aided process planing systems. *Computers & Industrial Engineering* 29 (1-4), 619–623. doi:10.1016/0360-8352(95)00144-P
- Karaouzene, M., Berradane, F.Z., 2013. La création d’une ontologie pharmaceutique. Thèse de Master de l’Université Abou Bakr Belkaid.
- Kiritsis, D., 1995. A review of knowledge-based expert systems for process planning. Methods and problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 10 (4), 240–262. doi:10.1007/BF01186876
- Koenig, D., 1990. Computer-integrated manufacturing: theory and practice, CRC Press. ed.

- Kosanke, K., 2005. ISO Standards for Interoperability : a comparison, in: Proceedings of the 1st International Conference on Interoperability of Enterprise Software and Applications. Geneva, Swiss, pp. 55–64.
- Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, B., Gostimirovic, M., 2013. Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. *Journal of Intelligent Manufacturing* 24 (4), 755–762. doi:10.1007/s10845-012-0623-z
- Kržič, P., Stoic, A., Kopač, J., 2009. STEP-NC: A new programming code for the CNC machines. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* 55 (6), 406–417.
- Kühnle, H., 2010. Distributed Manufacturing: Paradigm, Concepts, Solutions and Examples. Springer Verlag London.
- Kumar, C., Deb, S., 2012. Generation of Optimal Sequence of Machining Operations in Setup Planning By Genetic Algorithms. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* 11 (1), 67–80. doi:10.1142/S0219686712500059
- Kuo, T., Huang, S., Zhang, H., 2001. Design for manufacture and design for “X”: concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering* 41 (3), 241–260.
- Laguionie, R., Rauch, M., Hascoët, J.-Y., Suh, S.-H., 2011. An eXtended Manufacturing Integrated System for feature-based manufacturing with STEP-NC. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 24 (9), 785–799. doi:10.1080/0951192X.2011.592992
- Le Duigou, J., 2010. Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue : Application aux PME mécaniciennes. Thèse de doctorat de l’École Centrale de Nantes.
- Le Duigou, J., Bernard, A., Perry, N., 2011. Framework for Product Lifecycle Management integration in Small and Medium Enterprises networks. *Computer-Aided Design and applications* 8 (4), 531–544.
- Lee, J., Chae, H., Kim, C., Kim, K., 2009. Design of product ontology architecture for collaborative enterprises. *Expert Systems With Applications* 36 (2), 2300–2309. doi:10.1016/j.eswa.2007.12.042
- Lehaney, B., 2004. Beyond knowledge management. IGI Global.
- Lemaignan, S., Siadat, A., Dantan, J.-Y., Semenenko, A., 2006. MASON: A proposal for an ontology of manufacturing domain, in: Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications. pp. 195–200. doi:10.1109/DIS.2006.48
- Leung, H.C., 1996. Annotated bibliography on computer-aided process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 12 (5), 309–329. doi:10.1007/BF01179807

- Li, C., McMahon, C., Newnes, L., 2011. Progress with OntoCAD : A Standardised Ontological Annotation Approach to CAD Systems, in: International Conference on Product Lifecycle Management. Eindhoven, Netherlands, pp. 364–374.
- Li, C., McMahon, C., Newnes, L., Liu, Y., 2010. Ontology-Based Annotation in PLM Systems, in: International Conference on Product Lifecycle Management. Bremen, Germany.
- Lin, H.K., Harding, J. a., 2007. A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. *Computers in Industry* 58 (5), 428–437. doi:10.1016/j.compind.2006.09.015
- Loh, T.C., Koh, S.C.L., Simpson, M., 2006. An investigation of the value of becoming an extended enterprise. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 19 (1), 49–58. doi:10.1080/09511920500174356
- Lopez De Mantaras, R., 2001. Case-Based Reasoning, in: In Machine Learning and Its Applications. pp. 127–145.
- Mantripragada, R., Whitney, D.E., 1998. The datum flow chain: a systematic approach to assembly design and modeling. *Research in Engineering Design* 10 (3), 150–165.
- Marri, H.B., Gunasekaran, a., Grieve, R.J., 1998. Computer-aided process planning: A state of art. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 14 (4), 261–268. doi:10.1007/BF01199881
- Martin, L., Moraru, G., Véron, P., 2006. Development of an integrated tool for the foundry industry, in: 6th International Conference on Engineering, Design and Manufacturing in Mechanical (IDMME). Grenoble, France.
- Matsokis, A., Kiritsis, D., 2010. An ontology-based approach for Product Lifecycle Management. *Computers in Industry* 61 (8), 787–797. doi:10.1016/j.compind.2010.05.007
- Ming, X., Mak, K., Yan, J., 1999. A hybrid intelligent inference model for computer aided process planning. *Integrated Manufacturing Systems* 10 (6), 343–353.
- Nassehi, A., Newman, S.T., Allen, R.D., 2006a. The application of multi-agent systems for STEP-NC computer aided process planning of prismatic components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (5), 559–574. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.06.005
- Nassehi, A., Newman, S.T., Allen, R.D., 2006b. STEP-NC compliant process planning as an enabler for adaptive global manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22 (5-6), 456–467. doi:10.1016/j.rcim.2005.11.003
- Nassehi, A., Newman, S.T., Xu, X.W., Rosso, R.S.U., 2008. Toward interoperable CNC manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21 (2), 222–230. doi:10.1080/09511920701607899

- Newman, B., 2002. An Open Discussion of Knowledge Management [WWW Document]. The Knowledge Management Forum. URL http://www.km-forum.org/what_is.htm (accessed 3.1.15).
- Newman, S.T., Nassehi, A., Xu, X.W., Rosso, R.S.U., Wang, L., Yusof, Y., Ali, L., Liu, R., Zheng, L.Y., Kumar, S., Vichare, P., Dhokia, V., 2008. Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (6), 699–708. doi:10.1016/j.rcim.2008.03.002
- Nguyen Van, T., 2006. System engineering for collaborating data management systems : Application to design/simulation loop. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale Paris.
- Niebel, B., 1965. Mechanized process selection for planning new designs. *ASME papers* 737.
- Nonaka, I., Takeuchi, H., 1997. The knowledge-creating company., in: *The Economic Impact of Knowledge*. p. 183.
- Nosenzo, V., Tornincasa, S., Bonisoli, E., Brino, M., 2014. Open questions on Product Lifecycle Management (PLM) with CAD /CAE integration. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 8 (2), 91–107.
- Noy, N., Klein, M., 2004. Ontology Evolution: Not the Same as Schema Evolution. *Knowledge and Information Systems* 6 (4), 428–440. doi:10.1007/s10115-003-0137-2
- Noy, N.F., Hafner, C.D., 1997. The State of the Art in Ontology Design A Survey and Comparative Review. *AI Magazine* 18 (3), 53–74.
- Ouyang, H.B., 2014. Intelligent Cutting Tool Selection for Milling Based on STEP-NC Machining Features. *Applied Mechanics and Materials* 635 (2014), 589–593. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.589
- Özacar, T., Öztürk, Ö., Ünalir, M.O., 2011. ANEMONE: An environment for modular ontology development. *Data and Knowledge Engineering* 70 (6), 504–526. doi:10.1016/j.datak.2011.02.005
- Panetto, H., 2007. Towards a classification framework for interoperability of enterprise applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 8 (20), 727–740.
- Panetto, H., Dassisti, M., Tursi, A., 2012. ONTO-PDM: Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment. *Advanced Engineering Informatics* 26 (2), 334–348. doi:10.1016/j.aei.2011.12.002
- Patil, L., Member, S., Dutta, D., Sriram, R., Member, S., 2005. Ontology-Based Exchange of Product Data Semantics. *Automation Science and Engineering* 2 (3), 213–225.
- Paviot, T., 2010. Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale Paris.

