



APPORTS DES ONTOLOGIES ET DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE A LA CONCEPTION DE SYSTEMES MECANIKQUES

Julien Le Duigou

► To cite this version:

Julien Le Duigou. APPORTS DES ONTOLOGIES ET DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE A LA CONCEPTION DE SYSTEMES MECANIKQUES . Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de technologie de Compiègne, 2017. tel-01662566

HAL Id: tel-01662566

<https://theses.hal.science/tel-01662566>

Submitted on 13 Dec 2017

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée

A L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE

par

JULIEN LE DUIGOU

APPORTS DES ONTOLOGIES ET DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE A LA CONCEPTION DE SYSTEMES MECANQUES

Soutenue le 29 novembre 2017 devant un jury composé de :

Pr. Dimitris Kiritsis	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Président
Pr. Emmanuel Caillaud	Université de Strasbourg	Rapporteur
Dr. Hélène Chanal	Sigma Clermont	Rapporteuse
Pr. Lionel Roucoules	Arts et Métiers ParisTech	Rapporteur
Pr. Alain Bernard	Ecole Centrale de Nantes	Examineur
Pr. Benoît Eynard	Université de Technologie de Compiègne	Examineur
Pr. Julie Le Cardinal	CentraleSupélec	Examinatrice
Pr. Nadège Troussier	Université de Technologie de Troyes	Examinatrice
Sylvine Datry	Parametric Technology Corporation	Membre invité

REMERCIEMENTS

Cette Habilitation à Diriger des Recherches marque une étape symbolique dans ma carrière scientifique, nécessaire pour faire le bilan des années passées et indispensable pour préparer au mieux les années futures. Ces travaux sont le fruit de nombreuses nuits de travail solitaire mais également d'encore plus nombreuses rencontres, discussions et collaborations qui ont données toute sa richesse et sa profondeur à ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Je saisis donc cette opportunité pour remercier vivement l'ensemble des personnes qui ont contribué à l'élaboration de ces réflexions.

Je tiens en premier lieu à remercier deux personnes qui m'ont particulièrement accompagné ces dix dernières années, qui ont su m'aider à affiner ma contribution scientifique, à prendre le recul nécessaire.

Je tiens à remercier tout d'abord celui qui m'a initié à la recherche à mes débuts, Alain Bernard, Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes. La formation doctorale et la rigueur scientifique qu'il m'a inculquées me seront éternellement utiles. Je remercie également Benoît Eynard, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne pour m'avoir fait venir à l'UTC et pour la confiance sans faille qu'il m'a manifestée depuis mon arrivée en 2011. L'autonomie et la prise de responsabilités qu'il m'a accordées m'ont permis de progresser, les conseils qu'il m'a prodigués m'ont évité bien des écueils.

Je remercie particulièrement Dimitris Kiritsis, Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pour avoir accepté de présider ce jury. J'adresse mes vifs remerciements à Emmanuel Caillaud, Professeur à l'Université de Strasbourg, Hélène Chanal, Maître de Conférences HDR à Sigma Clermont, et Lionel Roucoules, Professeur aux Arts et Métiers ParisTech qui m'ont fait l'honneur et le plaisir d'être rapporteurs de ce mémoire. Leurs remarques pertinentes ont contribué à son enrichissement. Tous mes remerciements vont également à Julie Le Cardinal, Professeur à Centrale-Supélec, Nadège Troussier, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes et Sylvine Datry, Business Transformation Director chez Parametric Technology Corporation, qui ont accepté de participer à ce jury et m'ont permis d'approfondir mes réflexions sur ce sujet de recherche.

L'UTC et le département de Génie des Systèmes Mécaniques ont été un lieu d'émulation collective et de partage qui ont particulièrement contribué à la richesse professionnelle et humaine de ces dernières années. Un merci particulier à mes collègues du bureau I205, Magali, Alexandre, Valérie et Matthieu et à tous les collègues de l'équipe Systèmes Intégrés Produit-Process du laboratoire Roberval.

Je remercie également l'ensemble des masters, doctorants et post-doctorants que j'ai pu accompagner dans le développement de leurs travaux de recherche. Cette Habilitation à Diriger des Recherches n'aurait pas été possible sans leurs contributions. Un grand merci à Gerhard, Maria, Christophe, Chen, Diana, Hery, Pierre-Emmanuel, Gaëtan, Anaïs, Jinhua, Zoubida et Emeric.

Enfin, j'ai un remerciement tout particulier pour mon épouse, Joanna, qui a su m'apporter tout son soutien durant toutes ces années, et à mes enfants, Yves et Julie, source inépuisable de joie de vivre indispensable à mon bien-être quotidien. Rien n'aurait été possible sans eux.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a pour objectif de présenter mes activités d'enseignements et mes travaux de recherches au cours de ces dix dernières années dans le domaine du génie mécanique et du génie industriel et plus précisément sur l'aide à la décision pour la conception de produit, en intégrant l'ensemble de son cycle de vie. Mes réflexions se concentrent sur la structuration des connaissances pour le développement de systèmes mécaniques et de l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle pour exploiter ces connaissances.

Ce mémoire s'articule en deux parties. La première partie présente l'ensemble de mes activités d'enseignant-chercheur (enseignement, recherche et administration) depuis mon doctorat à l'Ecole Centrale de Nantes en 2010 et retrace mes activités de post-doctorant dans ce même établissement au sein du département Ingénierie des Produits et Systèmes Industriels (IPSI) et de l'IRCCyN UMR CNRS 6597 puis d'enseignant-chercheur contractuel à l'Université de Technologie de Compiègne au sein du département Génie des Systèmes Mécaniques (GSM) et du laboratoire Roberval UMR CNRS 7337. Cette partie se compose d'un curriculum vitae, d'un bilan des activités d'enseignements, d'un bilan scientifique et d'un bilan des activités administratives et d'intérêt collectif. Le bilan scientifique comprend la liste de mes publications scientifiques, la description de mes implications dans les directions de thèses de doctorat, et la liste des projets de recherche nationaux et européens auquel j'ai pris part en tant que participant ou responsable. Le bilan des activités administratives et d'intérêt collectif comprend les responsabilités pédagogiques dont la responsabilité de l'apprentissage et de la formation continue pour le département GSM puis de l'ensemble des relations formation-entreprises pour l'UTC, et les responsabilités scientifiques dont la participation à des communautés scientifiques et sociétés savantes, l'expertise de projets de recherche nationaux et internationaux et la relecture d'articles de revues et de conférences.

La deuxième partie s'attarde plus longuement sur la problématique principale à laquelle je me suis attelé depuis mon arrivée au laboratoire Roberval, à savoir l'intégration et l'exploitation des expertises métiers pour le développement de systèmes mécaniques. Cette partie commence par présenter un bilan des travaux effectués selon deux principaux axes scientifiques :

1. La structuration des expertises métiers nécessaires au développement de systèmes mécaniques intégrant l'ensemble du cycle de vie du produit en utilisant notamment des approches ontologiques.
2. L'exploitation des expertises métiers pour fournir de l'aide à la décision en conception de systèmes mécaniques par l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle.

L'identification des perspectives de ces travaux est ensuite présentée, afin de dégager des tendances et de futurs axes de recherches.

J'ai choisi de décrire mes activités de recherche, non suivant un axe chronologique, mais suivant un axe thématique qui permet de mieux en appréhender la cohérence et la complémentarité. Ainsi les différents projets de recherche auquel j'ai participé, les différents masters, doctorats ou post-doctorats que j'ai encadrés, participent à un ou plusieurs axes scientifiques. L'intégration de ces différents travaux m'ont permis d'en élargir la portée et de proposer un cadre plus large d'aide à décision pour la conception par l'utilisation de systèmes à base de connaissances permettant de proposer de futurs axes de recherches.

TABLE DES MATIERES

CURRICULUM VITAE	15
ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT	19
ACTIVITES SCIENTIFIQUES	23
LISTE DES PUBLICATIONS	23
ENCADREMENTS DE THESES ET MASTERS	35
ACTIVITES PARTENARIALES ET DE VALORISATION	39
ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET D'INTERET COLLECTIF	43
RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES	43
RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES	44
TRAVAUX DE RECHERCHES ET PERSPECTIVES.....	49
1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT THEMATIQUE	51
1.1. UN BREF RESUME DE MES RECHERCHES	51
1.2. POSITIONNEMENT THEMATIQUE	55
1.3. CONTEXTE INSTITUTIONNEL : L'EQUIPE SYSTEMES INTEGRES : PRODUIT-PROCESS	57
1.4. APPROCHE SYSTEMIQUE ET METHODE INDUCTIVE-DEDUCTIVE.....	59
1.5. STRUCTURE DU MANUSCRIT	61
2. POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE GENERAL ET PROBLEMATIQUE	63
2.1. TRANSITION NUMERIQUE ET USINE DU FUTUR.....	63
2.3. INTEGRATION DU CYCLE DE VIE DU PRODUIT EN CONCEPTION MECANIQUE : CLOSED-LOOP PLM	66
2.4. SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCE	71
2.5. DE L'INTEGRATION ET L'EXPLOITATION DES EXPERTISES METIERS POUR LE DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES MECANIQUES	75
3. AXE DE RECHERCHE 1 : UTILISATION DES ONTOLOGIES POUR UNE INTEGRATION DES EXPERTISES METIERS POUR LA CONCEPTION MECANIQUE.....	77
3.1. ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE SPECIFIQUE.....	77
3.1.1. INTEROPERABILITE PLM.....	77
3.1.2. MODELES ET META-MODELES PRODUIT	79
3.1.3. ONTOLOGIES PRODUIT	80
3.1.4. SYNTHESE SUR L'INTEGRATION DES EXPERTISES METIERS	81
3.2. APPORTS ET RESULTATS OBTENUS	84
3.2.1. META-MODELE PRODUIT ACTIVITE RESSOURCE ORGANISATION POUR LES PME MECANICIENNES...	84
3.2.2. MODELE D'INTERFACE MULTIDISCIPLINAIRE : APPLICATION A LA CONCEPTION MECATRONIQUE.....	86
3.2.3. ONTOSTEP-NC : INTEGRATION D'EXPERTISES EN INDUSTRIALISATION.....	88
3.2.4. ODE : ONTOLOGIE POUR LA SIMULATION ET LES PLANS D'EXPERIENCES NUMERIQUES	89
3.4. CONTRIBUTIONS ET OUVERTURES.....	93
4. AXE DE RECHERCHE 2 : APPORT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA REUTILISATION DES EXPERTISES METIERS	97
4.1. ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE SPECIFIQUE.....	97
4.1.1. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : CONNEXIONNISME ET SYMBOLISME.....	97
4.1.2. SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCE : SYSTEMES EXPERTS ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE	98
4.1.1. SYNTHESE SUR L'EXPLOITATION DES EXPERTISES METIERS.....	102
4.3. APPORTS ET RESULTATS OBTENUS	104
4.3.1. SYSTEME A BASE DE REGLES POUR LA CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE	104
4.3.2. SYSTEME DE RETOUR D'EXPERIENCES POUR L'INDUSTRIALISATION DE PIECES AERONAUTIQUES	106

4.3.3.	APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE EN CONFIGURATION DE PLAN D'EXPERIENCE NUMERIQUE.....	109
4.5.	CONTRIBUTIONS ET OUVERTURES.....	113
5.	PERSPECTIVES : VERS UNE AIDE A LA DECISION DYNAMIQUE EN CONCEPTION MECANIQUE	115
5.1.	DIRECTION DE RECHERCHE 1 : DYNAMIC DESIGN ONTOLOGY	118
5.2.	DIRECTION DE RECHERCHE 2 : DYNAMIC DESIGN INFERENCE	121
6.	CONCLUSIONS.....	125
	BIBLIOGRAPHIE	127

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1: RECAPITULATIF DES ENSEIGNEMENTS PAR ANNEE ET PAR DOMAINE	19
FIGURE 2: REPARTITION DES ENSEIGNEMENTS EN CM, TD ET AUTRES	20
FIGURE 3: PUBLICATIONS PAR ANNEE.....	23
FIGURE 4: RELECTURES ET EXPERTISES EFFECTUEES PAR ANNEE.....	45
FIGURE 5: L'USINE DU FUTUR (ACTIONPLANT, 2011)	52
FIGURE 6: ONTOLOGIES ET MODELES DE DONNEES.....	53
FIGURE 7: MOTEURS D'INFERENCE	54
FIGURE 8: PROJET DE RECHERCHE DE L'EQUIPE SYSTEMES INTEGRES : PRODUIT-PROCESS	58
FIGURE 9: METHODOLOGIE DE RECHERCHE	60
FIGURE 10: ORGANIGRAMME DE LA PARTIE TRAVAUX DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES	62
FIGURE 11: LES QUATRE ETAPES DE LA REVOLUTION INDUSTRIELLE DE L'AUTOMATION	64
FIGURE 12: DES OBJETS CONNECTES A L'ANALYSE DES DONNEES MASSIVES	65
FIGURE 13: SYSTEME PLM ET APPLICATIONS METIERS	67
FIGURE 14: PRINCIPAUX FLUX D'INFORMATION DU CLOSED-LOOP PLM	68
FIGURE 15: ARCHITECTURE DU CLOSED-LOOP PLM.....	69
FIGURE 16: LIENS ENTRE DONNEE, INFORMATION, CONNAISSANCE ET COMPETENCE.....	71
FIGURE 17: MODELE DE CONVERSION DES CONNAISSANCES	73
FIGURE 18: PROCESSUS DE LA GESTION DE LA CONNAISSANCE	73
FIGURE 19: SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES.....	74
FIGURE 20: META-MODELE PARO	86
FIGURE 21: DIAGRAMME DE CLASSES UML DE L'INTERFACE MULTIDISCIPLINAIRE	87
FIGURE 22 : MODELES FONCTIONNEL ET STRUCTUREL D'UN SYSTEME DE MESURE 3D.....	88
FIGURE 23 : EXTRAIT DU GRAPHE DE L'ONTOLOGIE ONTOSTEP-NC	89
FIGURE 24 : IMPLEMENTATION DES MODELES ABOX# ET TBOX# DANS VIRTUOSO.....	89
FIGURE 25: VUE GLOBALE D'ODE DANS PROTEGE.....	91
FIGURE 26: EXTRAIT DES RESULTATS DE LA REQUETE	92
FIGURE 27: ONTOLOGIES PRODUITS	94
FIGURE 28 : PROCESSUS DE CONCEPTION : UNE EXTENSION DU CYCLE EN V	104
FIGURE 29: EXEMPLE DE REGLES ECRITES EN OBJECT CONSTRAINT LANGUAGE (OCL)	105
FIGURE 30: EXEMPLE DE REGLES ECRITES EN SEMANTIC WEB RULE LANGUAGE (SWRL).....	105
FIGURE 31: INSTANCIATION D'UNE INTERFACE MULTIDISCIPLINAIRE DANS LA BASE DE CONNAISSANCES	106
FIGURE 32: CLOSED-LOOP MANUFACTURING	107
FIGURE 33: IHM DU SYSTEME DE RETOUR D'EXPERIENCES DANS CATIA V5.....	108
FIGURE 34: ARCHITECTURE GLOBALE DU SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES.....	110
FIGURE 35: EXEMPLE DE STRUCTURE DE RESEAU BAYESIEN	111
FIGURE 36: NIVEAU DES INDICATEURS DE PERFORMANCES DU RESEAU BAYESIEN POUR Q ²	112
FIGURE 37: MOTEURS D'INFERENCE	114
FIGURE 38: AIDE A LA DECISION DYNAMIQUE EN CONCEPTION MECANIQUE	115
FIGURE 39: SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCES POUR L'AIDE A LA DECISION DYNAMIQUE	117

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE	23
TABLEAU 2 : ENCADREMENTS DE THESES, MASTERS ET POST-DOCTORATS DEPUIS 2011.....	35
TABLEAU 3 : PROJETS COLLABORATIFS DEPUIS 2011.....	39
TABLEAU 4 : RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES.....	43
TABLEAU 5 : SYNTHESE DE L'ETUDE DE L'INTEROPERABILITE POUR LE PLM	83
TABLEAU 6 : REQUETE ECRITE EN SPARQL	91
TABLEAU 7 : SYNTHESE DE L'ETUDE DES MOTEURS D'INFERENCE UTILISES EN CONCEPTION INTEGREE	102
TABLEAU 8 : MATRICE DE CONFUSION	112
TABLEAU 9: COMPARAISON DES ALGORITHMES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE SUPERVISE	122