- Pisanelli, D.M., Gangemi, A., Steve, G., 2002. Ontologies and Information Systems : the Marriage of the Century ? *Software Methodologies, Tools and Techniques* 125–133.
- Pratt, M.J., 2005. ISO 10303 : the STEP Standard for Product data Exchange and its capabilities. *International Journal Product Lifecycle Management* 1 (1), 86–94.
- Rachuri, S., Baysal, M., Roy, U., Foufou, S., Bock, C., Fenves, S., Sriram, R., 2005a. Information models for product representation: core and assembly models. *International Journal of Product Development* 2 (3), 207–235.
- Rachuri, S., Fenves, S.J., Sriram, R.D., Wang, F., 2005b. A product information modeling framework for product lifecycle management. *Computer-Aided Design* 37 (13), 1399–1411. doi:10.1016/j.cad.2005.02.010
- Rao, L., Reichgelt, H., Osei-Bryson, K.-M., 2014. A Methodology for Developing High Quality Ontologies for Knowledge Management, in: *Knowledge Management for Development*. pp. 121–143. doi:10.1007/978-1-4899-7392-4
- Richard, J., Nguyen, V.K., 2004. STEP-NC: Une interface intelligente pour l'intégration CAO-FAO-MOCN, in: *EIG. HES-SO Geneva, Switzerland*.
- Ridwan, F., Xu, X.W., 2013. Advanced CNC system with in-process feed-rate optimisation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (3), 12–20. doi:10.1016/j.rcim.2012.04.008
- Scholl, H.J., Kubicek, H., Cimander, R., 2011. Interoperability, enterprise architectures, and IT governance in government. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 6846, 345–354. doi:10.1007/978-3-642-22878-0_29
- Serban, A.M., Luan, J., 2002. Overview of Knowledge Management. *New Directions for Institutional Research* 113, 5–16. doi:10.1002/ir.34
- Steudel, H.J., 1984. Computer-aided process planning: past, present and future. *International Journal of Production Research* 22 (2), 253–266. doi:10.1080/00207548408942452
- Suh, S.-H., Shin, S.-J., Yoon, J.-S., Um, J.-M., 2008. UbiDM: A new paradigm for product design and manufacturing via ubiquitous computing technology. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21 (5), 540–549. doi:10.1080/09511920802023012
- Tan, A.R., Matzen, D., McAloone, T.C., Evans, S., 2010. Strategies for designing and developing services for manufacturing firms. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3 (2), 90–97. doi:10.1016/j.cirpj.2010.01.001
- Tao, F., Zhang, L., Venkatesh, V.C., Luo, Y., Cheng, Y., 2011. Cloud manufacturing: a computing and service-oriented manufacturing model. *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 225 (10), 1969–1976. doi:10.1177/0954405411405575
- Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., Kiritsis, D., 2010. Product lifecycle management – from its history to its new role. *International Journal of Product Lifecycle Management* 4 (4), 360. doi:10.1504/IJPLM.2010.036489
- Torres-Treviño, L.M., Escamilla-Salazar, I.G., González-Ortíz, B., Praga-Alejo, R., 2013. An expert system for setting parameters in machining processes. *Expert Systems with Applications* 40 (17), 6877–6884. doi:10.1016/j.eswa.2013.06.051
- Troussier, N., 2000. A Way to Identify and Manage the Knowledge Provided by Mechanical Simulations in Engineering Design. *Computing and Information Systems* 7 (3), 79–84.
- Uschold, M., Jasper, R., 1999. A Framework for Understanding and Classifying Ontology Applications, in: *In Proceedings of the IJCAI-99 Workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods (KRR5)*. Stockholm, Sweden, pp. 1–12.
- Valilai, O., Houshmand, M., 2010. INFELT STEP: An integrated and interoperable platform for collaborative CAD/CAPP/CAM/CNC machining systems based on STEP standard. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 23 (11), 1097–1117.
- Van Der Veer, H., Wiles, A., 2008. Achieving Technical Interoperability - the ETSI Approach.
- Vegetti, M., Leone, H.P., Henning, G.P., Gimenez, D.M., 2008. PProduct ONTOlogy : Defining product-related concepts for logistics planning activities. *Computers in Industry* 59 (2), 231–241. doi:10.1016/j.compind.2007.06.019
- Vernadat, F., 1996. *Enterprise Modelling and Integration: principles and applications*. Chapman & Hall, ISBN 0 412 60550 3.
- Vernadat, F., 2010. Technical, semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking. *Annual Reviews in Control* 34 (1), 139–144. doi:10.1016/j.arcontrol.2010.02.009
- Virtuoso universal server® [WWW Document], n.d. URL <http://virtuoso.openlinksw.com/> (accessed 6.1.15).
- Vosgien, T., 2014. *Ingénierie Systèmes basée sur les Modèles appliquée à la Gestion et l’Intégration des données de Conception et de Simulation: application aux métiers d’intégration et de si- mulation de systèmes aéronautiques complexes*. Thèse de doctorat de l’Ecole Centrale Paris.
- Wang, X.V., Xu, X.W., 2012. DIMP: an interoperable solution for software integration and product data exchange. *Enterprise Information Systems* 6 (3), 291–314. doi:10.1080/17517575.2011.587544

- Wang, X.V., Xu, X.W., 2013. A collaborative product data exchange environment based on STEP. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 28(1), 37–41. doi:10.1080/0951192X.2013.785028
- Wegner, P., 1996. Interoperability. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28 (1), 285–287.
- Wiederhold, G., 1992. Mediators in the Architecture of Future Information Systems Gio Wiederhold. *The IEEE Computer Magazine* 25 (3), 1–38.
- Xiao, W., Zheng, L., Huan, J., Lei, P., 2015. A complete CAD/CAM/CNC solution for STEP-compliant manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 31, 1–10. doi:10.1016/j.rcim.2014.06.003
- Xu, S., Anwer, N., Lavernhe, S., 2014. Conversion of G-code part programs into STEP-NC, in: *Proceedings of Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing*. 18-20 June 2014, Toulouse, France.
- Xu, X.W., 2006. Realization of STEP-NC enabled machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22 (2), 144–153. doi:10.1016/j.rcim.2005.02.009
- Xu, X.W., Wang, H., Mao, J., Newman, S.T., Kramer, T.R., Proctor, F.M., Michaloski, J.L., 2005. STEP-compliant NC research: the search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration. *International Journal of Production Research* 43 (17), 3703–3743. doi:10.1080/00207540500137530
- Xu, X.W., Wang, L., Newman, S.T., 2011. Computer-aided process planning: a critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24 (1), 1-31. doi:10.1080/0951192x.2010.518632
- Xu, X.W., Wang, L., Rong, Y., 2006. STEP-NC and function blocks for interoperable manufacturing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 3 (3), 297–308. doi:10.1109/TASE.2005.862147
- Yildiz, A.R., 2013. Cuckoo search algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64 (1-4), 55–61. doi:10.1007/s00170-012-4013-7
- Yoo, S.B., Kim, Y., 2002. Web-based knowledge management for sharing product data in virtual enterprises. *International Journal of Production Economics* 75, 173–183.
- Yusof, Y., Latif, K., 2014. Survey on computer-aided process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-014-6073-3
- Zhang, X., Nassehi, a., Newman, S.T., 2015. A meta-model of computer numerical controlled part programming languages. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 229 (7), 1243–1257. doi:10.1177/0954405415585084

- Zhang, X., Nassehi, A., Newman, S.T., 2014. Feature recognition from CNC part programs for milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70 (1-4), 397–412. doi:10.1007/s00170-013-5275-4
- Zhao, F., Xu, X., Xie, S., 2008. STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (2), 200–216. doi:10.1016/j.rcim.2006.10.004
- Zhou, L., 2007. Ontology learning : state of the art and open issues. *Information Technology and Management* 8 (3), 241–252. doi:10.1007/s10799-007-0019-5

Annexes

Annexe A : Programme STEP-NC du cas d'illustration

ISO-10303-21;

HEADER;

```
FILE_DESCRIPTION(('ISO 14649-11 EXAMPLE 1',
  'SIMPLE PROGRAM WITH A PLANAR_FACE, A POCKET, AND A ROUND_HOLE'),
  '1');
FILE_NAME('PART0_FEATURE.STP',
  '2014-06-30',
  ('XU'),
  ('LURPA'),
  '$',
  'ISO 14649',
  '$');
FILE_SCHEMA(('MACHINING_SCHEMA','MILLING_SCHEMA'));
ENDSEC;
```