GLOSSAIRE

BOL : BEGINING OF LIFE
BOM : BILL OF MATERIAL
CAO : CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR
CBR : CASE-BASED REASONING
CPS: CYBER PHYSICAL SYSTEM
CPPS: CYBER PHYSICAL PRODUCTION SYSTEM
CRM : CUSTOMER RELATIONSHIP MANAGEMENT
EOL : END OF LIFE
ERP : ENTERPRISE RESOURCE PLANNING
FAO : FABRICATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR
HPC : HIGH PERFORMANCE COMPUTING
IAO : INGENIERIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR
IA : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
IIoT : INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS
IoT : INTERNET OF THINGS
IPAO : INGENIERIE DES PROCEDES ASSISTEE PAR ORDINATEUR
KBS : KNOWLEDGE BASED SYSTEM
KBE : KNOWLEDGE BASED ENGINEERING
KM : KNOWLEDGE MANAGEMENT
MBSE: MODEL BASED SYSTEM ENGINEERING
MES : MANUFACTURING EXECUTION SYSTEM
MOCN : MACHINE-OUTIL À COMMANDE NUMÉRIQUE
MOL : MIDDLE OF LIFE
MPM : MANUFACTURING PROCESS MANAGEMENT
PDM : PRODUCT DATA MANAGEMENT
PEN : PLAN D'EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES
PLM : PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT
SCM : SUPPLY CHAIN MANAGEMENT
SDM : SIMULATION DATA MANAGEMENT
SLM : SIMULATION LIFECYCLE MANAGEMENT
SVM : SUPPORT VECTOR MACHINE
XAO : X ASSISTEE PAR ORDINATEUR

CURRICULUM VITAE

Julien LE DUIGOU

Enseignant-Chercheur

Université de Technologie de Compiègne



Né le 05/03/1982 (35 ans), à Pabu (22)

Nationalité : Française

Situation familiale : Marié, 2 enfants

Adresse :

Bureau I205, Centre Pierre Guillaumat 1

Université de Technologie de Compiègne

CS 60319 - 60203 Compiègne Cedex

Tel : 03 44 23 45 61

Portable : 07 70 12 49 88

Email : julien.le-duigou@utc.fr

EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

2011-... : Enseignant-Chercheur Contractuel, Université de Technologie de Compiègne

Enseignement au département Génie des Systèmes Mécaniques (GSM)

Recherche au laboratoire Roberval UMR CNRS 7337

2010-11 : Ingénieur de Recherche, Ecole Centrale de Nantes

Enseignement au département Ingénierie des Produits et Systèmes Industriels (IPSI)

Recherche à l'IRCCyN UMR CNRS 6597

2007-10 : Ingénieur en Mécanique, Cetim

Spécification et développement d'un logiciel de gestion des données techniques

Organisation et gestion de données techniques en PME mécaniciennes

DIPLOMES

2010 : Doctorat, CIFRE Cetim, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes, spécialité Génie Mécanique
(Qualification 60^{ème} section CNU n° 11260215029)Titre : *Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue. Application aux PME mécaniciennes*. Soutenu le 22 avril 2010 devant le jury composé de :

- Pr. Abdelaziz Bouras, Université Lumières Lyon 2, Président
- Pr. Fred Van Houten, Université de Twente, Rapporteur
- Pr. Benoît Eynard, Université de Technologie de Compiègne, Rapporteur
- Pr. Chris McMahon, Université de Bath, Examineur
- Dr. Michel Bigand, Ecole Centrale de Lille, Examineur
- Dr. Jean-Charles Delplace, Cetim, Membre invité
- Pr. Alain Bernard, Ecole Centrale de Nantes, Directeur de thèse
- Dr. Nicolas Perry, Université de Bordeaux, Directeur de thèse

2006 : Master Recherche, Spécialité Mécatronique, Université du Sud Toulon-Var

2006 : Ingénieur en Mécanique, Spécialité Conception de Systèmes Mécaniques, Supméca

ACTIVITES ADMINISTRATIVES

Pédagogiques :

- 2016-....: Responsable Pôle Relations Formation-Entreprises (PRFE) de l'UTC (15 collaborateurs)
Formation par Apprentissage (2 sections, 48 étudiants/an)
Taxe d'Apprentissage (Quota et Barème)
Stage et Projet (1700 conventions/an)
Partenariats Campus (60 évènements/an)
Observatoire des métiers (enquête CGE sur plus de 2300 étudiants/an)
- 2014-16: Responsable Pédagogique Apprentissage GSM (création et mise en place d'une nouvelle maquette pédagogique)
- 2014-16: Référent Formation Continue GSM (création du Diplôme Universitaire Ingénierie de la Performance Industrielle)
- 2012-17: Membre élu enseignant-chercheur au CEVU (élection partielle en 2012, réélu en 2013, mandat de 4 ans)
- 2012-15: Membre élu enseignant-chercheur au bureau GSM (élection partielle en 2012, réélu en 2013, mandat de 2 ans)

Scientifiques :

- 2015-....: Membre du bureau français IEEE, Chapter Systems, Man, and Cybernetics Society (IEEE SMC).
- 2014-....: Membre expert scientifique de l'International Federation of Information Processing Work Group 5.1: Global Product development for the whole life-cycle. (IFIP WG5.1)
- 2014-....: Expertises de projets (ANR; Région; Fondation Canadienne pour l'Innovation ...)
- 2012-....: Membre de comités scientifiques de conférences : PLM, CIGI, JNJD MACS, APMS.
- 2012-... : Relecteur pour des revues internationales: JCLP, CERA, IJPD, IJPLM...

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

J'enseigne dans les domaines de la conception et de la production du niveau L3 à M2 de la formation d'ingénieur de l'UTC au département Génie des Systèmes Mécaniques. Je donne des enseignements en formation initiale, en formation par apprentissage et en formation continue. J'ai la responsabilité des Unités de Valeur « Gestion du Cycle de Vie du Produit et Ingénierie Collaborative », « Système de Production et Usine Numérique » et « Excellence Industrielle et Lean Management » et du Diplôme Universitaire « Ingénierie de la Performance Industrielle ». J'interviens également dans les enseignements de conception mécanique, CAO et modélisation géométrique, gestion de production et lean management. Enfin, je complète ces enseignements en supervisant des stages et des projets étudiants.

ACTIVITES DE RECHERCHES

Mes travaux de recherche au sein du Laboratoire de Mécanique Roberval, dans l'axe en émergence « Systèmes Intégrés en Mécanique », se focalisent sur l'intégration et l'exploitation des expertises métiers pour la conception de systèmes mécaniques. Les axes de recherche qui en découlent sont liés à des problématiques :

1. De structuration des connaissances pour la conception mécanique, en utilisant notamment des approches ontologiques.
2. D'exploitation de ces expertises métiers durant le processus de conception en utilisant des moteurs d'inférence basés sur des techniques d'intelligence artificielle.

ENCADREMENTS DE THESES

1 thèse en cours :

Emeric Ostermeyer, co-direction 50% avec A. Durupt, 2016-2019, *Chaîne numérique d'industrialisation : modèle d'intégration des données métier et de gestion d'informations hétérogènes en usinage*. Soutenance prévue en 2019.

3 thèses soutenues :

Gaëtan Blondet, co-direction 50% avec N. Boudaoud, 2014-2017, *Système à base de connaissances pour le processus de plan d'expériences numériques*. Soutenue le 09/06/2017.

Chen Zheng, co-direction 50% avec B. Eynard, 2012-2015, *Design and integration of multi-disciplinary interfaces: method and modelling language for mechatronic systems engineering*. Soutenue le 14/12/2015, qualification 60^{ème} et 61^{ème} section CNU.

Christophe Danjou, co-direction 50% avec B. Eynard, 2012-2015, *Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrée*. Soutenue le 03/12/2015, qualification 60^{ème} et 61^{ème} section CNU.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

23 Revues internationales :	CIRP ANNALS, COMIND, CERA, JCLP, ADV ENG INFORM, IJCIM...
49 Conférences internationales :	IFIP PLM, CIRP Design, Joint Conference on Mechanics, ASME ESDA...
19 Conférences nationales :	AFM CFM, GIS S-mart (ex AIP PRIMECA), JN GDR MACS, Forum AFIS...

ACTIVITES PARTENARIALES ET DE VALORISATION

Les activités partenariales et de valorisation permettent de maintenir une transition indispensable de la recherche vers l'industrie. Je liste ici quelques-uns des projets de recherches collaboratives, parmi les 4 projets européens et 6 nationaux que j'ai menés pour un total de plus de 1 million d'euros de subvention UTC sur la période 2011-2017 :

- SDM4DOE (FUI16, 2013-2016) : Projet sur l'intégration des informations de simulation dans la chaîne numérique.
- ANGEL (FUI14, 2012-2014) : Projet sur la chaîne numérique d'industrialisation de la conception aux machines-outils à commande numérique.
- SuPLight (FP7, 2011-2014) : Projet sur l'optimisation des pièces en aluminium recyclées en prenant en compte l'intégralité du cycle de vie du produit.

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Les thématiques que j'enseigne depuis 2010 se focalisent principalement sur la conception et la production de systèmes mécaniques. J'ai toutefois démarré certains enseignements au début de ma carrière sur des aspects plus informatique (algorithmie, base de données et langage objet : C++, Java). La FIGURE 1 récapitule mes enseignements par thématique et par année.

- En conception, j'enseigne les méthodes de conception, la conception collaborative et simultanée, l'ingénierie système (CATIA V6 et SysML), la conception assistée par ordinateur (CAO : CATIA et Creo) et la gestion du cycle de vie du produit (PDM : Windchill et Enovia).
- En production, j'enseigne la gestion de production (MRPII, ordonnancement, gestion des stocks... ERP : Prelude et Sage X3), le lean management (amélioration continue, juste à temps, conduite du changement, Kanban, 5S, SMED...) et l'usine numérique (simulation de flux : Arena, Delmia, Quest).

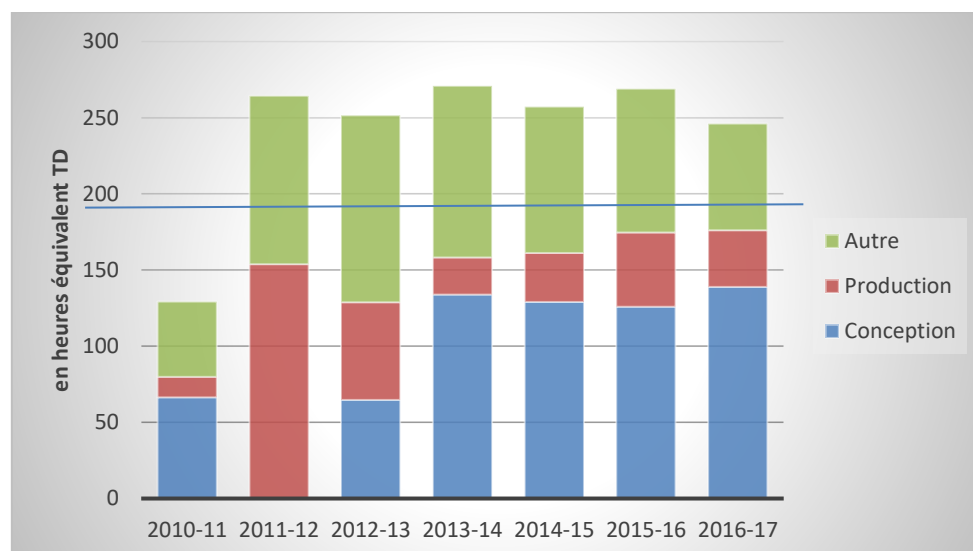


FIGURE 1: RECAPITULATIF DES ENSEIGNEMENTS PAR ANNEE ET PAR DOMAINE

En participant aux cours du département GSM de l'UTC, j'ai été amené à créer des supports de cours, des TD et des TP. La création de cours m'intéresse grandement, et plus particulièrement la construction du parcours pédagogique à proposer aux élèves au sein d'un cours et son intégration par rapport au cursus global. En effet l'organisation et la hiérarchisation des connaissances nécessaires à l'acquisition d'une compétence ainsi que les méthodes de diffusion de ces connaissances ont pour moi un intérêt aussi bien théorique que pratique. Je participe d'ailleurs à la réflexion menée à l'UTC sur l'acquisition de compétences et son adaptation au modèle UTC de choix d'UV et de parcours à la carte. La FIGURE 2 présente la répartition de mes enseignements en cours magistral (CM), travaux dirigés (TD) et suivi de projet, tutorats... (Autre).

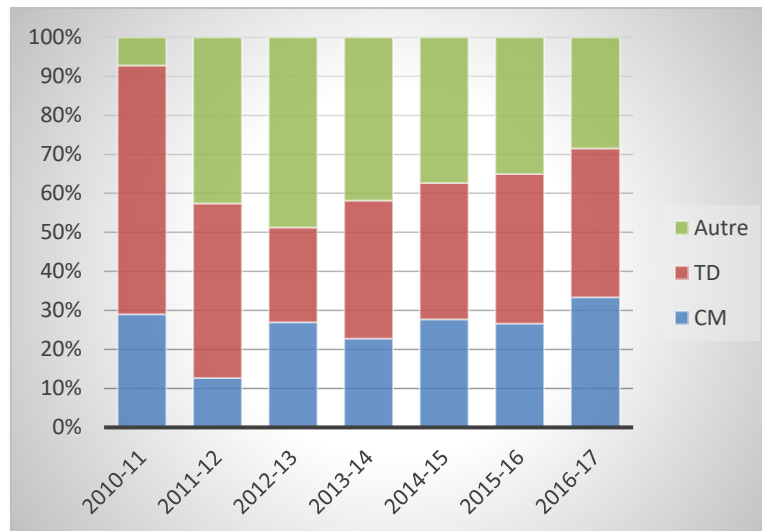


FIGURE 2: REPARTITION DES ENSEIGNEMENTS EN CM, TD ET AUTRES

J'ai également depuis mes débuts, varié les types d'apprenants en participant à la formation initiale sous statut étudiant (FISE), à la formation initiale sous statut apprenti (FISA) et à la formation continue (FC) d'étudiants de niveau licence et master, principalement en formation d'ingénieur en mécanique. La mixité des apprenants est une valeur ajoutée pour les étudiants comme pour les enseignants. Les étudiants FISE ont accès à des collègues en FISA et FC qui ont des expériences différentes de la leur, plus techniques et avec des retours directs de ce qui se fait en entreprise. Les enseignants quant à eux ont également des étudiants en cours avec des retours de ce qui se passe en entreprise mais qu'il faut parfois théoriser et remettre en contexte grâce à une pédagogie inductive. Ci-dessous les cours que j'enseigne par type de formation et université.

FORMATION INITIALE

Université de Technologie de Compiègne département Génie des Systèmes Mécaniques (2011-...)

- MP02 - Introduction aux méthodes de la GPAO/ERP
- MP03 - Supply chain management
- SY12 - Modélisation et performance des systèmes de production, lean management
- TN20 – Modélisation géométrique, CAO
- **TN21 Responsable pédagogique** - Gestion du cycle de vie du produit et ingénierie collaborative
- TN24 - Technologies de fabrication et outils méthodes

Université de Technologie de Compiègne, Master Mention Ingénierie des Systèmes Complexes Spécialité Systèmes Mécatroniques et Mécanique Avancée (2014-...)

- SMA04 – Modélisation et simulation de systèmes

Ecole Centrale de Pékin (2010-2011)

- Génie Industriel, gestion de production

Ecole Centrale de Nantes, département Ingénierie des Produits et Systèmes Industriels (2007-2011)

- Logistique, supply chain
- Méthode logiciel, langage orienté objet, Java
- Modélisation d'entreprise

- Systèmes d'entreprises, gestion de production, ERP
- Systèmes d'information en entreprise

FORMATION PAR APPRENTISSAGE

Université de Technologie de Compiègne département Génie des Systèmes Mécaniques (2011-...)

- **AM09 Responsable pédagogique** – Excellence industrielle et lean management
- GPL01/AM30 - Gestion de production et ERP
- GPL02/AM22 - Recherche opérationnelle en productique
- **GPL03/AM23 Responsable pédagogique** - Système de production et usine numérique
- TMI08 – Conception niveau 3

Université de Picardie Jules Verne, Institut Supérieur des Sciences Et Techniques, Master Conception et Simulation de produits (2013-16)

- **PLM Responsable pédagogique** – Conception et cycle de vie produit

Institut des Techniques d'Ingénieur de l'Industrie (2010-2011)

- Algorithmique, VBA

FORMATION CONTINUE

*Howden : 2 jours + 10*2h (09/2011- 09/2012)*

Mise en place d'un séminaire de 2 jours pour 35 managers de Howden sur le lean management. 10 séances de 2h dans l'entreprise pour les opérationnels de l'entreprise.

Altis : 1 jour (17/01/2012)

Mise en place d'un séminaire d'une journée pour 24 opérationnels et managers d'Altis sur le lean management.