DATA;

```
#0= PROJECT('EXECUTE EXAMPLE1',#1,(#2),$,$,$);
#1= WORKPLAN('MAIN WORKPLAN',(#10,#11,#12,#13,#14),$,$,$);
#2= WORKPIECE('CUBOID WORKPIECE',$,0.01,$,$,$,($91,$92,$93,$94));
#3= SETUP('MAIN SETUP',#62,#60,(#4));
#4= WORKPIECE_SETUP(#2,#63,$,$,$,());

#10= MACHINING_WORKINGSTEP('WS FINISH PLANAR FACE1',#60,#20,#31,$);
#11= MACHINING_WORKINGSTEP('WS DRILL HOLE1',#60,#21,#32,$);
#12= MACHINING_WORKINGSTEP('WS REAM HOLE1',#60,#21,#33,$);
#13= MACHINING_WORKINGSTEP('WS ROUGH POCKET1',#60,#22,#34,$);
#14= MACHINING_WORKINGSTEP('WS FINISH POCKET1',#60,#22,#35,$);

#20= PLANAR_FACE('PLANAR FACE',#2,(#31),#64,#65,#23,#24,$,());
#21= ROUND_HOLE('HOLE1 D=22MM',#2,(#32,#33),#67,#70,#111,$,#25);
#22= CLOSED_POCKET('POCKET1',#2,(#34,#35),#69,#71,(),$,#26,$,#112,#27);
#23= LINEAR_PATH($,#110,#83);
#24= LINEAR_PROFILE($,#101);
#25= THROUGH_BOTTOM_CONDITION();
#26= PLANAR_POCKET_BOTTOM_CONDITION();
#27= RECTANGULAR_CLOSED_PROFILE($,#113,#114);

#31= PLANE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH PLANAR FACE1',15.00,$,#40,#50,#51,$,
  #52,#52,#53,2.50,$);
#32= DRILLING($,$,'DRILL HOLE1',15.00,$,#44,#54,#51,$,$,$,$,#55);
#33= REAMING($,$,'REAM HOLE1',15.00,$,#47,#54,#51,$,$,$,$,#56,.T.,$,$);
#34= BOTTOM_AND_SIDE_ROUGH_MILLING($,$,'ROUGH POCKET1',15.00,$,#40,#57,#51,
  $,$,$,#58,6.50,5.00,1.00,0.50);
#35= BOTTOM_AND_SIDE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH POCKET1',15.00,$,#40,#57,
  #51,$,$,$,#59,2.00,10.00,$,$);
```

```

#40= MILLING_CUTTING_TOOL('ENDMILL_18MM',#41,(#43),80.00,$,$);
#41= TAPERED_ENDMILL(#42,4,.RIGHT.,.F.,$,$);
#42= MILLING_TOOL_DIMENSION(18.00,$,$,29.0,0.0,$,$);
#43= CUTTING_COMPONENT(100.00,$,$,$,$);
#44= MILLING_CUTTING_TOOL('SPIRAL_DRILL_20MM',#45,(#43),90.00,$,$);
#45= TWIST_DRILL(#46,2,.RIGHT.,.F.,0.84);
#46= MILLING_TOOL_DIMENSION(20.00,31.00,0.10,45.00,2.00,5.00,8.00);
#47= MILLING_CUTTING_TOOL('REAMER_22MM',#48,(#43),100.00,$,$);
#48= TAPERED_REAMER(#49,6,.RIGHT.,.F.,$,$);
#49= MILLING_TOOL_DIMENSION(22.00,$,$,40.0,$,$,$);

#50= MILLING_TECHNOLOGY(0.04,.TCP.,$,-12.00,$,.F.,.F.,.F.,$);
#51= MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,$,.F.,$,(.T.,$,$,()));
#52= PLUNGE_TOOLAXIS($);
#53= BIDIRECTIONAL_MILLING(0.05,.T.,#83,.LEFT.,$);
#54= MILLING_TECHNOLOGY(0.03,.TCP.,$,-18.00,$,.F.,.F.,.F.,$);
#55= DRILLING_TYPE_STRATEGY(0.75,0.50,2.00,0.50,0.75,8.00);
#56= DRILLING_TYPE_STRATEGY($,$,$,$,$,$);
#57= MILLING_TECHNOLOGY(0.04,.TCP.,$,-20.00,$,.F.,.F.,.F.,$);
#58= CONTOUR_PARALLEL($,$,.CW.,.CONVENTIONAL.);
#59= CONTOUR_PARALLEL(0.05,.T.,.CW.,.CONVENTIONAL.);

#60= PLANE('SECURITY PLANE',#61);
#61= AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE1',#90,#81,#82);
#62= AXIS2_PLACEMENT_3D('SETUP1',#80,#81,#82);
#63= AXIS2_PLACEMENT_3D('CUBOID WORKPIECE',#80,#81,#82);
#64= AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANAR FACE1',#95,#81,#82);
#65= PLANE('PLANAR FACE1-DEPTH PLANE',#66);
#66= AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANAR FACE1',#96,#81,#82);
#67= AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE1',#97,#81,#82);
#68= AXIS2_PLACEMENT_3D('DEPTH PLANE',#98,#81,#82);
#69= AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET1',#99,#81,#83);
#70= PLANE('DEPTH SURFACE FOR ROUND HOLE1',#68);
#71= PLANE('DEPTH SURFACE FOR POCKET1',#68);
#80= CARTESIAN_POINT('ORIGIN',(0.00,0.00,0.00));
#81= DIRECTION('K-VECTOR',(0.00,0.00,1.00));
#82= DIRECTION('I-VECTOR',(1.00,0.00,0.00));
#83= DIRECTION('J-VECTOR',(0.00,1.00,0.00));
#90= CARTESIAN_POINT('SECURITY PLANE:LOCATION',(0.00,0.00,100.00));
#91= CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P1',(0.00,20.00,25.00));
#92= CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P2',(100.00,20.00,25.00));
#93= CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P3',(0.00,100.00,25.00));
#94= CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P4',(100.00,100.00,25.00));
#95= CARTESIAN_POINT('PLANAR FACE1:LOCATION ',(0.00,0.00,5.00));
#96= CARTESIAN_POINT('PLANAR FACE1:DEPTH ',(0.00,0.00,-5.00));
#97= CARTESIAN_POINT('HOLE1:LOCATION',(20.00,60.00,0.00));
#98= CARTESIAN_POINT('FEATURE DEPTH',(0.00,0.00,-30.00));
#99= CARTESIAN_POINT('POCKET1:LOCATION ',(70.00,70.00,0.00));

```

```
#101= NUMERIC_PARAMETER('PROFILE LENGTH',100.00,'MM');  
#110= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(120.00,#115);  
#111= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(22.00,#115);  
#112= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(10.00,#116);  
#113= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(50.00,#116);  
#114= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(80.00,#116);  
#115= PLUS_MINUS_VALUE(0.30,0.30,3);  
#116= PLUS_MINUS_VALUE(0.10,0.10,3);  
ENDSEC;
```


Annexe B : Programme STEP-NC du cas d'étude

ISO-10303-21;

HEADER;

```
FILE_DESCRIPTION(('SPRING EXAMPLE',
  'PROGRAM WITH STEP-NC FEATURES'),
  '1');
FILE_NAME('SPRING_PART_FEATURE.STP',
  '2015-09-25',
  ('XU'),
  ('LURPA'),
  '$',
  'ISO 14649',
  '$');
FILE_SCHEMA(('MACHINING_SCHEMA','MILLING_SCHEMA'));
ENDSEC;
```

DATA;

```
#1=PROJECT('SPRING EXAMPLE',#2,(#3),$,$,$);
#2=WORKPLAN('MAIN
WORKPLAN',(#10,#11,#12,#13,#14,#15,#16,#17,#18,#19,#20,#21,#22,#23,#24,#25,#26,#27,#28,#29),$,$,$);
#3=WORKPIECE('BLOCK WORKPIECE',$,$,0.1,$,$,$,($10001,#10002,#10003,#10004));
#4=SETUP('MAIN SETUP',#10005,#10006,(#5));
#5=WORKPIECE_SETUP(#3,#10007,$,$,());

#10=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_PLAIE_HORIZONTAL_TOP',#10006,#1000,#1050,$);
#11=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10006,#1100,#1150,$);
#12=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_PLAIE_INCLINED_CONER',#10006,#1200,#1250,$);
#13=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10006,#1300,#1350,$);
#14=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_POCKET_RECTANGULAR',#10006,#1400,#1450,$);
#15=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_POCKET_CONE',#10006,#1500,#1550,$);
#16=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_DOME',#10006,#1600,#1650,$);
#17=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_SIDE_SLOT',#10006,#1700,#1750,$);
#18=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_TROU17_ON_TOP_PLAIN',#10006,#2200,#2250,$);
#19=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_TROU16_ON_TOP_PLAIN',#10006,#2300,#2350,$);
#20=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_TROU18_ON_TOP_PLAIN',#10006,#2400,#2450,$);
#21=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10006,#2500,#2550,$);
#22=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10006,#2600,#2650,$);
#23=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10006,#2700,#2750,$);
#24=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10006,#2800,#2850,$);
#25=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10006,#2900,#2950,$);
#26=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10006,#3000,#3050,$);
#27=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',#10006,#3100,#3150,$);
#28=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',#10006,#3200,#3250,$);
#29=MACHINING_WORKINGSTEP('WS_HOLE5_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',#10006,#3300,#3350,$);
```

```

/****clamping positions: #10001,#10002,#10003,#10004****/
#10001=CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P1',(-65.,560.,401.));
#10002=CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P2',(60.,560.,401.));
#10003=CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P3',(-60.,680.,401.));
#10004=CARTESIAN_POINT('CLAMPING_P4',(60.,680.,401.));

/****#10005:setup's origin, defined relative to machine coordinate system
#10006:security plane for the whole setup, measured from origin of setup****/
#10005=AXIS2_PLACEMENT_3D('SETUP1',#10008,#10009,#10010);
#10006=PLANE('SECURITY PLANE',#10011);
#10007=AXIS2_PLACEMENT_3D('BLOCK WORKPIECE',#10013,#10009,#10010);
#10008=CARTESIAN_POINT('ORIGIN',(0,0,0));
#10009=DIRECTION('K-VECTOR',(0,0,1.));
#10010=DIRECTION('I-VECTOR',(1.,0,0));
#10011=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE1',#10012,#10009,#10010);
#10012=CARTESIAN_POINT('SECURITY PLANE:LOCATION',(0,0,500.)); /*this z-value should be >481. by rawpiece
height*/
#10013=CARTESIAN_POINT('ORIGIN',(0,0,0));

#50=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL100_FACEMILL',#51,(#52),160.,$,,$);/*overall_assembly_length 160.*
/*rough milling top face. overall_assembly_length 160.*
#51=FACEMILL(#53,12.,RIGHT.,.F.,$,,$);/*number_of_teeth 12*/
#52=CUTTING_COMPONENT(50.,$,,$,$);/*tool_offset_length*/
#53=MILLING_TOOL_DIMENSION(80.,$,,$,30.,0,$,$);/*diameter 80; cutting_edge_length 30.*

#60=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL102_FACEMILL',#61,(#62),160,$,$);/*finish milling top face*/
#61=FACEMILL(#53,18.,RIGHT.,.F.,$,,$);
#62=CUTTING_COMPONENT(50.,$,,$,$);
#63=MILLING_TOOL_DIMENSION(80.,$,,$,30.,0,$,$);

#70=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL103_ENDMILL',#71,(#72),80.,$,,$);/*rough milling pocket, cone*/
#71=TAPERED_ENDMILL(#73,4.,RIGHT.,.F.,$,,$);
#72=CUTTING_COMPONENT(40.,$,,$,$);
#73=MILLING_TOOL_DIMENSION(16.,$,,$,30.,0,$,$);

#80=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL104_BALL_ENDMILL',#81,(#82),80.,$,,$);/*finish dome*/
#81=BALL_ENDMILL(#83,4.,RIGHT.,.F.,$,,$);
#82=CUTTING_COMPONENT(40.,$,,$,$);
#83=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.,0,0,30.,5.,5.,0);/*ball_endmill*/

#90=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL105_SIDEMILL',#91,(#92),18.,$,,$);
/*cut side slot. The slot 18mm wide,so this cutter's overall_assembly_length is the same*/
#91=SIDE_MILL(#93,4.,RIGHT.,.F.,$,,$);
#92=CUTTING_COMPONENT(10.,$,,$,$);
#93=MILLING_TOOL_DIMENSION(50.,$,,$,18.,0,$,$);/*cutting_edge_length is same as the slot's width*/

#100=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL106_TWIST_DRILL',#101,(#102),100.,$,,$);
#101=TWIST_DRILL(#103,2.,RIGHT.,.F.,0.84);
#102=CUTTING_COMPONENT(20.,$,,$,$);

```

```

#103=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.,31.,0.1,40.,2.,5.,8.);/*diameter of the hole to be drilled: 12*/

#110=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL107_TWIST_DRILL',#111,(#112),120.,$,,$);/*for deep drilling*/
#111=TWIST_DRILL(#113,2.,RIGHT.,.F.,0.84);
#112=CUTTING_COMPONENT(20.,$,,$,$);
#113=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.,31.,0.1,50.,2.,5.,8.);/*cutting_edge_length 50*/

#120=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL108_COUNTERSINK',#121,(#122),80.,$,,$);
#121=COUNTERSINK(#123,4.,RIGHT.,.F.,0.84);
#122=CUTTING_COMPONENT(20.,$,,$,$);
#123=MILLING_TOOL_DIMENSION(15.,$, $,10.,$, $,$);

#130=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL109_TAPERED_ENDMILL',#131,(#132),80.,$,,$);/*chamfer pocket&hole
edges*/
#131=TAPERED_ENDMILL(#133,4.,RIGHT.,.F.,$, $);
#132=CUTTING_COMPONENT(40.,$, $,$,$);
#133=MILLING_TOOL_DIMENSION(15.,0,0,30.,2.5,2.5,12.5);/*The cutter's chamfer:2.5X2.5X45degrees*/

#140=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL169_REAMER',#141,(#142),80.,$,,$);/*or reamer*/
#141=TAPERED_REAMER(#143,6.,RIGHT.,.F.,$);
#142=CUTTING_COMPONENT(20.,$, $,$,$);
#143=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.25.,$, $,50.,$, $,$);

#150=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL115_TAP',#151,(#152),80.,$,,$);
#151=TAPERED_TAP(#153,2.,RIGHT.,.F.,0.84);
#152=CUTTING_COMPONENT(20.,$, $,$,$);
#153=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.25,0,0,30.,$, $,$);/*pitch 1.75*/

#160=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL120_MILLING_CUTTER',#161,(#162),80.,$,,$);/*for milling threads*/
#161=TAPERED_ENDMILL(#163,4.,RIGHT.,.F.,$, $);
#162=CUTTING_COMPONENT(20.,$, $,$,$);
#163=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.25,0,0,50.,0.,$, $);

#170=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL132_TWIST_DRILL',#171,(#172),50.,$,,$);
#171=TWIST_DRILL(#173,2.,RIGHT.,.F.,0.84);
#172=CUTTING_COMPONENT(20.,$, $,$,$);
#173=MILLING_TOOL_DIMENSION(12.,31.,0.1,25.,2.,5.,8.);

#180=MILLING_CUTTING_TOOL('OUTIL170_TWIST_DRILL',#180,(#182),80.,$,,$);
#181=TWIST_DRILL(#183,2.,RIGHT.,.F.,0.84);
#182=CUTTING_COMPONENT(20.,$, $,$,$);
#183=MILLING_TOOL_DIMENSION(10.,31.,0.1,50.,2.,5.,8.);

#1000=PLANAR_FACE("PLAIE_HORIZONTAL_TOP",#3,(#1050),#10101,#10102,#1001,#1002,$,(#1800,#1900));
#1001= LINEAR_PATH($,#10108,#10010);/*Define the plain's length(x-axis direction)*/
#1002= LINEAR_PROFILE($,#10109);/*Define the plain's with(y-axis direction)*/

#1050= PLANE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH PLANE_HORIZONTAL_TOP',10.,$, #50,#1051,#1052,$,
#1053,#1053,#1054,.50,$);

```

```

#1051= MILLING_TECHNOLOGY(0.04,.TCP,,$,-12.,$,F.,F.,F.,$);
#1052= MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,F.,$,(.T.,$,,$,()));
#1053= PLUNGE_TOOLAXIS($);
#1054= BIDIRECTIONAL_MILLING(0.1,.T.,#10189,.LEFT.,$);

#1100=PLANAR_FACE("PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y",#3,(#1150),#10120,#10121,#1101,#1102,$,());
#1101= LINEAR_PATH($,#10129,#10010);/*Define the plain's length(x-axis direction)*/
#1102= LINEAR_PROFILE($,#10109);/*Define the plain's with(y-axis direction)*/
#1150= PLANE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',10.,$, #60,#1051,#1052,$,
    #1053,#1053,#1054,.50,$);

#1200=PLANAR_FACE("PLANE_INCLINED_CORNER",#3,(#1250),#10130,#10131,#1201,#1202,$,());
#1201=LINEAR_PATH($,#10039,#10010);
#1202=LINEAR_PROFILE($,#10138);
#1250= PLANE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH PLANE_INCLINED_CORNER',10.,$, #60,#1051,#1052,$,
    #1053,#1053,#1054,.50,$);

#1300=PLANAR_FACE("PLANE_INCLINED_PARALLEL_X",#3,(#1350),#10140,#10141,#1301,#1302,$,());
#1301=LINEAR_PATH($,#10049,#10010);
#1302=LINEAR_PROFILE($,#10148);
#1350= PLANE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',10.,$, #60,#1051,#1052,$,
    #1053,#1053,#1054,.50,$);

#1400=CLOSED_POCKET("POCKET_RECTANGULAR",#3,(#1450),#10150,#10151,(#2000),$, #1401,$, #1402,#1403
);
#1401=PLANAR_POCKET_BOTTOM_CONDITION();
#1402=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(18.00,#10159);
#1403=RECTANGULAR_CLOSED_PROFILE($,#10157,#10158);

#1450= BOTTOM_AND_SIDE_ROUGH_MILLING($,$,'MACHINING
POCKET_RECTANGULAR',15.00,$, #70,#1451,#1452,
    $,$,$,#1453,2.,10.,$, $);
#1451= MILLING_TECHNOLOGY(0.04,.TCP,,$,-20.,$,F.,F.,F.,$);
#1452= MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,F.,$,(.T.,$,,$,()));
#1453= CONTOUR_PARALLEL($,$,.CW.,.CONVENTIONAL.);

#1500=CLOSED_POCKET("POCKET_CONE",#3,(#1550),#10160,#10161,(),$, #1401,$,$, #1501);
#1501=CIRCULAR_CLOSED_PROFILE($,#10167);
/*It is not a 2.5D manufacturing feature. Use TOOLPATH_FEATURE*/
#1550=BOTTOM_AND_SIDE_ROUGH_MILLING($,$,'MACHINING POCKET_CONE',15.00,$, #70,#1451,#1452,
    $,$,$,#1453,2.,10.,$, $);

#1600=SPHERICAL_CAP("DOME",#3,(#1650),#10170,#10171,#1601,#1602);
#1601=NUMERIC_PARAMETER('INTERNAL_ANGLE',180,'DEGREE');
#1602=NUMERIC_PARAMETER('RADIUS',16,'MM');
#1650=BOTTOM_AND_SIDE_FINISH_MILLING($,$,'MACHINING
DOME',15.00,$, #80,#1451,#1452,$,$,$, #1651,1.5.,10.,$, $);
#1651= CONTOUR_PARALLEL(0.05, .T., .CW., .CONVENTIONAL.);