ACTIVITES SCIENTIFIQUES

LISTE DES PUBLICATIONS

TABLEAU 1 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Publications dans des revues indexées WoS ou Scopus	23
Publications dans des revues non indexées WoS ou Scopus	5
Chapitres publiés dans des ouvrages de synthèse	2
Congrès internationaux à comité de lecture et actes publiés	49
Congrès nationaux à comité de lecture	19
Congrès et colloques sur invitation	6
Mémoires diplômants	2
Rapports de projets	10

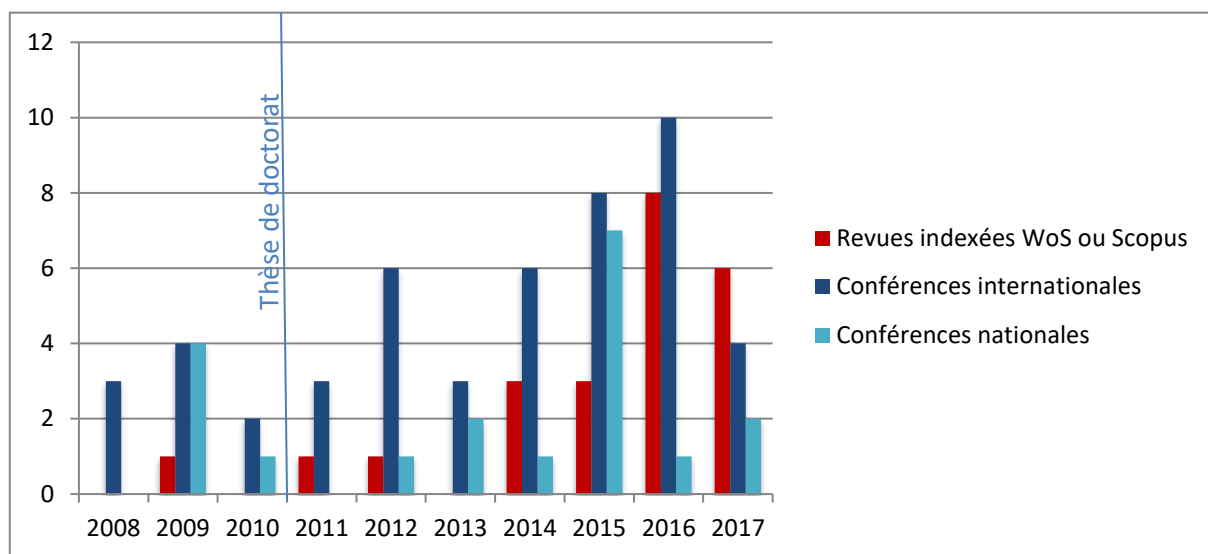


FIGURE 3: PUBLICATIONS PAR ANNEE

A - PUBLICATIONS DANS DES REVUES INDEXEES WOS OU SCOPUS

2017

[A23] Blondet, G., **Le Duigou, J.**, Boudaoud, N., Eynard, B. (2017). An ontology for numerical design of experiments processes. *Computers in Industry*, 94, 26-40.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.09.005>

[A21] Zheng, C., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Hehenberger, P., Eynard, B. (2017). Knowledge-Based Engineering for Multidisciplinary Systems: Integrated Design based on Interface Model. *Concurrent Engineering: Research and Applications*.
<https://doi.org/10.1177/1063293X17734591>

[A22] Xiao, J., Anwer, N., Durupt, A., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2017). Information Exchange Standards for Design, Tolerancing and Additive Manufacturing: a Research Review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*.
<https://doi.org/10.1007/s12008-017-0401-4>

[A20] Zheng, C., Hehenberger, P., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Eynard, B. (2017). Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*, 28(3), 333-356. <http://dx.doi.org/10.1007/s00163-016-0243-2>

[A19] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2017). Manufacturing Knowledge Management based on STEP-NC standard: a Closed-Loop Manufacturing Approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(9), 995-1009. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2016.1268718>

[A18] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2017). Closed-Loop Manufacturing process based on STEP-NC. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(2), 233-245. <http://dx.doi.org/10.1007/s12008-015-0268-1>

2016

[A17] Hehenberger, P., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Zheng, C., Eynard, B. (2016). Using Meta-models to consider Information Evolution in the Design Process of Systems of Systems. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 9(4), 285-304. <http://dx.doi.org/10.1504/IJPLM.2016.080982>

[A16] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Dupont, E., Eynard, B. (2016). Interface Model Enabling Decomposition Method for Architecture Definition of Mechatronic Systems. *Mechatronics*, 40, 194-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.10.008>

[A15] Penciu, D., **Le Duigou, J.**, Daaboul, J., Vallet, F., Eynard, B. (2016). Product life cycle management approach for integration of engineering design and life cycle engineering. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 30(4), 379-389. <http://dx.doi.org/10.1017/S0890060416000366>

[A14] Blondet, G., Belkadi, F., **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Boudaoud, N. (2016). Towards a knowledge-based framework for numerical Design of Experiment optimization and management. *Computer-Aided Design and Applications*, 13(6), 872-884. <http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2016.1168236>.

[A13] Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Penciu, D., Eynard, B. (2016). An Integrated Closed-Loop PLM Approach for Reverse Logistics Design. *Production Planning & Control*, 27(13), 1062-1077. <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2016.1177234>.

[A12] **Le Duigou, J.**, Gulbrandsen-Dahl, S., Vallet, F., Söderberg, R., Eynard, B., Perry, N. (2016). Optimization and lifecycle engineering for design and manufacture of recycled aluminium parts. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(1), 149-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.111>

[A11] Andrianakaja, H., **Le Duigou, J.**, Danjou, C., Eynard, B. (2016). Sustainable Machining Approach for CAD/CAM/CNC systems based on a Dynamic Environmental Assessment.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, <http://dx.doi.org/10.1177/0954405416629104>

[A10] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Eynard, B. (2016). Multidisciplinary Interface Model for Design of Mechatronic Systems. *Computers in Industry*, 76, 24–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2015.12.002>

2015

[A09] Blondet, G., **Le Duigou, J.**, Boudaoud, N., Eynard, B. (2015). Simulation Data Management for Design of Experiment: a literature review. *Mechanics & Industry*, 16(6), <http://dx.doi.org/10.1051/meca/2015041>

[A8] Daaboul, J., Da Cunha, C., **Le Duigou, J.**, Novak, B., Bernard, A. (2015). Differentiation and Customer decoupling points: An Integrated design approach for mass customization. *Concurrent Engineering Research and Applications*, 23(4), 284–295. <http://dx.doi.org/10.1177/1063293X15589767>

[A7] Andrianakaja, H., Vallet, F., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2015). A Method to Ecodesign Structural Parts in the Transport Sector based on Product Life cycle Management. *Journal of Cleaner Production*, 94, 165-176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.026>

2014

[A6] Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Penciu, D., Eynard, B. (2014). Reverse Logistics Network Design: A Holistic Life Cycle Approach. *Journal of Remanufacturing*, 4(7), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1186/s13243-014-0007-y>

[A5] Zheng, C., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2014). Survey on Mechatronic Engineering: A Focus on Design Methods and Product Models. *Advanced Engineering Informatics*, 28(3), 241-257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2014.05.003>

[A4] Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Da Cunha, C., Bernard, A. (2014). Value networks: pulling the triggers. A combined approach of modelling and simulation for performance evaluation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(7), 609-623. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2013.834478>

Période ante thèse de doctorat

2012

[A3] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J. C. (2012). Generic PLM system for SMEs: Application to an equipment manufacturer. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 6(1), 51-64. <http://dx.doi.org/10.1504/IJPLM.2012.046429>

2011

[A2] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N. (2011). Framework for PLM integration in SMEs networks. *Computer-Aided Design and Applications*, 8(4), 531-544. <http://dx.doi.org/10.3722/cadaps.2011.531-544>

2009

- [A1] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J. C. (2009). Global approach for product data management, application to ship equipment part families. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(3), 185-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.10.005>

B - PUBLICATIONS DANS DES REVUES NON INDEXEES WOS OU SCOPUS

2017

- [B5] Arduin, P.E., **Le Duigou, J.**, Abel, M.H., Eynard, B. (2017). Sharing Knowledge When It Cannot Be Made Explicit: The Case of Product Lifecycle Management Systems, *International Journal of Knowledge-Based Organizations* (accepted)

2015

- [B4] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Eynard, B. (2015). Design Process for Complex Systems Engineering Based on Interface Modelling, *INSIGHT*, 18(4), 22-24. <http://dx.doi.org/10.1002/inst.12056>

- [B3] Medini, K., **Le Duigou, J.**, Da Cunha, C., Bernard, A. (2015). Investigating mass customization and sustainability compatibilities. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7(1), 11-20. <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v7i1.2>

2014

- [B2] Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Penciu, D., Eynard, B. (2014). Aide à la décision pour la conception d'une chaîne logistique inverse pour l'aluminium. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 33(1), 9-33.

- [B1] Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2014). Des SGDT au Product Lifecycle Management : évolution de la place des documents techniques. *Documentaliste – Sciences de l'information*, 51(1), 34-37.

C - CHAPITRES PUBLIES DANS DES OUVRAGES DE SYNTHESE

2015

- [C2] Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2016). *Chapter 6 Design processes of mechatronic systems*. *Mechatronic Futures : Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*. Ed. Hehenberger, P., Bradley, D., 71-86.

2014

- [C1] Perry, N., Bernard, A., Bosch-Mauchand, M., **Le Duigou, J.**, Xu, Y. (2014). *Chapter 12: Proposal of an architectural solution for economic and environment global eco-cost assessment: Models combination analysis*. *Technology and Manufacturing Process Selection: the Product Life Cycle Perspective*, Ed. Henriques, E., Peças, P. and Silva, A., 239-256. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-5544-7>

D - COMMUNICATIONS A DES CONGRES INTERNATIONAUX A COMITE DE SELECTION ET ACTES PUBLIES

2017

- [D49] Ostermeyer, E., Danjou, C., Durupt, A., **Le Duigou, J.**, (2017). *Retrieval and re-use of manufacturing knowledge – A survey*. 15th International Conference on Manufacturing Research, 5-7 September 2017, London, UK.

2016

- [D48] Xiao, J., Anwer, N., Durupt, A., **Le Duigou, J.**, Eynard, B., (2017). *Data Definition, Parameterisation and Standardisation of Machine-specified Process in Additive Manufacturing*. 15th International Conference on Manufacturing Research, 5-7 September 2017, London, UK.
- [D47] Afoutni, Z., **Le Duigou, J.**, Abel, M.-H., Eynard, B., (2017). *Towards a Proactive Interoperability Solution in Systems of Information Systems: a PLM perspective*. 14th International Conference on Product Lifecycle Management, 9-12 July 2017, Seville, Spain.
- [D46] Dekhtiar, J., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Durupt, A., Eynard, B., (2017). *Benchmark experiment on new standards for the exchange of 3D models: assessment of STEP AP242 and JT*. 6th International Conference on Research into Design, 9-11 January 2017, Guwahati, India.
- [D45] Xiao, J., Anwer, N., Durupt, A., **Le Duigou, J.**, Eynard, B., (2016). *Standardisation Focus on Process Planning and Operations Management for Additive Manufacturing*. International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, 14-16 September 2016, Catania, Italy.
- [D44] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Bosch, M., Eynard, B. (2016). *PLM-based Approach for Integration of Product Safety in Lean Development*. 13th International Conference on Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries, Ed. Harik, R., et al., 492, 193-205, 11-13 July 2016, Columbia, SC, USA.
- [D43] Rossi, M., Cattaneo, L., **Le Duigou, J.**, Terzi, S., Fugier-Garrel, S., Eynard, B. (2016). *Lean Product Development and the role of PLM*. 13th International Conference on Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries, Ed. Harik, R., et al., 492, 183-192, 11-13 July 2016, Columbia, SC, USA.
- [D42] Zheng, C., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Hehenberger, P., Vajna, S., Eynard, B. (2016). *Improvement of multidisciplinary integration in design of complex systems by implementing knowledge-based engineering*. 13th International Conference on Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries, Ed. Harik, R., et al., 492, 89-98, 11-13 July 2016, Columbia, SC, USA.
- [D41] Cortes, H., Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2016). *Strategic Lean Management: Integration of operational Performance Indicators for strategic Lean management*. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, 49(12), 065–070, 28-30 June 2016, Troyes, France.
- [D40] Blondet, G., **Le Duigou, J.**, Boudaoud, N. (2016). *ODE: An Ontology for Numerical Design of Experiments*. 26th CIRP Design Conference, Ed. Wang, L. and Kjellberg, T., 50, 496-501, 15-17 June 2016, Stockholm, Sweden.
- [D39] Blondet, G., **Le Duigou, J.**, Boudaoud, N. (2016). *A knowledge-based system for numerical design of experiments*. DS 84: 14th International Design Conference, Ed. Marjanović, D., et al., 1997-2006, 16-19 May 2016, Dubrovnik, Croatia.

[D38] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Hehenberger, P., Bricogne, M., Eynard, B. (2016). *Multidisciplinary integration during design process: a survey on design methods of cyber-physical systems*. DS 84: 14th International Design Conference, Ed. Marjanović, D., et al., 1625-1634, 16-19 May 2016, Dubrovnik, Croatia.

[D37] Tyl, B., Vallet, F., Pialot, O., Millet, D., **Le Duigou, J.**, Graves, G. (2016). *The ESM approach: 8 mechanisms to efficiently support eco-ideation in SMEs*. DS 84: 14th International Design Conference, Ed. Marjanović, D., et al., 1165-1174, 16-19 May 2016, Dubrovnik, Croatia.

[D36] Bricogne, M., Hehenberger, P., **Le Duigou, J.**, Eynard, B., Mayrhofer, M. (2016). *Product development process based on hierarchical design models and workspaces. An application in mechatronic systems design*. 11th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, 9-13 May 2016, Aix-en-Provence, France.

2015

[D35] Cortes, H., Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2015). *Intégration d'indicateurs Lean dans la stratégie d'entreprise pour le pilotage des performances*. 11^{ème} Congrès International de Génie Industriel, 26-28 October 2015, Québec, Canada.

[D34] Hehenberger, P., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2015). *Meta-model of PLM for Design of Systems of Systems*. In: Proceedings of 12th International Conference on Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things, Ed. Bouras, A., et al., 467, 301-310, 19-21 October 2015, Doha, Qatar.

[D33] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Hehenberger, P., Eynard, B. (2015). *Multidisciplinary Interface Modelling: a Case Study on the Design of 3D Measurement System*. In: Proceedings of 12th International Conference on Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things, Ed. Bouras, A., et al., 467, 856-866, 19-21 October 2015, Doha, Qatar.

[D32] Ottino, A., Vosgien, T., **Le Duigou, J.**, Lardeur, P., Eynard, B. (2015). *Simulation Data Management for reuse of finite element models based on STEP standard*. In: Proceedings of 12th International Conference on Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things, Ed. Bouras, A., et al., 467, 476-484, 19-21 October 2015, Doha, Qatar.

[D31] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2015). *Closed-Loop Manufacturing, a STEP-NC solution for data feedback: A case study*. 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Ed. Teti, R., 41, 852-857, 24-26 June 2015, Naples, Italy.

[D30] Blondet, G., Belkadi, F., **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Boudaoud, N. (2015). *Simulation Data Management for Design of Experiment: Towards an open source platform*. In: Proceedings of CAD'15, 291-296, 22-25 June 2015, London, UK.

[D29] Andriankaja, H., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2015). *A Sustainable Machining Approach by Integrating the Environmental Assessment within the CAD/CAM CNC Chain*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Research into Design: Research into Design Across Boundaries, 2, 227-236, 7-9 January 2015, Bangalore, India.

[D28] Arduin, P.E., **Le Duigou, J.**, Abel, M.H., Eynard, B. (2015). *Knowledge Sharing in Design based on Product Lifecycle Management Systems*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Research into Design: Research into Design Across Boundaries, 2, 507-519, 7-9 January 2015, Bangalore, India.

2014

[D27] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2014). *OntoSTEP-NC for information feedbacks from CNC to CAD/CAM*. In: Proceedings of International Conference on Advances in Production Management Systems: Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World, Ed. Grabot, B., Vallespir, B., Gomes, S., Bouras, A. and Kiritsis, D., 440, 256-263, 20-24 September 2014, Ajaccio, France.

[D26] Arduin, P.E., **Le Duigou, J.**, Penciu, D., Abel, M.H., Eynard, B. (2014). *Knowledge Sharing within Extended Enterprises: Case of Product Lifecycle Management systems*. In: Proceedings of the 15th European Conference on Knowledge Management, 4-5 September 2014, Santarém, Portugal.

[D25] Arduin, P.E., **Le Duigou, J.**, Abel, M.H., Eynard, B. (2014). *Impact of individual cognition on product lifecycle management*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Design Computing and Cognition, 23–25 June 2014, London, UK.

[D24] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2014). *From CNC to CAM through OntoSTEP-NC*, In: Proceedings of the Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing: Research in Interactive Design, Research in Interactive Design (4), Ed. Fischer, X. et al., 270-276, 18-20 June 2014, Toulouse, France.