```

```

#1700=SLOT("SIDE_SLOT",#3,(#1750),#10180,#10181,#1701,#1702,(#1703,#1704));
#1701=LINEAR($,#10188,#10189);
#1702=SQUARE_U_PROFILE($,#10190,#10191,0,#10191,0);
#1703=WOODRUFF_SLOT_END_TYPE(#10187);
#1704=WOODRUFF_SLOT_END_TYPE(#10187);
#1750=BOTTOM_AND_SIDE_FINISH_MILLING($,$,'MACHINING
SIDE_SLOT',15.00,$,#90,#1451,#1452,$,$,$,#1651,1.,10.,$,$);

#1800=BOSS("BOSS1_ON_PLAIN_TOP",#3,($),#10194,#10195,#1801,$);
#1801=CIRCULAR_CLOSED_PROFILE($,#10199);

#1900=BOSS("BOSS2_ON_PLAIN_TOP",#3,($),#10201,#10202,#1901,$);
#1901=CIRCULAR_CLOSED_PROFILE($,#10199);

#2000=BOSS("BOSS_IN_POCKET",#3,($),#10210,#10211,#2001,$);
#2001=CIRCULAR_CLOSED_PROFILE($,#10215);

#2100=CHAMFER("CHAMFER_ON_POCKET_RECTANGULAR",#3,($),#1000,#1400,45.,#10220);

#2200=COMPOUND_FEATURE("TROU17_ON_TOP_PLAIN",#3,(#2250),#10221,(#3400,#3500,#3600));
#2250= DRILLING($,$,'TROU17_ON_TOP_PLAIN',15.00,$,#120,#2251,#2252,$,$,$,$,#2253);
#2251= MILLING_TECHNOLOGY(0.03,.TCP.,$,-15.,$,.F.,.F.,.F.,$);
#2252= MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,$,.F.,$,(.T.,$,$,()));
#2253= DRILLING_TYPE_STRATEGY(0.75, 0.50, 2.00, 0.50,0.75, 8.00);

#2300=COMPOUND_FEATURE("TROU16_ON_TOP_PLAIN",#3,(#2350),#10226,(#3700,#3800,#3900));
#2350=DRILLING($,$,'TROU16_ON_TOP_PLAIN',15.00,$,#120,#2251,#2252,$,$,$,$,#2253);

#2400=COMPOUND_FEATURE("TROU18_ON_TOP_PLAIN",#3,(#2450),#10230,(#4000,#4100,#4200));
#2450=DRILLING($,$,'TROU18_ON_TOP_PLAIN',15.00,$,#120,#2251,#2252,$,$,$,$,$,#2253);

#2500=ROUND_HOLE("HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y",#3,(#2550),#10300,#10301,#10302,$,#250
1);
#2501=CONICAL_HOLE_BOTTOM(30.,$);
#2550=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',12.00,$,#170,#2551,#2552,$,$,$,$,$,#2553);
#2551= MILLING_TECHNOLOGY(0.03,.TCP.,$,-10.,$,.F.,.F.,.F.,$);
#2552= MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,$,.F.,$,(.T.,$,$,()));
#2553= DRILLING_TYPE_STRATEGY(0.75, 0.50, 2., 0.50,0.75, 1.89);

#2600=ROUND_HOLE("HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y",#3,(#2650),#10306,#10301,#10302,$,#250
1);
#2650=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',12.00,$,#170,#2551,#2552,$,$,$,$,$,#2553);

#2700=ROUND_HOLE("HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y",#3,(#2750),#10330,#10331,#10332,$,#2
501);
#2750=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',10.00,$,#180,#2551,#2552,$,$,$,$,$,#2753);
#2753= DRILLING_TYPE_STRATEGY(0.75, 0.50, 2., 0.50,0.75, 29.9);

```

```

#2800=ROUND_HOLE("HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X",#3,(#2850),#10310,#10301,#10302,$,#2501);
#2850=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',12.00,$,#170,#2551,#2552,$,$,$,$,#2553);

#2900=ROUND_HOLE("HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X",#3,(#2950),#10316,#10301,#10302,$,#2501);
#2950=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',12.00,$,#170,#2551,#2552,$,$,$,$,#2553);

#3000=ROUND_HOLE("HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X",#3,(#3050),#10340,#10331,#10332,$,#2501);
#3050=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',10.00,$,#180,#2551,#2552,$,$,$,$,#2753);

#3100=ROUND_HOLE("HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_CORNER",#3,(#3150),#10320,#10301,#10302,$,#2501);
#3150=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',12.00,$,#170,#2551,#2552,$,$,$,$,#2553);

#3200=ROUND_HOLE("HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_CORNER",#3,(#3250),#10326,#10301,#10302,$,#2501);
#3250=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',12.00,$,#170,#2551,#2552,$,$,$,$,#2553);

#3300=ROUND_HOLE("HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_CORNER",#3,(#3350),#10350,#10331,#10332,$,#2501);
#3350=DRILLING($,$,'DRILL
HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',10.00,$,#180,#2551,#2552,$,$,$,$,#2753);

#3400=ROUND_HOLE("CF1-TROU17:STRAIGHT",#3,(),#10235,#10236,#10237,$,#3401);
#3401=THROUGH_BOTTOM_CONDITION();

#3500=ROUND_HOLE("CF2-TROU17:TAPERED",#3,(),#10240,#10241,#10242,#3501,#3401);
#3501=ANGLE_TAPER(45.);

#3600=ROUND_HOLE("CF3-TROU17:CONICAL BOTTOM",#3,(),#10250,#10251,#10252,$,#3601);
#3601=CONICAL_HOLE_BOTTOM(30.,$);

#3700=ROUND_HOLE("CF2-TROU16:STRAIGHT",#3,(),#10255,#10256,#10257,$,#3401);

#3800=ROUND_HOLE("CF2-TROU16:TAPERED",#3,(),#10260,#10261,#10262,#3501,#3401);

#3900=ROUND_HOLE("CF2-TROU16:CONICAL BOTTOM",#3,(),#10270,#10271,#10272,$,#3601);

#4000=ROUND_HOLE("CF3-TROU18:STRAIGHT",#3,(),#10275,#10276,#10277,$,#3401);

#4100=ROUND_HOLE("CF3-TROU18:TAPERED",#3,(),#10280,#10281,#10282,#3501,#3401);

#4200=ROUND_HOLE("CF3-TROU18:CONICAL BOTTOM",#3,(),#10290,#10291,#10292,$,#3601);