[D23] Daaboul, J., Novak, B., **Le Duigou, J.**, Da Cunha, C., Bernard, A. (2014). *To mass customize or not to mass customize? The Alpina case*. In: Proceedings of the Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing: Research in Interactive Design, 4, 18-20 June 20 14, Toulouse, France.

[D22] Zheng, C., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2014). *Mechatronic Design Process: A Survey of Product Data Model*. In: Proceedings of the 24th CIRP Design Conference, Ed. Moroni G. and Tolio T., 21, 282–287, 14-16 April 2014, Milano, Italy.

2013

[D21] Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2013). *Reverse Logistics: network design based on life cycle assessment*. In: Proceedings of International Conference on Advances in Production Management Systems: Sustainable Production and Service Supply Chains, Ed. Prabhu, V., Taisch, M., and Kiritsis, D., 415, 450–460, 9-12 September 2013, State College PA, USA.

[D20] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2013). *To a continuous numerical chain from CAD to CNC*. In: Proceedings of the 10th International Conference on Product Lifecycle Management: Product Lifecycle Management for Society, Ed. Bernard, A., Rivest, L., and Dutta, D., 409, 130-139, 6-10 July 2013, Nantes, France.

[D19] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Eynard, B. (2013). *Review of Mechatronic Systems Design and Organizational Approaches*. 10^{ème} Congrès International de Génie Industriel, 12-14 June 2013, La Rochelle, France.

2012

[D18] Daldoul, D., **Le Duigou, J.**, Hajri-Gabouj, S., Eynard, B. (2012). *Enterprise information systems' interoperability: Focus on PLM challenges*. In: Proceedings of International Conference on Advances in Production Management Systems: Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, Ed. Emmanouilidis, C., Taisch, M., and Kiritsis, D., 398, 184-191, 24-26 September 2012, Rhodes Island, Greece.

[D17] Messadia, M., Bufardi, A., **Le Duigou, J.**, Szigeti, H., Eynard, B., Kiritsis, D. (2012). *Applying serious games in lean manufacturing training*. In: Proceedings of International Conference on Advances in Production Management Systems: Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, Ed. Emmanouilidis, C., Taisch, M., and Kiritsis, D., 397, 558-565, 24-26 September 2012, Rhodes Island, Greece.

[D16] Bonvehí Rosich, M., **Le Duigou, J.**, Bosch-Mauchand, M. (2012). *Implementing Sustainable Supply Chain in PLM*. In: Proceedings of International Conference on Advances in Production Management Systems: Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, Ed. Emmanouilidis, C., Taisch, M., and Kiritsis, D., 398, 168-175, 24-26 September 2012, Rhodes Island, Greece.

[D15] Belkadi, F., Bosch-Mauchand, M., Kibamba, Y., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2012). *Functional architecture and specifications for Tolerancing Data and Knowledge Management*. In: Proceedings of the 9th International Conference on Product Lifecycle Management: Towards Knowledge-Rich Enterprises, Ed. Rivest, L., Bouras, A. and Louhichi, B., 35-45, 9-11 July 2012, Montreal, Canada.

[D14] Moser, G., **Le Duigou, J.**, Bosch-Mauchand, M. (2012). *Life cycle costing in Manufacturing Process Management*. In: Proceedings of the ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 3, 521-534, 2-4 July 2012, Nantes, France.

[D13] Perry, N., Bernard, A., Bosch, M., **Le Duigou, J.**, Xu, Y. (2012). *Economical and ecological cross evaluation*. 9^{ème} Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation, 06-08 June 2012, Bordeaux, France.

2011

[D12] Assouroko, I., Ducellier, G., Eynard, B., Boutinaud, P., **Le Duigou, J.** (2011). *Amélioration de la gestion collaborative des connaissances du produit à partir de technologies du Web Sémantique*. 7^{ème} Conférence Internationale Conception et Production Intégrée, 19-21 October 2011, Oujda, Morocco.

Période ante thèse de doctorat

[D11] Perry, N., Bernard, A., Bosch-Mauchand, M., **Le Duigou, J.**, Xu, Y. (2011). *Eco Global evaluation: cross benefits of economic and ecologic evaluation*. In: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering: Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Ed. Hesselbach, J. and Herrmann, C., 681-686, 02-04 May 2011, Braunschweig, Germany.

[D10] **Le Duigou, J.**, Bernard, A. (2011). *Product Lifecycle Management Model for Design Information Management in Mechanical Field*. In: Proceedings of the 21st CIRP Design

Conference: Interdisciplinary Design, Ed. Thompson, M.K., 207-213, 27-29 March 2011, Daejeon, South Korea.

2010

[D9] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2010). *Generic model for the implementation of PLM systems in mechanical SMEs*. In: Proceedings of the 7th International Conference on Product Lifecycle Management: Collaborative value creation throughout the whole lifecycle, Ed. Thoben, K.D., McMahon, C., Pels, H.J., Lützenberger, J., 439-448, 12-14 July 2010, Bremen, Germany.

[D8] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2010). *Application of PLM processes to respond to mechanical SMEs needs*. In: Proceedings of the 20th CIRP Design Conference: Global Product Development, Ed. Bernard, A., 119-128, 19-21 April 2010, Nantes, France.

2009

[D7] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *A function driven method for product lifecycle management*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Product Lifecycle Management: Supporting the Extended Enterprise, Ed. McMahon, C., Dutta, D. and Huang, G., 381 – 391, 06-08 July 2009, Bath, UK.

[D6] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *Approche inductive pour la spécification d'un système PLM générique*. In : Proceedings of the 8^{ème} Congrès International de Génie Industriel, Ed. Noyes, D. and Grabot, B., 10-12 June 2009, Bagnères de Bigorre, France.

[D5] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *Specification of a generic PLM system dedicated to SMEs based on a PPRO meta-model*. In: Proceedings of the 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering: Life Cycle Engineering in the Sustainable Age, 04-06 May 2009, Cairo, Egypt.

[D4] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *A constraints driven Product Lifecycle Management framework*. In: Proceedings of the 19th CIRP Design Conference: Competitive Design, Ed. Roy, R. and Shehab, E., 109-116, 30-31 March 2009, Cranfield, UK.

2008

[D3] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2008). *Inductive approach for the specification of a generic PLM system in an extended enterprise context*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Digital Enterprise Technology: From Numerical Simulation to Intelligent Cooperation, Ed. Bernard, A., 457-474, 22-24 October 2008, Nantes, France.

[D2] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Delplace, J.C., Gabriel, S. (2008). *Global Approach for Technical Data Management; Application to Ship Equipment Part Families*. In: Proceedings of the 18th CIRP Design Conference, 07-09 April 2008, Enschede, Netherlands.

[D1] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Delplace, J.C., Gabriel, S. (2008). *Approche globale pour la structuration et la gestion des données techniques du cycle de vie produit ; Application à une famille de poulies d'accastillage*. 7^{ème} Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation, 31 March-02 April 2008, Paris, France.

- [E19] Xiao, J., Anwer, N., Durupt, A., **Le Duigou, J.**, Eynard, B., (2017). *Investigation on STEP-based product models and manufacturing process management for additive manufacturing*. 22èmes Assises Européennes de la Fabrication Additive, 27-29 June 2017, Châtenay Malabry, France.
- [E18] Zheng, C., Bricogne, M., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2017). *Ingénierie et intégration multidisciplinaire à base de connaissances pour la conception de systèmes complexes*. 15^{ème} Colloque national AIP PRIMECA, 12-14 April, La Plagne, France.
- 2016
- [E17] Xiao, J., Eynard, B., Anwer, N., **Le Duigou, J.**, Durupt, A. (2016). *Geometry Models and Standards for Additive Manufacturing: A Preliminary Survey*, Virtual Concept International Workshop, 17-18 March 2016, Bordeaux, France.
- 2015
- [E16] Blondet, G., **Le Duigou, J.**, Boudaoud, N. (2015). *A knowledge-based system for numerical design of experiments*. 21^{ème} journées STP du GdR MACS, 26-27 November 2015, Nantes, France.
- [E15] Danjou, C., Xu, S., **Le Duigou, J.**, Anwer, N. (2015). *STEP-NC based Optimization and Smart Industrialization of NC Machining in the context of the Factory of the Future*. Congrès Français de Mécanique, 24-28 August 2015, Lyon, France.
- [E14] Ottino, A., **Le Duigou, J.**, Vosgien, T., Figay, N., Lardeur, P., Eynard, B. (2015). *Gestion et réutilisation des données de simulation : vers une approche de vérification et validation des modèles*. Congrès Français de Mécanique, 24-28 August 2015, Lyon, France.
- [E13] Blondet, G., Belkadi, F., **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Boudaoud, N. (2015). *SDM4DOE: Vers un système de gestion et d'optimisation des plans d'expériences numériques*. 14^{ème} Colloque national AIP PRIMECA, 31 March - 02 April, La Plagne, France.
- [E12] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2015). *OntoSTEP-NC : une approche ontologique pour la capitalisation des connaissances en usinage*. 14^{ème} Colloque national AIP PRIMECA, 31 March - 02 April, La Plagne, France.
- [E11] Blondet, G., Boudaoud, N., **Le Duigou, J.** (2015). *Simulation Data Management for Adaptive Design Of Experiment*. 11ème Congrès International Pluridisciplinaire en Qualité, Sécurité de Fonctionnement et Développement Durable, 17-19 March 2015, Nancy, France.
- [E10] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Eynard, B. (2015). *Modélisation des Interfaces Multidisciplinaires pour la Conception du Système Mécatronique*. 20^{ème} journées STP du GdR MACS, 05-06 February 2015, Troyes, France.
- 2014
- [E9] Zheng, C., **Le Duigou, J.**, Bricogne, M., Eynard, B. (2014). *Design Process for Complex Systems Engineering Based on Interface Modelling*. Forum AFIS, 11-12 December 2014, Cergy-Pontoise, France.
- 2013
- [E8] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2013). *Vers une chaîne numérique continue de la CAO à la CN*. 5^{ème} Journée Nationale du GdR MACS, 11-12 July 2013, Strasbourg, France.

[E7] Daaboul, J., **Le Duigou, J.**, Eynard, B. (2013). *Aluminium closed loop supply chain: The Suplight project*. 14ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision, 13-15 February 2013, Troyes, France.

2012

[E6] Messaadia, M., **Le Duigou, J.**, Karakoyun, F., Kiritsis, D., Eynard, B. (2012). *Vers une chaîne d'écoconception et de valorisation de solutions durables pour l'aluminium forgé*. Virtual PLM 2012, 13-14 November 2012, Reims, France.

Période ante thèse de doctorat

2010

[E5] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N. (2010). *Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue ; Application aux PME mécaniciennes*. Forum AFIS, 2-3 December 2010, Bordeaux, France.

2009

[E4] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *Cadre méthodologique pour faciliter une approche fédérée en entreprise étendue*. 3èmes Journées de l'Interopérabilité des Applications d'Entreprise du Pôle GSO, 24-25 June 2010, Nîmes, France.

[E3] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *Système générique support aux processus d'entreprise étendue : application aux PME mécaniciennes*. 12^{ème} journées STP du GdR MACS, 28-29 October 2009, Annecy, France.

[E2] Daaboul, J., Xu, Y., Vergara, V., **Le Duigou, J.**, Chevallereau, B., Rauffet, P., Laroche, F., Da Cunha, C., Bernard, A. (2009). *Amélioration de la performance industrielle par l'ingénierie numérique*. 11^{ème} colloque national AIP PRIMECA, 22-24 April 2009, La Plagne, France.

[E1] **Le Duigou, J.**, Bernard, A., Perry, N., Delplace, J.C. (2009). *Approche inductive pour la spécification d'un système PLM générique*. 3^{ème} Journée Nationale du GdR MACS, 17-18 March 2009, Angers, France.

F - CONGRES ET COLLOQUES SUR INVITATION

2017

[F6] **Le Duigou, J.**, Belkadi, F. (2017). *L'apport de la classification des objets SPPDM pour la maîtrise du couple Produit-Process dans le contexte de l'entreprise du futur*. Séminaire NAFEMS: SPDM - Gestion des processus et des données de simulation, 23 November 2017, Paris, France.

[F5] **Le Duigou, J.** (2017). *Ontology applications for manufacture engineering*. 4th Sino-French Workshop "Digital Factory and Smart Manufacturing" The Digital Transformation, 14 – 15 November 2017, Compiègne, France.

2015

[F4] **Le Duigou, J.** (2015). *Features Recognition for Manufacturing Knowledge Management*. 2nd South Carolina Aerospace Industry Conference & Expo, 26–27 August 2015, Colombia, USA.

2013

[F3] **Le Duigou, J.** (2013). *Les Outils du PLM : Innovation et Performance Industrielle*. Workshop CESI, 12 November 2013, Rouen, France.

[F2] **Le Duigou, J.** (2013). *Digital Factory and Digital Manufacturing*. Workshop AIP PRIMECA – Beihang University, 30 September 2013, Nantes, France.

[F1] **Le Duigou, J.** (2013). *L'organisation Innovante*. Université dans la Ville, 30 January 2013, Compiègne, France.

G - MEMOIRES DIPLOMANTS

2010

[G2] **Le Duigou, J.** (2010). *Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue. Application aux PME mécaniciennes*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.

2006

[G1] **Le Duigou, J.**, (2006). *Traitement de déchets amiantés par procédé RTM*, Thèse de Master, Université du Sud Toulon Var.

H - RAPPORTS DE PROJETS

2017

[H10] Blondet, G., Boudaoud, N., **Le Duigou, J** (2017), Livrable 2.4 du projet SDM4DOE, *Méthodes mathématiques et modélisation*, 39p.

2015

[H9] Blondet, G., Boudaoud, N., **Le Duigou, J** (2015), Livrable 2.3 du projet SDM4DOE, *Méthodes de Post-traitement statistique ANOVA*, 35p.

[H8] Blondet, G., Boudaoud, N., **Le Duigou, J** (2015), Livrable 2.1 du projet SDM4DOE, *Optimisation des études en cours d'exécution d'un PEN*, 70p.

2014

[H7] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Caillet, C., Karounni, H. (2014). Livrable 1.4 du projet Angel, *Propositions de corrections et d'améliorations du standard STEP-NC*, 36p.

2013

[H6] Andrainkaja, H., **Le Duigou, J.**, Danjou, C. (2013). Livrable 3.5 du projet Angel, *Etat de l'art sur l'éco-production (sustainable manufacturing)*, 19p.

[H5] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Caillet, C., Karounni, H. (2013). Livrable 1.2 du projet Angel, *Définition de l'architecture globale des SI et du modèle pivot et spécification des échanges*, 36p.

[H4] Danjou, C., **Le Duigou, J.**, Caillet, C., Ghafour, S. (2013). Livrable 1.1 du projet Angel, *Etat des lieux des standards*, 16p.

[H3] Daaboul, J., Valet, F., Penciu, D., Andriankaja, H., **Le Duigou, J.**, Kern, M., Aschehoug, S. (2013). Livrable 4.4 du projet SuPLight, *Eco-design tools for light weight solutions*, 114p.

2010

[H2] **Le Duigou, J.**, Medini, K., Sabe, R., Bombelli, F., Tori, A. (2010). Livrable 3.4 du projet SMCS, *Industrial scenarios definition*, 83p.

[H1] Daaboul, J., **Le Duigou, J.** (2010). Livrable 3.4 du projet Dorothy, *Knowledge Management for Mass Customization*, 51p.

ENCADREMENTS DE THESES ET MASTERS

TABLEAU 2 : ENCADREMENTS DE THESES, MASTERS ET POST-DOCTORATS DEPUIS 2011

11/12	12/13	13/14	14/15	15/16	16/17	17/18
					Thèse Ostermeyer	
					Post Doc Afoutni	
			Thèse Blondet			
		Post Doc Arduin				
		Post Doc Andriankaja				
	Thèse Zheng					
	Post Doc Penciu					
	Thèse Danjou					
Master Bonvehí						
Master Moser						

THESES ENCADREES

- **Danjou Christophe**, co-direction 50% avec B. Eynard, 2012-2015, ANGEL FUI14, *Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrée*. Qualification 60^{ème} et 61^{ème} section CNU. Soutenue le 03/12/2015, devant le jury composé de :
 - Pr. Emmanuel Caillaud, Université de Strasbourg, Président
 - Pr. Dimitris Kiritsis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Rapporteur
 - Pr. Luc Matthieu, IUT Cachan – Université Paris Saclay, Rapporteur
 - Dr. Nabil Anwer, Saint-Denis, Université Paris Nord, Examineur
 - Dr. Alexandre Durupt, Université de Technologie de Compiègne, Examineur
 - Pr. Louis Rivest, Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, Examineur
 - M. Philippe Audinet, Snecma, Membre invité
 - Pr. Benoit Eynard, Université de Technologie de Compiègne, Directeur de thèse
 - Dr. Julien Le Duigou, Université de Technologie de Compiègne, Directeur de thèse

Ces travaux ont pour périmètre l'interopérabilité et la gestion des connaissances dans les phases d'industrialisation et de fabrication dans le domaine de la mécanique, et plus particulièrement lors de l'industrialisation de pièces aéronautique usinées. Les échanges d'informations sur la chaîne numérique d'industrialisation sont unidirectionnels (due notamment au post-processeur et aux limites des standards en place : APT, CLFile) et ces informations sont mal exploitées en terme de capitalisation de connaissances (connaissances d'usinage réparties entre les gammistes, les post-processeurs et les compagnons).