```

```

#10101=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLACEMENT_PLANE_TOP:PLACEMENT',#10105,#10009,#10010);
/*By the standard,z-value of placement should be greater than z-value of depth*/
#10102=PLANE('PLAIN_TOP:DEPTH',#10106);
#10105=CARTESIAN_POINT('PLAIN_TOP:LOCATION',(0,0,40.));
#10106=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLAIN_TOP:DEPTH PLAIN',#10107,#10009,#10010);
#10107=CARTESIAN_POINT('PLAIN_TOP:DEPTH-Z',(0,0,-4.));
/*Z value should be the plane's z-value before to cut*/
#10108=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(210.,#10110);
#10109=NUMERIC_PARAMETER('PROFILE WIDTH',160.,'MM');
#10110=PLUS_MINUS_VALUE(0.3,0.3,3);

#10120=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:PLACEMENT',#10122,#10123,#10124);
#10121=PLANE('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:DEPTH',#10125);
#10122=CARTESIAN_POINT('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:LOCATION',(200.,0,36.));
#10123=DIRECTION('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:NORMAL_VECTOR-Z',(0.5,0,0.866));
#10124=DIRECTION('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:REF-VECTOR-X',(0.866,0,-0.5));
#10125=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:DEPTH PLAIN',#10126,#10009,#10010);
#10126=CARTESIAN_POINT('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:DEPTH',(0,0,-18.));/*to lowest point*/
#10129=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(47.34,#10110);

#10130=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE_INCLINED_CORNER:PLACEMENT',#10132,#10133,#10134);
#10131=PLANE('PLANE_INCLINED_CORNER:DEPTH',#10135);
#10132=CARTESIAN_POINT('PLANE_INCLINED_CORNER:LOCATION',(164.,150,36.));
#10133=DIRECTION('PLANE_INCLINED_CORNER:NORMAL_VECTOR-Z',(0.25,0.433,0.866));
#10134=DIRECTION('PLANE_INCLINED_CORNER:REF-VECTOR-X',(0.866,0,-0.5));
#10135=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:DEPTH PLAIN',#10136,#10009,#10010);
#10136=CARTESIAN_POINT('PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:DEPTH',(0,0,-31.93));/*to lowest point*/
#10138=NUMERIC_PARAMETER('PROFILE WIDTH',43.08,'MM');
#10139=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(48.26,#10110);

#10140=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:PLACEMENT',#10142,#10143,#10010);
#10141=PLANE('PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:DEPTH',#10145);
#10142=CARTESIAN_POINT('PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:LOCATION',(0,150,36.));
#10143=DIRECTION('PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:NORMAL_VECTOR-Z',(0,0.5,0.866));
#10145=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:DEPTH PLAIN',#10146,#10009,#10010);
#10146=CARTESIAN_POINT('PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:DEPTH',(0,0,-18.));/*to lowest point*/
#10148=NUMERIC_PARAMETER('PROFILE WIDTH',47.34,'MM');
#10149=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(161.39,#10110);

#10150=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_RECTANGULAR:PLACEMENT',#10152,#10009,#10010);
#10151=PLANE('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH',#10155);
#10152=CARTESIAN_POINT('POCKET_RECTANGULAR:LOCATION',(61.,58.5,36.));
#10155=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH PLAIN',#10156,#10009,#10010);
#10156=CARTESIAN_POINT('POCKET_RECTANGULAR:DEPTH-Z',(0,0,-26.));
#10157= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(84.,#10159);
#10158= TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(105.,#10159);
#10159=PLUS_MINUS_VALUE(0.1,0.1,3);

#10160=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_CONE:PLACEMENT',#10162,#10009,#10010);

```



```

#10161=PLANE('POCKET_CONE:DEPTH',#10165);
#10162=CARTESIAN_POINT('POCKET_CONE:LOCATION',(129.,30.,36.));
#10165=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_CONE:DEPTH PLAIN',#10166,#10009,#10010);
#10166=CARTESIAN_POINT('POCKET_CONE:DEPTH-Z',(0,0,-30.));
#10167=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(48.,#10159);

#10170=AXIS2_PLACEMENT_3D('DOME:PLACEMENT',#10172,#10009,#10010);
#10171=PLANE('DOME:DEPTH',#10175);
#10172=CARTESIAN_POINT('DOME:LOCATION',(61.,58.5,20.));
#10175=AXIS2_PLACEMENT_3D('POCKET_CONE:DEPTH PLAIN',#10176,#10009,#10010);
#10176=CARTESIAN_POINT('POCKET_CONE:DEPTH-Z',(0,0,-16.));

#10180=AXIS2_PLACEMENT_3D('SLOT:PLACEMENT',#10182,#10183,#10009);
#10181=PLANE('SLOT:DEPTH',#10185);
#10182=CARTESIAN_POINT('SLOT:LOCATION',(0,62.5,21.));
#10183=DIRECTION('NEGATIVE X-VECTOR',(-1.,0,0));
#10185=AXIS2_PLACEMENT_3D('SLOT:DEPTH PLAIN',#10186,#10183,#10009);
#10186=CARTESIAN_POINT('SLOT:DEPTH-X',(0,0,-18.));
#10187=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(25.,#10159);
#10188=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(75.,#10159);
#10189=DIRECTION('J-VECTOR',(0,1.,0));
#10190=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(18.,#10159);
#10191=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(0,#10159);

#10194=AXIS2_PLACEMENT_3D('BOSS1_ON_PLAIN_TOP:PLACEMENT',#10196,#10009,#10010);
#10195=PLANE('BOSS1_ON_PLAIN_TOP:DEPTH',#10197);
#10196=CARTESIAN_POINT('BOSS1_ON_PLAIN_TOP:LOCATION',(12.,12.,36.));
#10197=AXIS2_PLACEMENT_3D('BOSS1_ON_PLAIN_TOP:DEPTH PLAIN',#10198,#10009,#10010);
#10198=CARTESIAN_POINT('BOSS1_ON_PLAIN_TOP:DEPTH-Z',(0,0,-4.));
#10199=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(12.,#10159);

#10201=AXIS2_PLACEMENT_3D('BOSS2_ON_PLAIN_TOP:PLACEMENT',#10203,#10009,#10010);
#10202=PLANE('BOSS2_ON_PLAIN_TOP:DEPTH',#10204);
#10203=CARTESIAN_POINT('BOSS2_ON_PLAIN_TOP:LOCATION',(12.,102.,36.));
#10204=AXIS2_PLACEMENT_3D('BOSS2_ON_PLAIN_TOP:DEPTH PLAIN',#10205,#10009,#10010);
#10205=CARTESIAN_POINT('BOSS2_ON_PLAIN_TOP:DEPTH-Z',(0,0,-4.));

#10210=AXIS2_PLACEMENT_3D('BOSS_IN_POCKET:PLACEMENT',#10212,#10009,#10010);
#10211=PLANE('BOSS_IN_POCKET:DEPTH',#10213);
#10212=CARTESIAN_POINT('BOSS_IN_POCKET:LOCATION',(61.,58.5,10.));
#10213=AXIS2_PLACEMENT_3D('BOSS_IN_POCKET:DEPTH PLAIN',#10214,#10009,#10010);
#10214=CARTESIAN_POINT('BOSS_IN_POCKET:DEPTH-Z',(0,0,-10.));
#10215=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(32.,#10159);

#10220=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(0.5,#10159);

#10221=AXIS2_PLACEMENT_3D('COMPOUND_FEATURE:PLACEMENT',#10222,#10009,#10010);
#10222=CARTESIAN_POINT('COMPOUND_FEATURE:LOCATION',(122.,75.,36.));

```

```

#10226=AXIS2_PLACEMENT_3D('COMPOUND_FEATURE:PLACEMENT',#10227,#10009,#10010);
#10227=CARTESIAN_POINT('COMPOUND_FEATURE:LOCATION',(152.,75.,36.));

#10230=AXIS2_PLACEMENT_3D('COMPOUND_FEATURE:PLACEMENT',#10231,#10009,#10010);
#10231=CARTESIAN_POINT('COMPOUND_FEATURE:LOCATION',(152.,99.,36.));

#10235=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF1-TROU17:STRAIGHT',#10238,#10009,#10010);
#10236=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-5.,#10159);
#10237=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(15.,#10159);
#10238=CARTESIAN_POINT('CF1-TROU17:STRAIGHT:LOCATION',(122.,75.,36.));

#10240=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF1-TROU17:TAPERED',#10243,#10009,#10010);
#10241=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-2.375,#10159);
#10242=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(15.,#10159);
#10243=CARTESIAN_POINT('CF1-TROU17:TAPERED:LOCATION',(122.,75.,31.));

#10250=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF1-TROU17:CONICAL BOTTOM',#10253,#10009,#10010);;
#10251=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-22.53,#10159);
#10252=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(10.25,#10159);
#10253=CARTESIAN_POINT('CF1-TROU17:CONICAL BOTTOM:LOCATION',(122.,75.,28.625));

#10255=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF2-TROU16:STRAIGHT',#10258,#10009,#10010);
#10256=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-5.,#10159);
#10257=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(15.,#10159);
#10258=CARTESIAN_POINT('CF2-TROU16:STRAIGHT:LOCATION',(152.,75.,36.));

#10260=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF2-TROU16:TAPERED',#10643,#10009,#10010);
#10261=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-2.375,#10159);
#10262=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(15.,#10159);
#10263=CARTESIAN_POINT('CF2-TROU16:TAPERED:LOCATION',(152.,75.,31.));

#10270=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF2-TROU16:CONICAL BOTTOM',#10273,#10009,#10010);;
#10271=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-22.53,#10159);
#10272=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(10.25,#10159);
#10273=CARTESIAN_POINT('CF2-TROU16:CONICAL BOTTOM:LOCATION',(152.,75.,28.625));

#10275=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF3-TROU18:STRAIGHT',#10278,#10009,#10010);
#10276=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-5.,#10159);
#10277=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(15.,#10159);
#10278=CARTESIAN_POINT('CF3-TROU18:STRAIGHT:LOCATION',(152.,99.,36.));

#10280=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF3-TROU18:TAPERED',#10283,#10009,#10010);
#10281=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-2.375,#10159);
#10282=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(15.,#10159);
#10283=CARTESIAN_POINT('CF3-TROU18:TAPERED:LOCATION',(152.,99.,31.));

#10290=AXIS2_PLACEMENT_3D('CF3-TROU18:CONICAL BOTTOM',#10293,#10009,#10010);;
#10291=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-22.53,#10159);
#10292=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(10.25,#10159);