La première proposition est une ontologie basée sur le standard STEP-NC : OntoSTEP-NC qui permet de structurer les informations d'usinage avec une granularité suffisante pour leur exploitation. Cette exploitation est proposée dans Closed-Loop Manufacturing, une approche basée sur OntoSTEP-NC qui permet de capitaliser les bonnes pratiques sorties des Machines-Outils à Commandes Numériques (MOCN), de

les intégrer dans l'ontologie, et de les restituer dans la FAO comme aide à la décision pour le gammiste.

La validation de cette approche et des modèles associés est faite au travers d'un démonstrateur basé sur une implémentation de l'ontologie sous Virtuoso Universal Server (OpenLink Software) et lié à la FAO CATIA V5 au travers de requêtes SPARQL. Des cas d'études sur une pièce académique (fourni dans le standard STEP-NC) et des pièces aéronautiques (pièces complexes SPRING utilisées pour tester NCSimul) viennent valider cette approche.

- **Zheng Chen**, co-direction 50% avec B. Eynard, 2012-2015, bourse CSC, *Design and integration of multi-disciplinary interfaces : method and modelling language for mechatronic systems engineering*. Qualification 60^{ème} et 61^{ème} section CNU. Soutenue le 14/12/2015, devant le jury composé de :

- Pr. Philippe Girard, Université de Bordeaux, Président
- Pr. Bernard Riera, Université de Reims Champagne Ardenne, Rapporteur
- Pr. Xiu-Tian Yan, University of Strathclyde, Rapporteur
- Dr. Matthieu Bricogne, Université de Technologie de Compiègne, Examineur
- Dr. Peter Hehenberger, Johannes Kepler University Linz, Examineur
- Pr. Frédéric Lamarque, Université de Technologie de Compiègne, Examineur
- M. Eric Noppe, Université de Technologie de Compiègne, Membre invité
- Pr. Benoît Eynard, Université de Technologie de Compiègne, Directeur de thèse
- Dr. Julien Le Duigou, Université de Technologie de Compiègne, Directeur de thèse

Ces travaux se focalisent sur l'interopérabilité dans les phases de conception préliminaires et détaillées dans les domaines de la mécanique, électronique et informatique et plus particulièrement lors de la conception intégrée de systèmes mécatroniques. Les échanges entre experts des différentes disciplines restent difficiles et peu tracés. Ceci engendre des difficultés lors de l'intégration des sous-systèmes et globalement des produits moins intégrés.

La première proposition de ces travaux est de s'appuyer sur la notion d'interface (au sens ingénierie système du terme), en proposant une définition, une classification des différents types d'interfaces et un modèle de données venant compléter les principaux modèles produits existants sur cette notion (notamment STEP AP233 et CPM). La seconde proposition est une méthodologie de conception s'appuyant sur le cycle en V et la méthode de conception hiérarchique combinée à des règles métier pour la détection des incompatibilités d'interfaces.

Les deux apports sont implémentés dans CATIA V6 et testés sur différents cas d'études, dont un système optomécatronique de mesure 3D, un convoyeur électrique et un drone quadripode.

- **Blondet Gaëtan**, co-direction 50% avec N. Boudaoud, 2014-2017, FUI16 SDM4DOE, *Système à base de connaissances pour le processus de plan d'expériences numériques*. Soutenue le 09/06/2017 devant le jury composé de :

- Pr. Michelle Sergent, Université Aix-Marseille, Présidente
- Pr. Abdelaziz Bouras, Qatar University, Rapporteur
- Dr. Bertrand Rose, Université de Strasbourg, Rapporteur
- Pr. Zorha Cherfi-Boulanger, Université de Technologie de Compiègne, Examinatrice

- Pr. Alain Bernard, Ecole Centrale de Nantes, Examineur
- M. Gilles Besombes, Responsable Calcul Mécanique, Valeo, Membre invité
- Dr. Nassim Boudaoud, Université de Technologie de Compiègne, Directeur de thèse
- Dr. Julien Le Duigou, Université de Technologie de Compiègne, Directeur de thèse

Ces travaux ont pour cadre la gestion des données de simulation et plus particulièrement celles relatives aux plans d'expériences numériques (PEN). Les PEN sont actuellement très complexes à mettre en œuvre limitant ainsi leur utilisation dans le processus de développement produit. De nombreuses méthodes existent pour créer le plan (adaptatif ou non), le modèle de substitution (polynômes, krigeage...). Mais le choix des différentes méthodes, leurs paramétrages et l'impact de leurs combinaisons rendent ces méthodes trop longues à mettre en œuvre et nécessitent un niveau d'expertise très élevé. La proposition de cette thèse est la mise en place d'un système à base de connaissances afin de fournir de l'aide à la décision lors du choix et du paramétrage des différentes méthodes. Il s'appuie sur un modèle de données SDM (Simulation Data Management) pour stocker de manière structurée les informations nécessaires à la mise en place des PEN précédents. Puis un système d'inférence à base de réseaux bayésiens est proposé pour fournir de l'aide aux choix parmi les différentes méthodes et pour faciliter leurs paramétrages.

Le démonstrateur se base sur URANIE pour les PEN (exécuté en Code_Aster), R pour les réseaux bayésiens, Virtuoso pour la base ontologique et Python pour les différents scripts. Les cas d'études sont issus de l'industrie automobile et de l'industrie nucléaire.

- **Emeric Ostermeyer**, co-direction 50% avec A. Durupt, 2016-2019, FUI21 LUCID, *Chaîne numérique d'industrialisation : modèle d'intégration des données métier et de gestion d'informations hétérogènes en usinage*. Soutenance prévue en 2019.

Ces travaux font suite aux travaux de Christophe Danjou et s'inscrivent donc dans le même contexte d'aide à la décision pour l'industrialisation de pièces usinées aéronautiques.

Lors des travaux de cette thèse, la structuration des connaissances d'usinage doit être complétée, avec par exemple les connaissances concernant l'usinage grande vitesse (UGV) ou la fabrication additive (qui ne sont pas encore incluses dans STEP-NC). Il faudra également permettre l'intégration de données plus nombreuses et plus hétérogènes (photos, sorties de capteurs machines, code G, fichiers FAO...).

La seconde partie de la thèse concernera l'utilisation de ces connaissances. Il faudra être capable d'extraire les connaissances en s'appuyant sur ces ensembles de données structurées ou non. Des techniques propres aux données massives comme les techniques de fouille de données seront alors utilisées pour permettre de proposer une aide à la décision au gammiste en complément d'autres techniques que nous avons déjà testées dans d'autres contextes (requêtes complexes, réseaux bayésiens, bond graph, réseaux de neurones...).

MASTERS ENCADRES

- **Bonvehí Rosich Maria**, co-encadrement 50% avec M. Bosch-Mauchand, 2012, *Integration of Sustainable Supply Chain Management in PLM system*.

L'objectif de ce master était de permettre une intégration des aspects durables en utilisant les informations contenues dans les systèmes PLM.

- **Moser Gerhard**, co-encadrement 50% avec M. Bosch-Mauchand, 2012, *Life Cycle Costing in Manufacturing Process Management*.

L'objectif de ce master était l'utilisation de l'information produit contenue dans les systèmes PLM pour permettre le *design to cost*.

POST-DOCTORATS

- **Penciuc Diana**, post-doctorat, bourse régionale sur le projet SuPLight, 2012-2014.

Ce post-doctorat portait principalement sur le développement de la plateforme SuPLight afin d'intégrer les aspects logistique inverse et éco-conception. Les principaux apports ont eu pour objet les architecture orientée services (Service Oriented Architecture : SOA) pour l'interopérabilité des plateformes PLM.

- **Arduin Pierre-Emmanuel**, post-doctorat, bourse Labex MS2T, 2013-2014.

L'objectif de ce post-doctorat était de travailler sur l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information, notamment entre systèmes PLM en utilisant les ontologies.

- **Andriankaja Hery**, post-doctorat, projets SuPLight et Angel, 2013-2014.

Ce post-doctorat traitait de l'intégration des aspects durables sur la chaîne numérique, premièrement dans le projet SuPLight au niveau de l'éco-conception, puis sur le projet ANGEL sur les aspects *sustainable manufacturing*.

- **Afoutni Zoubida**, post-doctorat, bourse Labex MS2T, 2016-2017.

L'objectif de ce post-doctorat était de travailler sur les systèmes de systèmes d'information, notamment en utilisant des systèmes multi-agents pour assurer l'interopérabilité technique.

ACTIVITES PARTENARIALES ET DE VALORISATION

Les activités partenariales et de valorisation que j'ai menées sont principalement des projets de recherches collaboratives nationaux et européens. Ces projets m'ont permis de confronter mes recherches avec les besoins industriels. Ils ont été bénéfiques pour affiner certaines de mes problématiques et pour valider sur des cas d'études réels mes concepts et méthodes. Ces projets ont également été bénéfiques en terme d'enseignement, pour enrichir mes cours par des exemples réels, des intervenants expérimentés et une meilleure compréhension des compétences nécessaires pour les industriels concernant les ingénieurs de demain.

TABEAU 3 : PROJETS COLLABORATIFS DEPUIS 2011

11/12	12/13	13/14	14/15	15/16	16/17	17/18
					LUCID (FUI)	
			SDM4DOE (FUI)			
		SIP (IRT)				
	Angel (FUI)					
SuPLight (FP7)						
ActionPlanT (FP7)						

Nom du projet	LUCID (Laboratoire d'Usinage par Caractérisation Intelligente des Données)
Durée	36 mois (Septembre 2016- Septembre 2019)
Contexte	FUI 21
Responsabilités	Collaborateur
Subvention	UTC : 210K€
Partenaires	SPRING* ; ESILV ; UTC ; ENS Cachan ; SAFRAN SNECMA; SAFRAN Tech; UF1; VENTANA
Description	L'atelier est devenu un terrain où transite une masse importante de données numériques non gérées et exploitées. Les usineurs d'aujourd'hui subissent ce phénomène de <i>big data</i> en atelier et ne disposent pas d'une chaîne numérique capable de gérer ces données. Sur les fondations construites par le projet ANGEL, LUCID contribue à l'amélioration de l'utilisation de la chaîne numérique par la création d'un système pour gérer, intégrer et exploiter de manière intelligente l'ensemble de ces données pour l'assistance à la programmation de gammes d'usinage en se basant sur le savoir-faire acquis.

Nom du projet	SDM4DOE (Simulation Data Management for Design Of Experiments)
Durée	30 mois (Janvier 2014- Juin 2017)
Contexte	FUI 16
Responsabilités	Membre Comité Pilotage/ Comité Technique
Subvention	UTC : 170K€
Partenaires	Valeo* ; CEA ; UTC ; ECN ; NECS; Alneos
Description	En milieu industriel, les plans d'expériences numériques (PEN) sont des processus itératifs d'étude extrêmement puissants pour l'analyse du

comportement multi-physiques de structures. Leur application doit dans ce projet reposer sur une gestion de données techniques et sur un environnement du type cluster, avec une automatisation poussée. Un des résultats est la mise en place d'un système à base de connaissances basé sur une plateforme logicielle *open source* incluant des offres de services à destination de tous les bureaux d'études utilisant des PEN en conception.

Nom du projet	<u>SIP (Standards & Interopérabilité PLM)</u>
Durée	36 mois (Septembre 2013- Septembre 2016)
Contexte	IRT SystemX
Responsabilités	Animateur du Cercle académique
Subvention	UTC : 35K€
Partenaires	Airbus Group Innovations*; Boost Conseil; Datakit; SOFYNE; UTC; Université Paris 8
Description	Le projet SIP cherche à harmoniser les processus et les solutions PLM au sein de l'industrie manufacturière pour créer une dynamique numérique dans l'ensemble de l'écosystème et faciliter les échanges sur la chaîne de sous-traitance. Le projet a ainsi créer une méthodologie et une plateforme test pour accélérer l'implémentation des standards et l'interopérabilité PLM, basées sur une approche <i>open source</i> permettant de prototyper et valider des procédés d'interopérabilité.

Nom du projet	ANGEL (Atelier Numérique coGnitif intEropérable et agiLe)
Durée	24 mois (Septembre 2012- Septembre 2014)
Contexte	FUI14
Responsabilités	Membre Comité Pilotage/ Comité Technique
Subvention	UTC : 287K€
Partenaires	SPRING* ; AIRBUS ; MBD ; SNECMA ; CADLM ; DATAKIT ; UF1 ; ENS ; UTC
Description	Le projet ANGEL a pour objectif de développer un système pour l'industrialisation optimisée intelligente de l'usinage. Il apporte une innovation majeure pour les usineurs français PME, ETI et Grands Groupes avec : la capitalisation et l'exploitation du savoir-faire de l'usinage à partir des programmes d'usinages existants, la conversion directe des trajectoires-outils FAO en programmes machine, optimisés et validés du 1 ^{er} coup, la génération de devis rapide, précis et auto-convergent à partir de la capitalisation d'expérience et de la simulation d'usinage, une infrastructure modulaire et basée sur des standards (STEP-NC, Web service,...) et une prise en compte des indicateurs d'éco-production.

Nom du projet	<u>SuPLight (Sustainable and efficient Production of Light weight solutions)</u>
Durée	36 mois (Juin 2011 - Juin 2014)

Contexte	FP7-FoF-NMP-2010
Responsabilités	Responsable Tâche
Subvention	UTC : 260K€ + 88K€ (aide région Picardie)
Partenaires	SINTEF* ; GUC ; RT ; Misa ; USTUTT ; RD&T ; EPFL ; Intercim ; UTC ; C3M ; HAI ; NTNU
Description	SuPLight est un projet de recherche multidisciplinaire, combinant la physique à l'échelle atomique, la métallurgie, la mécanique des structures, les algorithmes d'optimisation, l'analyse de tolérances, l'analyse du cycle de vie, la fabrication et la modélisation d'entreprise. Cette multidisciplinarité est un grand défi, mais aussi la clé du véritable changement souhaité par ce projet. L'objectif est de réduire le poids des pièces de structure et d'améliorer l'éco-conception des pièces en aluminium en construisant des modèles innovants de développement durable avec une approche holistique du cycle de vie. Le projet a développé de nouvelles théories, de nouvelles méthodes et de nouveaux concepts qui ont été testés et démontrés sur des cas industriels.

Nom du projet	ActionPlanT
Durée	24 mois (Juin 2010 - Juin 2012)
Contexte	FP7-FoF-ICT-2010
Subvention	UTC : 42K€
Partenaires	SAP* ; Dassault Systèmes ; IPK ; Tecnia ; Agoria ; University Patras ; PoliMI ; EPFL ; Platte
Description	ActionPlanT vise à développer une vision sur le rôle des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans l'industrie manufacturière européenne. La principale activité d'ActionPlanT est d'établir une vision du rôle des TIC dans l'usine du futur, en coopération avec la Commission Européenne. Les activités ActionPlanT comprennent l'élaboration d'une feuille de route pour donner la priorité aux thèmes les plus prometteurs pour le prochain programme cadre de recherche et d'innovation (H2020, couvrant la période 2014-2020).

Nom du projet	<u>SMCS (Sustainable Mass Customisation for Sustainability)</u>
Durée	36 mois (Mai 2010 – Mai 2013)
Contexte	FP7-FoF-NMP-2010
Responsabilités	Responsable Sous-Projet
Subvention	ECN : 300K€
Partenaires	SUPSI* ; PoliMI ; ECN ; TTS ; ITESM ; Ropardo ; INCAS ; THEMA ; Lion ; AIICA ; Co.Fi.Plast ; Podium ; Homag
Description	Le projet SMCS vise à soutenir les entreprises manufacturières européennes pour s'adapter aux pressions concurrentielles mondiales en développant des méthodes et des technologies innovantes permettant une fabrication personnalisée, orientée client et éco-efficace, dans un large éventail de secteurs. À cette fin, la vision de SMCS est de définir et de rechercher un nouveau paradigme de production, une personnalisation de

masse durable, tout en présentant la personnalisation comme l'un des principaux moteurs de la réussite future des industries européennes.