```

```

#10293=CARTESIAN_POINT('CF3-TROU18:CONICAL BOTTOM:LOCATION',(152.,99.,28.625));

#10300=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10303,#10123,#10124);
#10301=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-1.8909,#10159);
#10302=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(12.,#10159);
#10303=CARTESIAN_POINT('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:LOCATION',(192.205,57.,19.716));

#10306=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10307,#10123,#10124);
#10307=CARTESIAN_POINT('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y:LOCATION',(192.205,81.,19.716));

#10310=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10313,#10143,#10010);
#10313=CARTESIAN_POINT('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:LOCATION',(72.,121.795,31.5));

#10316=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10317,#10143,#10010);
#10317=CARTESIAN_POINT('HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X:LOCATION',(112.,142.579,19.5));

#10320=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',#10323,#10133,#10134);
#10323=CARTESIAN_POINT('HOLE1_ON_PLANE_INCLINED_CORNER:LOCATION',(166.279,141.843,17.882));

#10326=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',#10327,#10133,#10134);
#10327=CARTESIAN_POINT('HOLE2_ON_PLANE_INCLINED_CORNER:LOCATION',(187.063,129.843,17.882));

#10330=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',#10333,#10123,#10124);
#10331=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(-29.9,#10159);
#10332=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE(10.376,#10159);
#10333=CARTESIAN_POINT('HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_Y',(171.422,57.,31.715));

#10340=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',#10341,#10143,#10010);
#10341=CARTESIAN_POINT('HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_PARALLEL_X',(112.,121.795,31.5));

#10350=AXIS2_PLACEMENT_3D('HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',#10351,,#10133,#10134);
#10351=CARTESIAN_POINT('HOLE_M5_ON_PLANE_INCLINED_CORNER',(166.279,117.843,29.882));
ENDSEC;

```


Annexe C : Justification des choix OWL et Protégé

Pour permettre la mise en œuvre d'OntoSTEP-NC en respectant toutes les caractéristiques du programme d'usinage (paramètres machines, logique d'usinage, etc.), il est nécessaire de respecter la norme STEP-NC. C'est pourquoi pour réaliser une description complète de STEP-NC avec OntoSTEP-NC et pour ne perdre aucune information nécessaire au programme, il faut réaliser des choix de modélisation permettant une capitalisation complète des extractions des informations venant de la MOCN. Le premier choix à réaliser concerne le langage à utiliser pour conserver tous les liens du programme (par exemple entre une entité et ses dimensions). Le second choix se fait sur l'outil qui doit également permettre la création de tous les liens entre les entités, les paramètres et la logique programme.

I) Choix du langage : OWL

Les ontologies sont tout d'abord apparues en philosophie et se sont depuis quelques décennies étendues au domaine informatique. Ce domaine s'est attaché à définir les concepts et à assurer les relations entre ces concepts. Ainsi, de nombreux autres domaines ont profités des avancées concernant les ontologies : intelligence artificielle, génie logiciels, méthodes agiles ou encore la structuration des données. Les ontologies sont le plus souvent utilisées dans la résolution de problèmes puisqu'elles présentent une architecture qui permet une grande disponibilité de l'information (Noy and Klein, 2004).

Un benchmark sur les langages pour la modélisation ontologique révèle un grand nombre de solutions avec plus de 30 possibilités. De nombreux langages apparaissent comme spécifiques à des travaux scientifiques et spécialement développés pour ces applications. Dans cette section, nous réduirons la liste des langages aux solutions présentant plusieurs utilisations par la communauté internationale. Historiquement deux catégories de langages ontologiques sont distinguées (Karaouzene and Berradane, 2013):

- Les syntaxes traditionnelles qui proposent une modélisation des connaissances propres à un domaine en s'appuyant sur une logique de gestion de connaissances métiers. Ce langage propose une modélisation des différents domaines et permet une restitution rapide et complète des informations pour la résolution de problèmes. On

retrouve notamment les langages suivant : Frame-Logic (F-Logic); Open Knowledge Base Connectivity (OKBC); Knowledge Machine programming language (KM); Developing Ontology-Grounded Methods and Applications (DOGMA); KL-ONE; Renamed ABox and Concept Expression Reasonner (RACER); Common Logic (CL); Cyc Language (CyCL); Knowledge Interchange Format (KIF); KL-One; LOOM; Operational Conceptual Modelling Language (OCML); Parts LIBrary (PLIB).

- Les syntaxes supportant les instances XML aussi appelée "Markup ontology language" suivent quant à elles l'évolution des exigences. Ces structures ont été développées pour assurer le support des applications web et ainsi pouvoir fournir aux modèles ontologiques des interfaces de connexions. On note parmi les langages les plus commun : Simple HTML Ontology Extensions (SHOE); Ontology Inference Layer (OIL); DARPA Agent Markup Language + Ontology Inference Layer (DAML+OIL); Ontology Web Language (OWL); Resource Description Framework (RDF); Resource Description Framework Schema (RDFS).

Une classification en suivant les raisonneurs logiques intégrés dans chacun des langages peut également être proposée (Karaouzene and Berradane, 2013):

- Les "Frame-based logic" suivent une logique basée sur les classes de l'ontologie. Elles s'intéressent directement aux classes afin de fournir des informations explicites en proposant une structure orientée objet.
- Les "First-order logic-based" s'intéressent non-seulement aux informations explicites mais également aux informations implicites. Afin d'extraire les informations les plus pertinentes possibles en s'intéressant aux liens entre entités, cette méthodologie utilise des règles d'inférences qui permettent de retrouver l'information requises.
- Les "Description-logic based" proposent des raisonnements sur les axiomes qui relient les classes de l'ontologie entre elles. Ce raisonnement logique permet alors d'extraire des informations spécifiques avec précision.

Afin de déterminer le meilleur langage pour la modélisation d'OntoSTEP-NC, le Tableau 9 présenter une classification selon les deux aspects évoqués précédemment : les syntaxes et les raisonneurs logiques. Sous-forme de tableau à doubles entrées, les colonnes adressent les syntaxes ("Markup" ou "Traditional") et les lignes adressent les raisonneurs logiques (Frame-

based logic, First-order logic-based, Description logic-based) et une ligne pour ceux qui ne présentent pas de raisonneur logique.

Tableau 9 : Classification des langages ontologiques

	Markup ontology language	Traditional syntax ontology language
Frame-based logic		F-Logic
		OKBC
		KM
		DOGMA
First-order logic-based	RDF	CL
	RDFS	CyCL
		KIF
Description logic-based	OWL	KL-ONE
		RACER
Sans raisonneur logique	SHOE	KL-One
	DAML+OIL	LOOM
	OIL	OCML
		PLIB

Les exigences pour le modèle OntoSTEP-NC tels que définis dans le chapitre 3 sont : la capacité à connecter les systèmes d'information avec la chaîne numérique des applications métiers et la capacité à organiser et structurer les données issues des machines-outils. Ces besoins impliquent donc de proposer des interfaces web pour pouvoir interopérer avec les systèmes d'information qui offrent des architectures orientées web, ce qui nous conduit au choix des "Markup ontology language".

Répondre au second besoin de structuration des données issues de la machine-outil en vue d'une réutilisation future, implique la présence d'un raisonneur logique dans le langage de modélisation utilisé. OntoSTEP-NC exploite la structure de la norme STEP-NC qui s'appuie sur les relations liant les entités entre elles. Pour assurer au mieux la cohérence avec la norme STEP-NC, un raisonneur sur les axiomes de l'ontologie OntoSTEP-NC reprenant les liens STEP-NC entre classes est préférable. Les raisonneurs Description Logic apparaissent alors comme les plus pertinents pour la modélisation d'OntoSTEP-NC grâce à sa capacité à raisonner sur les liens sémantiques.