Nom du projet	Dorothy (Design Of customeR dRiven shOes and multi-siTe factory)
Durée	36 mois (Juillet 2008 – Juillet 2011)
Contexte	FP7-FoF-NMP-2007
Responsabilités	Responsable Tâche
Subvention	ECN : 300K€
Partenaires	SUPSI*; ECN ; Hugo Boss AG; Alpina ; TTS ; INSPIRE; IFF; University Patras LMS; ITIA-CNR; CTC; UCS; CASP; Fidas ; Decathlon
Description	L'industrie européenne des chaussures est confrontée à une pression concurrentielle intense et croissante émanant des pays en développement, qui entrent sur le marché mondial offrant une main-d'œuvre peu coûteuse pour la production de produits à faible valeur ajoutée. Dorothy vise à transformer l'industrie de la chaussure et son modèle pour renforcer la capacité de l'Europe à rester compétitive grâce à une valeur ajoutée élevée pour le client. La mission de Dorothy est de concevoir des chaussures axées sur les clients et de les fabriquer intelligemment partout afin d'obtenir une compétitivité sur les marchés mondiaux.

Période ante thèse de doctorat

Nom du projet	SEINE (Standards pour l'Entreprise Innovante Numérique Etendue)
Durée	24 mois (Juillet 2006 - Juillet 2008)
Contexte	TICPME2010
Subvention	NC
Partenaires	GIFAS* ; DA ; EADS-IW ; Safran ; Thales ; AFNeT ; ARES FC ; MICADO ; OpticsValley; PI3C CA
Description	L'objectif de ce projet est d'accélérer la numérisation de la supply chain aérospatiale et défense, et des filières industrielles partenaires, grâce à la mise en place de solutions ouvertes et interopérables. Premièrement en accélérant le déploiement des modes de travail numériques, jusqu'aux fournisseurs de rang n dans le domaine de la logistique, au travers de portails fournisseurs privés ou de plates-formes collaboratives mutualisées, pour faciliter l'accès des PME à ces technologies. Deuxièmement en portant le même effort (standardisation, plates-formes opérationnelles) dans le domaine du PLM (Product Lifecycle Management), qui couvre les activités de conception, industrialisation et support du cycle de vie des produits.

* Chef de projet

ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET D'INTERET COLLECTIF

RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES

TABLEAU 4 : RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES

11/12	12/13	13/14	14/15	15/16	16/17	17/18
					Resp. PRFE	
		CEVU				
			RPA			
			RFC			
		Bureau GSM				

Responsable du Pôle Relations Formation-Entreprises (PRFE) de l'UTC (2016-...)

- Gestion financière
- Gestion des ressources humaines (15 collaborateurs)
- Service Apprentissage
 - 24 étudiants/an en Génie Informatique et Génie Mécanique
 - Membre du Conseil d'Administration du CFA IRFA-APISUP
- Service Stages
 - 1700 étudiants/an répartis dans 5 spécialités (Génie Informatique, Génie Biologique, Génie des Procédés, Génie des Systèmes Urbains, Ingénierie Mécanique)
 - Stage ouvrier (1 mois en L2), stage ingénieur (6 mois en M1) et projet de fin d'étude (6 mois en M2)
- Service Partenariats
 - Taxe d'apprentissage (Quota et Barème)
 - Développement des partenariats Campus (60 évènements/an)
 - Observatoire des métiers (enquête CGE sur plus de 2300 étudiants/an)

Responsable Diplôme d'Université Ingénierie de la Performance Industrielle

- Création et responsable du Diplôme Universitaire

Responsable Pédagogique Apprentissage (RPA) au département GSM (2014-2016).

- Participation aux réflexions sur la pédagogie en alternance, mise en place en mécanique.
- Récompensé en tant que tuteur académique par le CFA IRFA-APISUP lors des 5^{èmes} trophées de l'apprentissage dans l'enseignement supérieur en Picardie (2014).
- Membre des jurys d'admission GSM (2/an), de suivi GSM (2/an), de suivi Apprentissage (2/an) et de diplomation GSM (2/an).

Référent Formation Continue (RFC) au département GSM (2014-2016).

- Ingénierie pédagogique et ouverture de nouvelles offres (Diplôme Universitaire, stage long, stage court...) (2014-2016).
- Ouverture du contrat de professionnalisation en Mécanique (2015).
- Ouverture du diplôme d'ingénieur en formation continue par alternance en Mécanique (2015).
- Membre du groupe de travail sur la qualité de la FC (2015).
- Membre des jurys d'admission FC en cycle préparatoire (1/an), auditions des candidats (2/an)

Membre élu enseignant-chercheur du CEVU (2012-17, réélu 2013, mandat de 4 ans).

- Animation du Groupe de Travail Formation Continue du CEVU, 2014-2015.

Membre élu enseignant-chercheur au bureau du département GSM (2012-2015, mandat de 2 ans).

- Participation au groupe de travail sur la réforme de la filière Conception Mécanique Intégrée (2014-2015).
- Participation au groupe de travail sur Mécanique 2022 sur la roadmap de la mécanique à l'UTC à horizon 10 ans (2014).

Comité de sélection

- Président du comité de sélection du poste d'enseignant en conception mécanique UTC (2017)
- Président du comité de sélection du poste d'enseignant en génie logiciel UTC (2017)

RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES

Membre de sociétés savantes et communautés scientifiques :

Internationales

- Membre expert scientifique de l'International Federation of Information Processing, Work Group 5.1: global product development for the whole life-cycle ([IFIP WG5.1](#)).
- Membre de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers, Chapter Systems, Man, and Cybernetics Society ([IEEE SMC](#), membre du bureau français) (n° 93448534) (2015-...).
- Membre de l'International Council on Systems Engineering (INCOSE, section française [AFIS](#)), au sein du Comité Technique Management de l'Ingénierie Système (CT MIS) (n°262182) (2016-...).
 - Correspondant scientifique du projet IS&PLM (2016)
 - Représentant du Laboratoire Roberval (2016-...)

Nationales

- Membre du Groupe de Recherche Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes dynamiques ([GdR MACS](#)) du CNRS, notamment pour les Groupes de Travail :
 - Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie du produit (IS3C),
 - Ingénierie d'Entreprise et de Système d'Information Dirigée par les Modèles (Easy DIM)
 - Compétences et Connaissances en Entreprise Industrielle (C2EI).
- Membre du Groupe Thématique National du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation : Nanotechnologies, Advanced Materials, Biotechnology and Advanced Manufacturing and Processing ([MESR GTN NMBP](#)) sur les thématiques Factory of the Future (2014-...).
- Membre de l'Association Française de Mécanique (AFM) participant au Groupe Scientifique et Technique Usine du Futur : mécanique et productique (GST05).
- Membre du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) S-mart, anciennement Atelier Inter-établissements de Productique et Pôle Ressources Informatiques pour la MECAnique ([AIP PRIMECA](#)) (2013-...).
 - Animatrice des perspectives PLM 2014-2017.
- Membre du pôle de compétitivité Systematic, participant au Groupe de Travail Outils de Conception et Développement de Systèmes ([Systematic GT OCDS](#)) (2012-...).

Locales

- Membre du Laboratoire d'Excellence Maîtrise des Systèmes de Systèmes Technologiques (Labex [MS2T](#)) (2015-...).
- Membre du Laboratoire Commun ANR UTC/DeltaCAD: DIgital mock-up for Multi-EXPertises integration (Labcom [DimEXP](#)) (2014-...)

Membre de comités scientifiques de conférences :

- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 9-12 July 2017, Seville, Spain.
- 12ème Congrès International de Génie Industriel, 3-5 May 2017, Compiègne, France.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 11-13 July 2016, Columbia, SC, USA.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 19-21 October 2015, Doha, Qatar.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 7-09 July 2014, Yokohama, Japan.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 6-10 July 2013, Nantes, France.

Travaux de normalisation :

- Expert AFNOR (2015-...)
 - Membres du Groupe de travail PLANS D'EXPÉRIENCES FD X06 081 : Mise en œuvre des plans d'expériences par essai ou par simulation numérique : choix et exemples d'application.

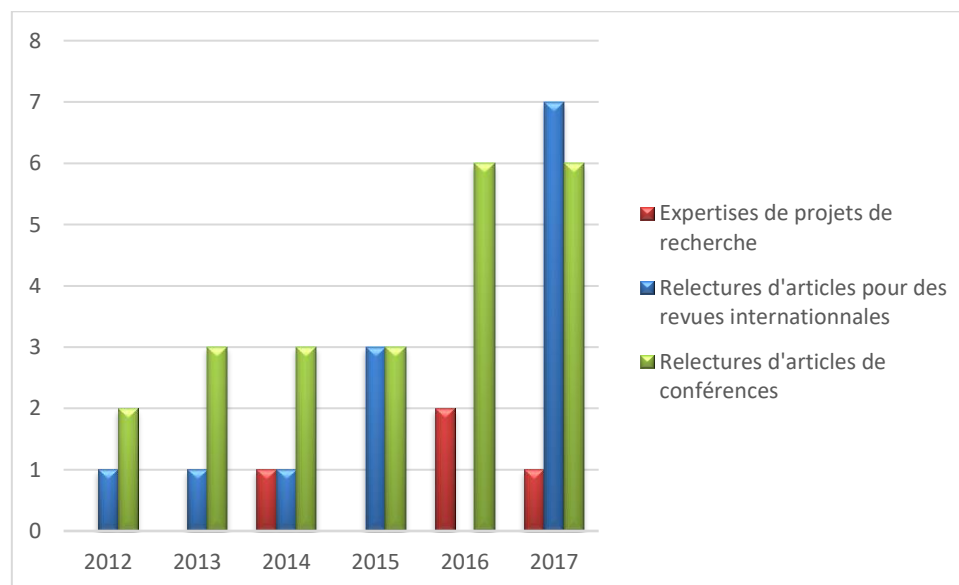
Expertises de projets, relectures d'articles de revues ou de conférences (FIGURE 4) :

FIGURE 4: RELECTURES ET EXPERTISES EFFECTUEES PAR ANNEE

Expertises de projets de recherches :

- Fondation canadienne pour l'innovation, 2017.
- Agence Nationale pour la Recherche, 2016.
- Région Centre Val de Loire, 2016.
- Fondation UNIT, Université Numérique Ingénierie et Technologie, 2014.

Relecteur d'articles pour des revues internationales :

- International Journal of Product Lifecycle Management, 2017 (3), 2014
- Concurrent Engineering Research and Applications, 2017 (2), 2015
- Journal Composites Part B, 2017
- Journal of Engineering Manufacture, 2017
- Journal of Industrial Engineering, 2015
- Journal of Cleaner Production, 2015
- International Journal of Product Development, 2013
- Techniques de l'ingénieur, 2012

Relecteur d'articles de conférences :

- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 9-12 July 2017, Seville, Spain.
- 12ème Congrès International de Génie Industriel, 3-5 May 2017, Compiègne, France.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 11-13 July 2016, Columbia, SC, USA.
- 11th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, 9-13 May 2016, Aix-en-Provence, France.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 19-21 October 2015, Doha, Qatar.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 7-09 July 2014, Yokohama, Japan.
- IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 6-10 July 2013, Nantes, France.
- IFIP International Conference Advances in Production Management Systems, 24-26 September 2012, Rhodes Island, Greece.
- ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 02-04 July 2012, Nantes, France.

Chairman de sessions de conférences :

- *Usine du futur - systèmes de production intelligents et interconnectés* in 12^{ème} Congrès International de Génie Industriel, 3-5 May 2017, Compiègne, France.
- *Connaissance produit* in 5^{ème} Journée Nationale du GdR MACS, 11-12 July 2013, Strasbourg, France.
- *PLM infrastructure and implementation processes* in IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 6-10 July 2013, Nantes, France.
- *Application of Modern Learning Technologies in Manufacturing and Production Systems* in IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, 24-26 September 2012, Rhodes Island, Greece.

Jury de thèse :

- Membre du jury de thèse de Cong Pham, Université de Technologie de Compiègne, 15 juin 2017.

Organisation de congrès :

- Co-chair de la journée *Performance industrielle et performance R&D, quels enjeux d'excellence ?* (+ de 100 entreprises présentes), 13 October 2015, Compiègne, France.
- Co-chair du Think Tank sur le Lean Management (+ de 20 dirigeants d'entreprises), *premier rdv sur l'Obeya*, 09 July 2015, Paris, France.
- Membre du comité d'organisation du Special track of IEEE/SMC CSCWD 2015 : Innovation and Knowledge Intensive Approaches for Computer Supported Cooperative Work in Design, 04 May 2015, Compiègne, France.
- Co-chair de la journée *Le Lean Development au service de l'excellence R&D* (+ de 100 entreprises présentes), 21 October 2014, Compiègne, France.

Période ante thèse de doctorat

- Participation à l'organisation de la conférence 20th CIRP Design Conference, 19-21 April 2010, Nantes, France.
- Participation à l'organisation de la conférence 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, 22-24 October 2008, Nantes, France.

TRAVAUX DE RECHERCHES ET PERSPECTIVES

1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT THEMATIQUE

Ce chapitre introductif présente mes travaux de recherche en conception mécanique. Après un rapide résumé, Je m'appliquerai à positionner mes travaux, tout d'abord thématiquement en regard des communautés scientifiques nationales et internationales, puis institutionnellement en présentant en particulier l'équipe de recherche dans laquelle ces travaux ont été menés. J'exposerai ensuite ma méthode de recherche avant de conclure sur la structure de ce mémoire.

1.1. UN BREF RESUME DE MES RECHERCHES

Ces dix dernières années ont vu de nombreuses transformations de l'industrie manufacturière. La crise de 2008 a forcé nombre d'entre elles à revoir leurs paradigmes les plus fondamentaux. Les challenges identifiés il y a dix ans sont maintenant pleinement présents et les entreprises doivent y faire face et évoluer. La transformation numérique avec l'évolution des moyens de communications mobiles, l'arrivée des objets connectés dans l'industrie, le *big data*... a ouvert de nouvelles possibilités que certaines entreprises ont su saisir pour profondément transformer leurs business model et révolutionner des secteurs d'activité entiers (Uber, Airbnb, Deezer...). D'après le 8^{ème} programme cadre de l'Union Européenne, les principaux challenges pour les industries manufacturières étaient le développement durable, la personnalisation des produits, la flexibilité de la production, l'innovation produit et processus, l'optimisation de la valeur et la prise en compte du facteur humain (FIGURE 5). Si ces challenges sont toujours présents, s'ajoutent aujourd'hui la complexification toujours plus grande des systèmes, allant vers la prise en compte des systèmes de systèmes, l'afflux toujours plus massif des données venant du produit, que l'on ne sait pas encore complètement exploiter pour l'instant, ou encore l'avènement de l'économie collaborative qui refondent nos modes de travail. Ces changements entraînent irrémédiablement de nouvelles façons de concevoir les systèmes mécaniques. Afin de pouvoir répondre à ces défis, il faut être capable de concevoir en prenant en compte l'intégralité du cycle de vie des produits, de l'idée au recyclage, avec aujourd'hui la possibilité d'avoir des informations en temps réel provenant de toutes ces phases, que ce soit des données sur la production (qui a fabriqué cette pièce, avec quelle matière, quel programme d'usinage, quelles conditions de coupe...) mais aussi sur l'utilisation (quelle panne est survenue sur ce système, après combien d'heures d'utilisation, quelles étaient les conditions d'utilisation à ce moment...) ou le recyclage (comment peut-on recycler cette pièce, quelle est la meilleure filière de recyclage en fonction de son état...). L'explosion de la quantité de données utilisables lors du développement de produit pour prendre en compte tous ces aspects nous oblige à penser de nouvelles façons d'utiliser ces informations pour la conception. Il faut être capable d'utiliser ces données intelligemment pour permettre aux différents utilisateurs de retrouver les connaissances utiles, de s'en servir, voire de construire de nouvelles connaissances grâce à elles.

Mes travaux de recherches s'inscrivent dans ce cadre, proposant des structurations de l'information pour le développement de systèmes mécaniques et des systèmes à base de connaissances (Knowledge Based Systems : KBS) pour exploiter ces informations.

Mes recherches ont débuté en 2007 lors de mon doctorat qui portait sur un cadre de modélisation pour les systèmes Product Lifecycle Management (PLM) en entreprise étendue. Cette dichotomie structuration/exploitation des connaissances était déjà présente dans mes travaux de thèse, même si je n'en avais pas pleinement conscience alors, avec la proposition d'un modèle de données générique pour structurer l'information, et une série de systèmes à base de connaissances spécifiques pour exploiter ces informations. Le modèle de données permettant de structurer les informations Produit / Activité /

Processus / Organisation (PARO) fut proposé avec une méthode permettant sa spécialisation en fonction des domaines industriels ou des besoins spécifiques des entreprises utilisatrices.

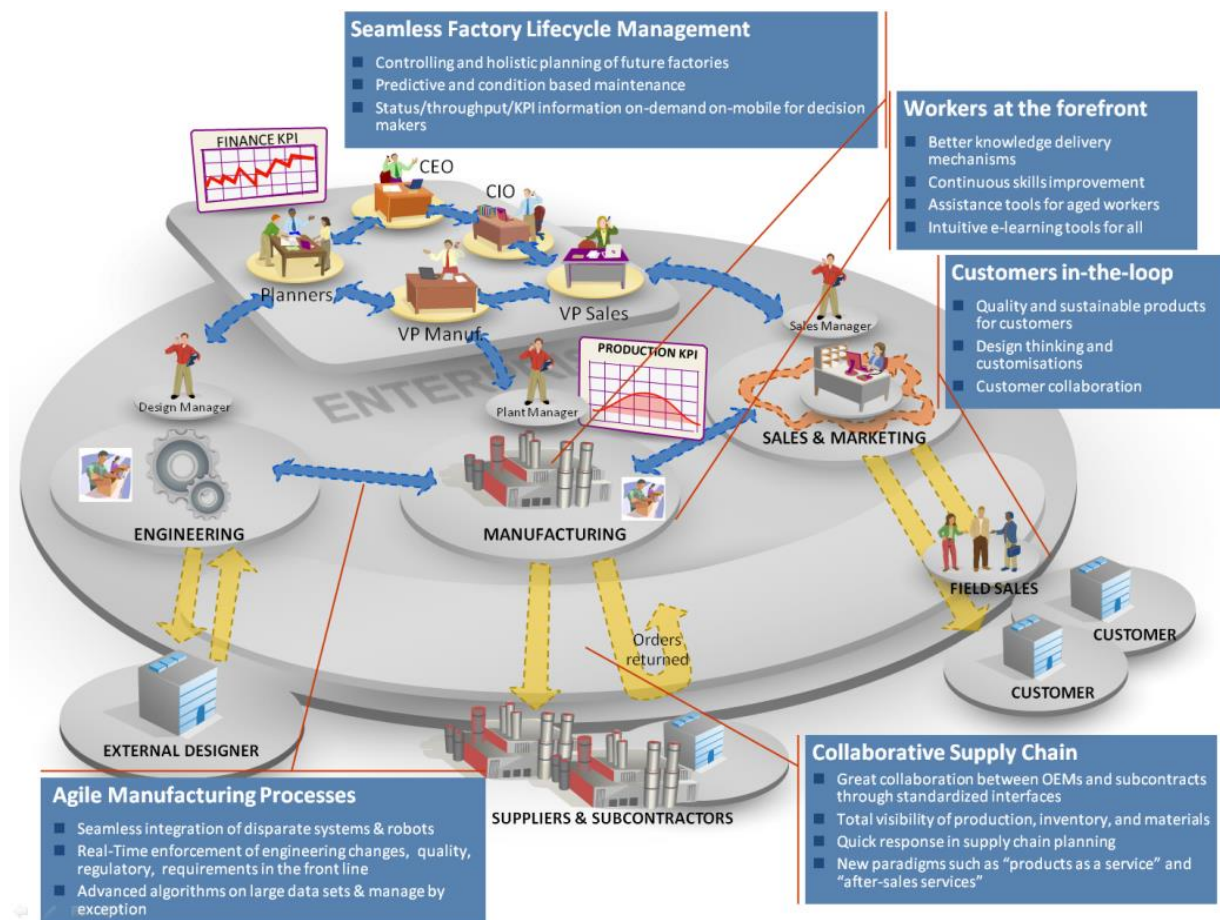


FIGURE 5: L'USINE DU FUTUR (ACTIONPLANT, 2011)

En arrivant ensuite à l'UTC en 2011, j'ai eu la chance de démarrer sur deux projets européens du FP7¹ qui m'ont permis de positionner mes recherches pour le commencement de ma carrière d'enseignant-chercheur. ActionPlanT, visant à définir une vision et la feuille de route d'Horizon 2020 pour l'ICT for Manufacturing, et SuPLight qui visait à proposer une conception holistique pour améliorer les performances du produit en intégrant les différentes expertises métiers du cycle de vie du produit.

J'ai ensuite continué à travailler sur la structuration des informations, avec notamment des ontologies intégrant des dimensions supplémentaires nécessaires au développement de systèmes mécaniques (FIGURE 6). La thèse de Chen Zheng permet d'inclure les aspects multidisciplinaires et multi-expertises intégrant ainsi les informations issues de la conception mécanique, électronique et informatique lors du développement de systèmes mécatroniques. Cette ontologie appelée MIM pour Multidisciplinary Interface Model se base sur STEP AP233 et CPM pour proposer une structuration des informations au préalable disparates au sein de différents bureaux d'études. La thèse de Gaëtan Blondet propose une ontologie pour stocker de manière structurée les informations nécessaires aux simulations complexes et aux plans d'expériences numériques notamment en s'appuyant sur la norme STEP AP209. Enfin les phases aval du cycle de vie du produit furent également explorées avec notamment les phases

¹ 7^{ème} programme cadre de la commission européenne

d'industrialisation, de fabrication et de logistique. La thèse de Christophe Danjou s'intéressa à l'interopérabilité dans les phases d'industrialisation et de fabrication. Une des propositions fut une ontologie basée sur le standard STEP-NC (AP238) : OntoSTEP-NC qui permet de structurer les informations d'usinage avec une granularité suffisante pour leur réexploitation. L'ensemble de ces ontologies et modèles de données sont liés au modèle PARO décrit dans ma thèse qui assure la cohérence au niveau méta entre ces travaux.

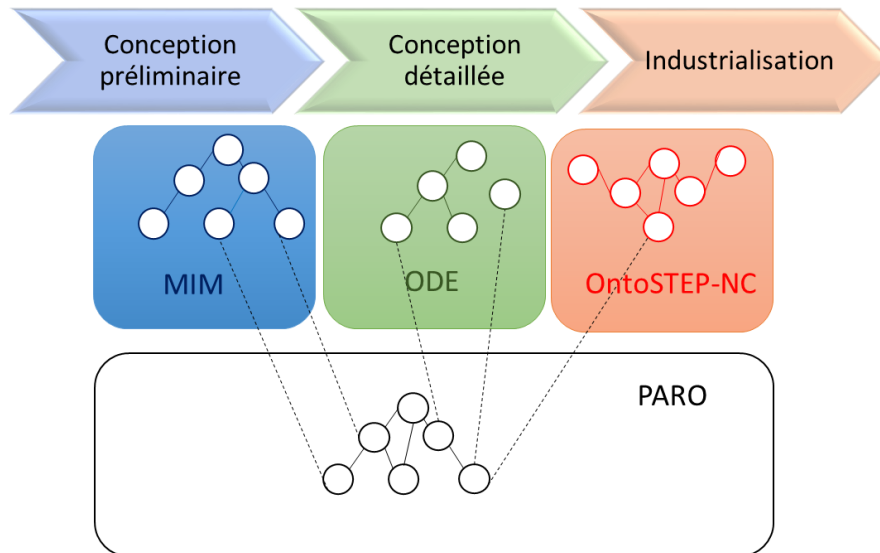


FIGURE 6: ONTOLOGIES ET MODELES DE DONNEES

La deuxième partie de mon programme de recherche concerne l'exploitation de ces informations afin de fournir de l'aide à la décision lors du processus de conception de systèmes mécaniques. Plusieurs méthodes et modèles ont été proposés pour exploiter ces informations. Les moteurs d'inférence requêtent l'information dans les ontologies et restituent les connaissances.

Plusieurs méthodes ont été testées dans les différentes thèses que j'ai encadrées (FIGURE 7). Des requêtes complexes sont proposées dans la thèse de Christophe Danjou dans le Closed-Loop Manufacturing, un système de retour d'expériences basé sur OntoSTEP-NC qui permet de capitaliser les bonnes pratiques des fichiers en Code-G ou STEP-NC sortis des machines-outils et de restituer les informations pertinentes dans la FAO comme aide à la décision pour le gammiste. Dans la thèse de Chen Zheng, un système expert utilise des règles métier pour vérifier la complétude, la cohérence et l'intégrité des données de conception au niveau des interfaces d'un système mécatronique. Ou encore dans la thèse de Gaëtan Blondet, un moteur d'inférence utilisant les données de simulations passées pour aider au choix du paramétrage de nouvelles simulations. Ce dernier est basé sur des réseaux bayésiens dont la structure est déterminée par une approche hybride combinant des connaissances expertes a priori et des données empiriques sur les simulations disponibles.

L'ensemble de ces moteurs d'inférence utilisent des informations complémentaires pour extraire et créer de nouvelles connaissances pour l'aide à la décision en conception de systèmes mécaniques. L'utilisation des différentes approches combinant retour d'expériences, systèmes à base de règles et techniques d'apprentissage automatique permet d'obtenir des résultats originaux en terme de systèmes à base de connaissances intégrant à la fois de nombreuses connaissances mécaniciennes a priori et des données issues du terrain.

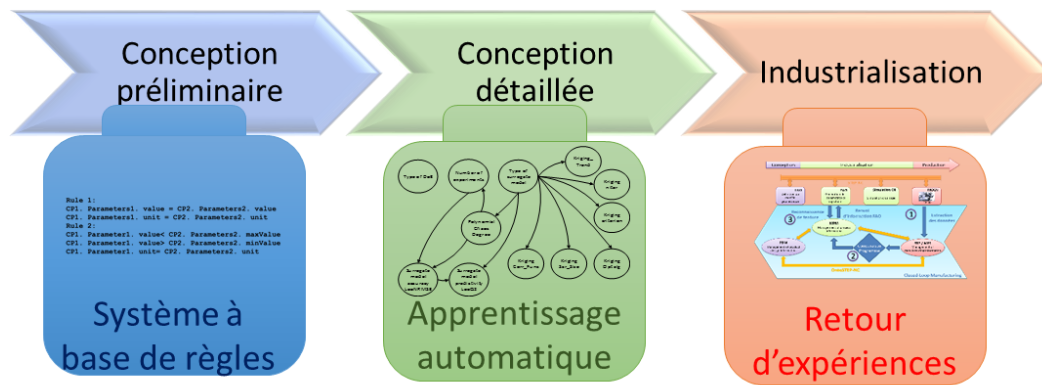


FIGURE 7: MOTEURS D'INFERENCE

Les implémentations de ces propositions furent faites avec des langages communs et des logiciels compatibles afin de faciliter leur interopérabilité. Ces travaux furent soutenus par des projets nationaux et internationaux comprenant des partenaires industriels principalement automobiles et aéronautiques dont sont issus les cas d'études.

1.2.POSITIONNEMENT THEMATIQUE

Mes travaux de recherche se situent dans le domaine du génie mécanique et du génie industriel. Ils se focalisent en particulier sur l'amélioration des processus de conception, thème de recherche dont la naissance peut s'identifier à la parution d'ouvrages de références tels que *la théorie de l'information* de Claude Shannon (1948), ou *the sciences of the artificial* de Herbert Simon (1969), ainsi qu'à l'identification de communautés issues de la Workshop Design Konstruktion (WDK) Society créée en 1981 puis de la Design Society en 2000. Ces ouvrages et ces communautés scientifiques justifient la place de la recherche sur les méthodes de conception dans la recherche scientifique et explicitent les méthodes de recherche à utiliser dans ce domaine en comparaison avec celles développées dans les sciences naturelles ou physiques.

Ainsi, au niveau du CNU, je revendique mon appartenance à la 60^{ème} section *mécanique, génie mécanique, génie civil* sur les thématiques génie industriel, conception de produits et de systèmes, ingénierie de la conception et de la fabrication, gestion du cycle de vie des produits, intégration des connaissances technologiques, et à la 61^{ème} section *génie informatique, automatique et traitement du signal* sur les thématiques génie industriel, aide à la décision, science des données et apprentissage statistique. Au niveau du CNRS j'appartiens à la section 9 et à l'institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) sur les thématiques génie mécanique, systèmes mécaniques et systèmes de production.

Au sein de la communauté nationale du génie mécanique, les travaux de recherche traitant de la structuration et l'exploitation des informations pour la conception mécanique sont animés notamment :

- Au niveau de l'Association Française de Mécanique (AFM) au sein du Groupe Scientifique et Technique Usine du Futur : mécanique et productique
- Au sein du Groupement d'Intérêt Scientifique S-smart (anciennement Atelier Inter-établissements de Productique et Pôle Ressources Informatiques pour la MECANiques - AIP PRIMECA).
- Au niveau du CNRS par le groupe de recherche Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes dynamiques (GdR MACS), pôle Sciences et Techniques de la Production, et plus particulièrement par les Groupes de Travail
 - Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie du produit (IS3C),
 - Ingénierie d'Entreprise et de Système d'Information Dirigée par les Modèles (Easy DIM),
 - et Compétences et Connaissances en Entreprise Industrielle (C2EI).

Au niveau international, ces recherches sont développées au sein :

- de l'International Federation of Information Processing (IFIP), Work Group 5.1: Global Product development for the whole life-cycle et 5.7: Advances in Production Management Systems (WG 5.1 et WG 5.7),
- de la Design Society,
- et du Collège International pour la Recherche en Productique (CIRP) dans son Scientific Technical Committee (STC) Design.

Mes travaux visent à fournir des modèles et des méthodes pour améliorer la conception mécanique. Si les outils implémentant nos avancées sont informatiques (maquette CAO, logiciel de simulation, base de données...), nous ne revendiquons pas d'apport scientifique en informatique. De ce point de vue,

nous ne faisons qu'utiliser des outils ou méthodes informatiques existant dans un objectif d'amélioration des méthodes de conception mécanique.

1.3.CONTEXTE INSTITUTIONNEL : L'EQUIPE SYSTEMES INTEGRES : PRODUIT-PROCESS

J'ai démarré ces activités de recherche au sein du laboratoire Roberval (UMR CNRS 7337), dans l'axe en émergence Systèmes Intégrés en Mécanique (SIM) qui fut créé au moment de mon arrivée à l'UTC au début du quinquennal en 2011 dans le but de faire émerger de nouvelles activités au sein du laboratoire.

L'objectif de cet axe en émergence était, dans le contexte de conception de systèmes complexes, de proposer des méthodes et des modèles pour l'intégration de composants ou de systèmes, tant au niveau de la couche physique que du couple produit/process.

Les deux sous-axes de l'axe en émergence SIM avaient pour objectifs :

- Pour la couche physique, la conception de systèmes mécatroniques à forte intégration fonctionnelle et spatiale. Cela comprenait le développement de microsystèmes d'actionneur, de mesure ou de commande et leur assemblage dans des systèmes fortement intégrés nécessitant peu de connectique et d'énergie.
- Pour le couple produit/process, le développement de méthodes permettant une meilleure intégration conception/industrialisation, avec notamment l'intégration d'expertises multidisciplinaires supportées par une chaîne numérique couvrant l'ensemble du cycle de vie du produit. La robustesse et la performance des produit/process développés étaient évaluées par des modèles statistiques, fiabilistes, numériques ou systémiques.

Mes travaux se situaient dans le 2^{ème} sous-axe : couple produit/process, bien que des collaborations, notamment sur la conception de systèmes mécatroniques, furent menées avec succès.

A la fin du quinquennal en 2016, l'axe en émergence comportait 15 membres permanents (3 PR, 7 MCF, 5 ECC dont 1 HDR). L'objectif de cet axe en émergence était pleinement atteint puisqu'il avait mené à l'émergence de nouvelles thématiques de recherche au sein du laboratoire. La création de deux nouvelles équipes de recherche furent alors proposées pour le quinquennal suivant, venant compléter les 3 équipes historiques : Mécanique Numérique, Acoustique et Vibrations, Matériaux et Surfaces.

Ces deux nouvelles équipes, qui verront le jour au 1^{er} janvier 2018, émanent directement de l'axe en émergence et de la fusion du laboratoire Roberval avec le Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne (LEC EA 1006). Les deux nouvelles équipes qui en résultent sont :

- L'équipe Mécatronique, Energie, Electricité, Intégration (MEEI) qui intègre le sous-axe 1 de l'axe en émergence SIM sur la mécatronique et le Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne.
- Et l'équipe Systèmes Intégrés : Produit-Process (SIPP) qui émane directement du sous-axe 2 de l'axe en émergence sur l'intégration produit/process.

Là encore mon appartenance ne fait pas de doute, je fais partie de l'équipe SIPP. L'objectif scientifique du projet de l'équipe Systèmes Intégrés : Produit-Process est de proposer des méthodes et des modèles pour une approche intégrée du couple produit/process et la maîtrise de leur robustesse. Elle comporte actuellement 10 membres permanents (1 PR, 4 MCF, 5 ECC dont 1 HDR).

L'équipe SIPP se structure autour de deux thématiques de recherche principales (FIGURE 8):

- L'ingénierie intégrée, qui vise à développer des modèles et méthodes pour la conception intégrée de produits et de processus. Cet axe vise à améliorer la continuité de la chaîne numérique sur l'ensemble du cycle de vie du produit pour faciliter la collaboration multidisciplinaire et la gestion de la diversité produit/process.
- L'ingénierie robuste, qui vise à développer des modèles et méthodes pour la conception robuste de produits et de process. Cet axe vise à améliorer la prise en compte des incertitudes et de la maîtrise de la variabilité tout au long du cycle de vie du produit.