Au vu de l'analyse réalisée dans le Tableau 9, le langage qui apparaît le plus pertinent pour la modélisation d'OntoSTEP-NC est le langage OWL. En effet, ce langage couvre à la fois les interfaces web des systèmes d'information et propose des raisonneurs sémantiques qui permettent d'exploiter au mieux la structure STEP-NC. Il permet également, grâce à sa sémantique formelle basée sur une fondation logique, de définir des associations plus complexes entre les ressources ainsi qu'entre les propriétés de leurs classes respectives. De plus, le lien avec les systèmes d'information s'opère au travers du langage de requête standard OWL-QL (Query Language).

II) **Choix de la plateforme : Protégé**

Pour la création d'OntoSTEP-NC, une fois le langage OWL défini, il faut déterminer la plateforme comme outil de modélisation. D'après l'étude et le benchmark publiée par (Bergman, 2010), on recense plus de 140 outils pour la modélisation d'ontologie au travers de différents langages et méthodologies. Selon les conclusions de cette étude, parmi les 140 solutions technologiques, 50 outils sont dépassés et marginaux puisque non-actif et ne permettent donc pas d'entreprendre une modélisation complète des modèles ontologiques. 70 autres peuvent présenter des aspects intéressants pour certaines applications et pour adresser des domaines spécifiques mais ne sont pas complets ou présentent uniquement des aspects de visualisation sans possibilité d'édition. Par déduction, (Bergman, 2010) qualifie une vingtaine de solutions comme étant intéressantes pour la création et la modélisation d'ontologie : Apelon DTS, irON, FlexViz, Knoodl, Protégé, diagramic.com, BooWa, COE, ontopia, Anzo, PoolParty, Vine, Erca, GraphI, et GrOWL.

Les seize outils sélectionnés ci-dessus par l'auteur proposent des caractéristiques et des mises en œuvre différentes. Afin de répondre à la problématique spécifique d'OntoSTEP-NC il est nécessaire d'analyser les caractéristiques de ces outils pour satisfaire au mieux les exigences de modélisation. Le premier critère à prendre en compte est la capacité pour ces plateformes ontologiques de générer une structure en langage OWL qui s'impose comme une condition nécessaire. En passant les outils au travers du filtre de la gestion des structures OWL, nous obtenons quatre outils:

- Knoodl propose une plateforme de orientée OWL pour la création de modèle ontologique et RDFS pour la gestion de bases de données. Cet outil se présente également comme une plateforme sémantique avec des interfaces en JAVA qui supporte des requêtes en SPARQL ce qui facilite la création d'applications connexes. Il s'agit d'un logiciel gratuit mais qui nécessite une maintenance importante avec un serveur hébergé.
- COE (CmapTools Ontology Editor) développé par IHMC¹ est une suite logicielle d'outils qui permet de modéliser, de partager et de visualiser des ontologies basées sur une structure OWL. Il s'agit essentiellement d'un puissant outil de visualisation avec une très bonne représentation au travers d'une structure très explicite reprenant l'ensemble des concepts.
- Protégé est un logiciel gratuit et open source qui assure la création des modèles ontologiques et qui propose également une plateforme pour la gestion des connaissances. Ce logiciel permet d'exporter le même modèle ontologique selon les formats RDF(S), OWL and XML Schema. De plus le logiciel Protégé offre des plug-ins et extension JAVA pour l'automatisation de fonctions.
- Anzo est un éditeur d'ontologie en RDFS ou OWL qui se base sur l'outil Microsoft Excel. Ce logiciel propose de générer automatiquement et rapidement les modèles ontologiques directement à partir d'une feuille Excel en se basant sur les classes et les liens sémantiques qui auront été préalablement définis.

Pour compléter la sélection de l'outil le plus approprié parmi les quatre solutions restantes, d'autres critères peuvent être pris en considération tel que:

- La nature de l'interface utilisateur qui permet de créer l'ontologie via une déclaration des classes et la génération des liens automatiques au travers de la plateforme utilisée. Cela permet d'éviter de coder toute l'ontologie manuellement ce qui dans le cas d'OntoSTEP-NC pourrait s'avérer chronophage dû au nombre d'entité et d'attributs. Ce critère s'attache donc à la présence d'une interface graphique pour la génération de l'ontologie.

¹ <http://cmap.ihmc.us/coe/test/Overview.html>

- La capacité de la plateforme de proposer une connexion au travers des interfaces indépendantes pour la capitalisation et la structuration de connaissances au niveau des systèmes d'information par exemple.
- Le caractère open source et solution gratuite qui permet d'utiliser librement le logiciel est un caractère qui peut favoriser la sélection d'un outil plutôt qu'un autre.

Le Tableau 10 propose une analyse des quatre solutions restantes sur la base des critères cités précédemment afin d'orienter la décision sur le meilleur outil pour la modélisation d'OntoSTEP-NC. L'analyse du critère de format d'export est caractérisé par le formalisme suivant : ++ OWL, RDFS, XML et interface Java; + Deux formats et interface Java; O Deux formats; - Un format et interface Java; -- Seulement OWL.

Tableau 10 : Choix de la plateforme de modélisation d'OntoSTEP-NC

	Interface utilisateur	Interconnexion	Solution gratuite
Knoodl	Oui	+	Oui
COE	Oui	--	Non
Protégé	Oui	++	Oui
Anzo	Non	O	Non

Il ressort de l'analyse que le logiciel Protégé répond le mieux aux critères requis pour la modélisation d'OntoSTEP-NC. En effet, Protégé est un logiciel gratuit offrant une interface graphique orientée utilisateur pour la génération automatique de la structure d'ontologique et qui permet un export au travers des formats XML, RDFS et OWL ou au travers d'interface Java. Ces propriétés d'échanges faciliteront alors l'interopérabilité d'OntoSTEP-NC avec les systèmes d'information et ainsi de pouvoir réutiliser les informations pour l'industrialisation de futures pièces mécaniques.

Cependant, bien que le logiciel Protégé et le langage OWL assurent une traduction complète du standard STEP-NC en OntoSTEP-NC, nous retrouvons des différences syntaxiques entre le langage EXPRESS de STEP-NC et le langage OWL d'OntoSTEP-NC et des règles de modélisation d'EXPRESS en OWL ont été établies.

Résumé

Ce travail s'intéresse à la gestion d'information techniques et connaissances métiers issues de la production pour assurer l'interopérabilité et la continuité de la chaîne numérique.

Dans un contexte d'entreprise étendue et de développement des technologies de l'information pour l'usine du futur, l'industrie aéronautique s'oriente vers une intégration flexible et agile des phases de conception et fabrication pour l'obtention de pièces bonnes du premier coup.

C'est pour assurer la maîtrise des processus et la capitalisation des savoir-faire métier issus de la fabrication que ces travaux adressent la problématique suivante : Comment élaborer un modèle d'interopérabilité de la chaîne numérique d'industrialisation, pour assurer une intégration agile de la conception et de la fabrication ?

Pour ce faire, nous définissons deux propositions : OntoSTEP-NC pour permettre l'extraction et la structuration des données issues de la fabrication et Closed-Loop Manufacturing pour permettre l'intégration et la réutilisation des connaissances métiers capitalisées au niveau de l'industrialisation.

Les apports de ces propositions se retrouvent dans la définition d'un cadre d'interopérabilité pour l'usine du futur mais également dans les enjeux tels que la définition de bonnes pratiques pour l'entreprise étendue en vue d'une harmonisation des processus de fabrication.

Ces travaux ont été validés au travers d'un démonstrateur sur un cas d'étude industriel comportant plusieurs scénarii.

Mots clés: Interopérabilité; OntoSTEP-NC; Closed-Loop Manufacturing; Manufacturing Process Management, Conception-Fabrication Intégrée.

Abstract

This work focuses on the knowledge and the data management extracted from the manufacturing to ensure the interoperability in the digital chain.

According to the extended enterprise and the factory of the future context, the aeronautics manufacturers tend to a design and manufacturing integrated platform in order to get a right part the first time.

This work focus on manufacturing process control and capitalization of know-how from the manufacturing aiming at answering the following issue: How to enable interoperability for the digital production process in order to ensure an integrated and agile design and manufacturing?

This issue is addressed with two proposals: OntoSTEP-NC which focuses on how to model and structure the manufacturing knowledge from the CNC machine and Closed-Loop Manufacturing which focuses on how to re-use and integrate the information feedback from manufacturing to process engineering.

Both combined those two proposals address the main issue of this work defining an interoperability framework for the factory of the future and address trends like the definition of guidelines for manufacturing in extended enterprise context.

This work has been validated through a demonstrator and an industrial case study with various scenarios.

Key words: Interoperability, OntoSTEP-NC, Closed-Loop Manufacturing, Manufacturing Process Management, Integrated Design and Manufacturing.