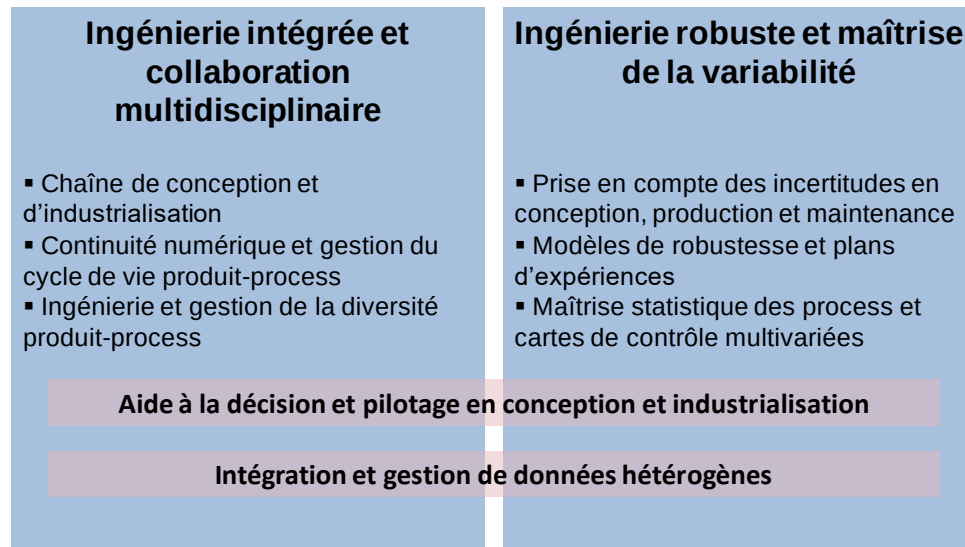


FIGURE 8: PROJET DE RECHERCHE DE L'EQUIPE SYSTEMES INTEGRES : PRODUIT-PROCESS

La discrimination sur l'appartenance de mes travaux à l'un ou l'autre des axes de l'équipe SIPP est cette fois à nuancer. Bien que le centre de gravité de mes travaux penche indéniablement vers l'ingénierie intégrée, les notions de robustesses et de prise en compte des incertitudes sont des aspects sur lesquels je travaille et que je souhaite continuer à investiguer dans le futur.

1.4. APPROCHE SYSTEMIQUE ET METHODE INDUCTIVE-DEDUCTIVE

La recherche que nous proposons ici vise à améliorer les systèmes mécaniques, en proposant de nouvelles méthodes, modèles, outils, théories ou concepts pour faciliter leur processus de conception. Blessing et Chakrabarti (2009) expliquent que l'objectif principal de la recherche en conception mécanique est « d'assister l'Industrie par le développement de connaissances, méthodes et outils qui améliorent les chances de générer des produits à succès ».

Le processus de recherche en génie mécanique est complexe, et comme tout processus complexe, il s'oppose à une conceptualisation aisée et une trop grande linéarisation. Pour contourner cette difficulté, nous proposons de définir notre méthodologie de recherche comme la combinaison de deux approches, à la fois inductive et déductive, qui se complètent, s'interconnectent et se répondent mutuellement (FIGURE 9). De ce fait, nous nous inscrivons dans la lignée du constructivisme selon Gaston Bachelard (1934) puis de Jean Piaget (1967), qui posent que la connaissance se fait au moyen d'une dialectique, du sujet à l'objet et de l'objet au sujet, par un aller-retour expérimental.

Nous nous inscrivons également dans l'approche systémique, tel que définie initialement par le biologiste autrichien Ludwig von Bertalanffy dans son œuvre *General System Theory* (1968), et dans la diffusion faite par Jean-Louis Le Moigne dans *La théorie du système général* (1977). Ces ouvrages définissent un système comme un ensemble constituant un tout organique, c'est à dire un ensemble limité d'éléments disposant d'attributs, et de relations entre ces éléments, d'un environnement avec lequel le système interagit, d'une limite délimitant la frontière avec l'environnement extérieur, et d'une finalité, c'est-à-dire d'un objectif poursuivi par le système. Un système nécessite pour être décrit plusieurs points de vue interreliés, tels que les vues fonctionnelle, structurelle et comportementale, définies par John Gero en 1990. L'intérêt de l'approche systémique est de mettre explicitement en évidence les différentes relations entre les éléments de l'ensemble, c'est à dire entre les constituants du système mais également entre le système et son environnement.

Nous adoptons également la pensée complexe, tel que définie par Herbert Simon (1969) et Edgar Morin (1977), venant compléter une pensée analytique cartésienne devenue trop limitante pour pouvoir appréhender des produits et des processus industriels complexes, c'est-à-dire incluant une multitude de paramètres, d'inerties, de non-linéarités, de rétroactions, de récursivités, de seuils, de jeux de fonctionnement, d'influences mutuelles de variables, d'effets retard, d'hystérésis, d'émergences et d'auto-organisation qui font qu'une approche par décomposition ne pourra rendre compte du comportement complet du système.

Dans ce contexte constructif, systémique et complexe, la plus fréquente motivation pour nos recherches reste un besoin industriel, comme c'est généralement le cas en génie industriel. La première approche est donc une approche inductive de type recherche-action qui va permettre l'élaboration de la problématique et des hypothèses qui vont être prises en compte pour sa modélisation. La proposition de solutions (méthodes, outils, modèles...) sera ensuite testée sur ce même cas industriel pour assurer sa validation (ou sa maturation). L'application de boucles essais-erreur sera alors établie jusqu'à la validation de la proposition, plaçant le chercheur, sur un plan ethnographique, à la fois comme acteur du changement et prescripteur dans l'entreprise et comme observateur du résultat obtenu. La proposition validée sera revue à la lueur des hypothèses de départ et une certaine généralisation sera faite, définissant alors les limites de la proposition.

L'une des difficultés majeures de ces recherches vient du champ d'expérimentation (le milieu industriel) qui rend la reproduction d'expérimentation impossible, auquel s'ajoute les contraintes de la complexité

du système expérimental. La validation même de la proposition est ardue, les contraintes industrielles rendant difficile la validation sur des projets en cours. D'autres alternatives sont envisageables, tel la validation sur des projets passés, l'analyse et les tests par des experts... pour palier en partie à ces problèmes.

La deuxième approche à mettre en œuvre en parallèle est une démarche déductive plus classique, utilisant l'état actuel des connaissances pour répondre à un problème. Cette démarche permet d'identifier les « briques théoriques » nécessaires à construire la réponse au problème et les manques scientifiques qu'il faut combler. Les solutions apportées à ces manques constitueront les apports scientifiques pour la communauté académique.

Les deux approches se combinent alors et le chercheur alterne tour à tour les phases inductives et déductives jusqu'à affiner une proposition générique correspondant à la fois à un manque scientifique et répondant à un besoin industriel.

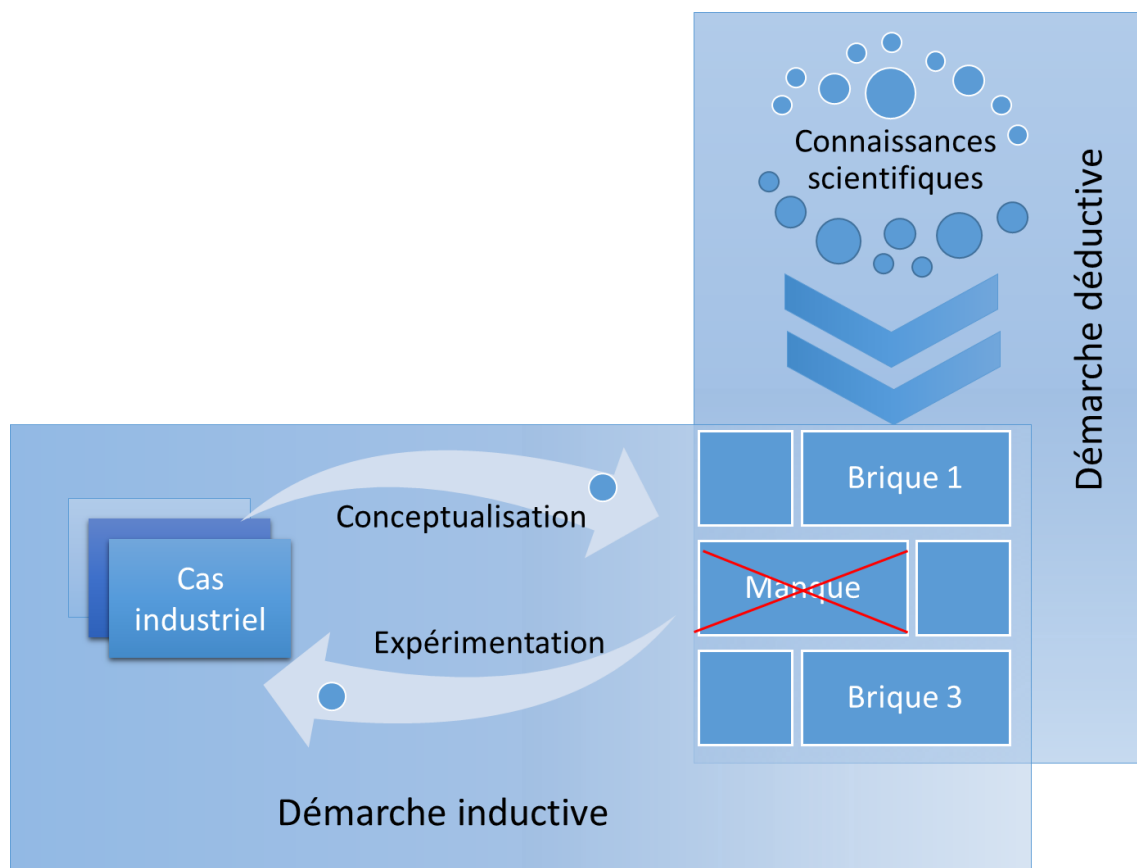


FIGURE 9: METHODOLOGIE DE RECHERCHE

1.5. STRUCTURE DU MANUSCRIT

Le manuscrit se décompose comme suit (FIGURE 10):

Le premier chapitre que nous venons de parcourir comprend l'introduction, le positionnement thématique et la méthodologie de recherche.

Le deuxième chapitre présente le contexte de ces travaux de recherche ainsi que le positionnement scientifique général. Dans un premier temps la conception de systèmes mécaniques est abordée en intégrant l'ensemble des étapes du cycle de vie du produit. Puis les aspects gestion de la connaissance (Knowledge Management : KM) et système d'aide à la décision basé sur la connaissance pour la conception sont approfondis. Enfin une problématique générale sur l'intégration et l'exploitation des expertises métiers dans la conception de systèmes mécaniques vient conclure ce chapitre et assurer le positionnement scientifique de nos travaux.

Il en découle deux axes de recherche qui sont détaillés dans les chapitres 3 et 4 avec une structure identique : positionnement scientifique spécifique, apports et résultats obtenus, contributions et ouvertures.

- Chapitre 3 : Intégration des expertises métiers pour la conception mécanique. Cet axe de recherche présente nos travaux sur la continuité de la chaîne numérique et l'interopérabilité notamment en utilisant des ontologies pour structurer l'information des différentes et multiples expertises nécessaires à la conception de systèmes mécaniques.
- Chapitre 4 : Réutilisation des expertises métiers pour la conception mécanique. Cet axe présente nos travaux concernant l'aide à la décision et les systèmes à base de connaissances en utilisant différents types d'inférences pour aider le concepteur à faire les choix pertinents en s'appuyant sur les informations structurées dans le chapitre précédent.

Le chapitre 5 présente les perspectives de recherches et les directions que je souhaite suivre pour la suite de ma carrière d'enseignant-chercheur dans les années à venir. J'y défini une approche d'aide à la décision dynamique pour la conception mécanique basée sur les ontologies et les techniques d'intelligence artificielle, notamment en apprentissage automatique. S'en dégage deux perspectives :

- La première direction est celle du Dynamic Design Ontology : l'objectif est ici de définir un cadre de référence pour les différentes ontologies produit nécessaires à la conception de systèmes mécaniques associées aux différentes techniques permettant leur interopérabilité afin de faciliter l'intégration agile d'expertises métiers au sein du processus de conception mécanique.
- La deuxième direction de recherche envisagée est le Dynamic Design Inference : cet aspect correspond à la prolongation de l'axe 2, à savoir de définir la feuille de route pour l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle sur les différentes étapes du processus de conception en fonction des besoins d'aide à la décision des concepteurs.

Pour chacune des perspectives, nous définissons les bases scientifiques, nous identifions les verrous et nous proposons des directions de recherche.

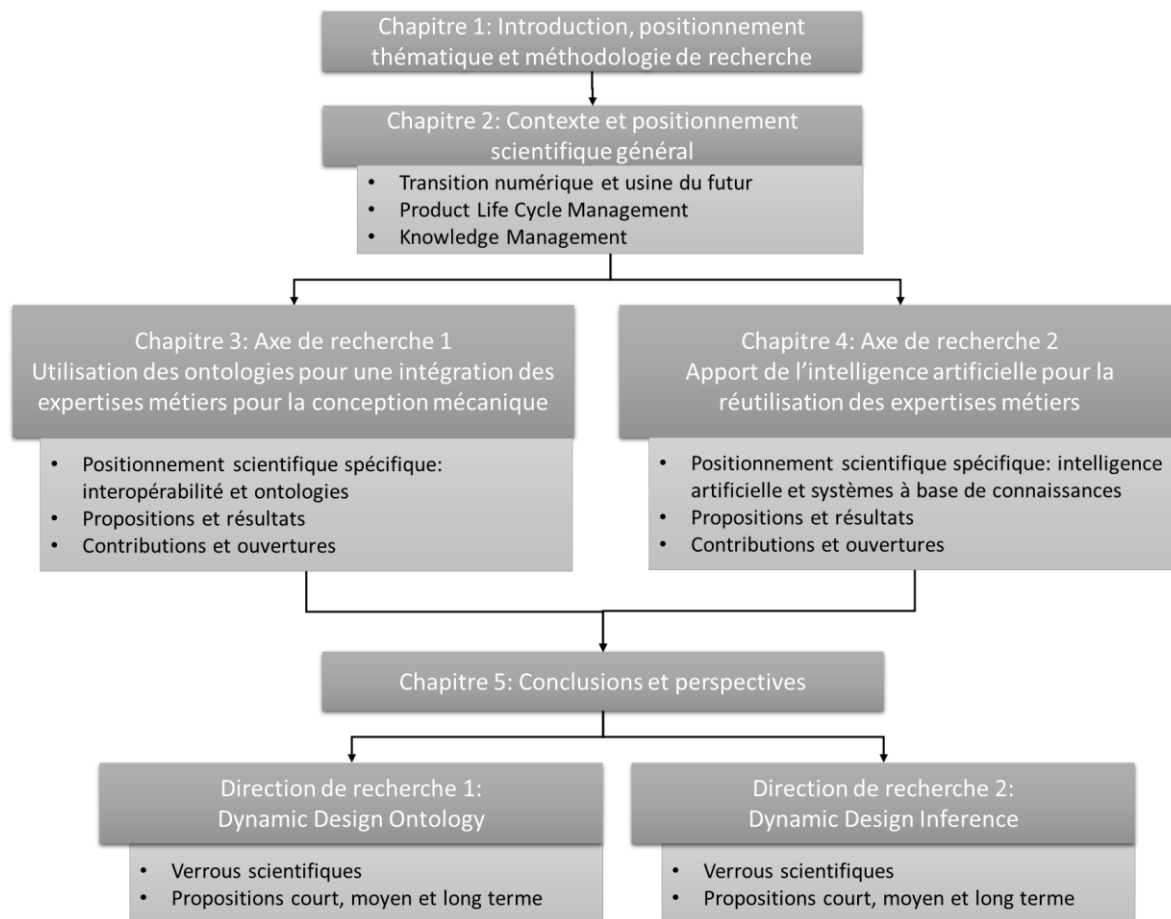


FIGURE 10: ORGANIGRAMME DE LA PARTIE TRAVAUX DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES

2. POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE GENERAL ET PROBLEMATIQUE

Ce chapitre présente le positionnement scientifique général de ces travaux. Il démarre par la présentation du contexte de transition numérique et d'usine du futur avant de se recentrer sur l'impact de ses transformations sur la conception mécanique. Dans cette continuité, il aborde l'intégration du cycle de vie du produit et le Closed-Loop PLM ainsi que la gestion des connaissances et les systèmes à base de connaissances. Enfin, un positionnement vis-à-vis des approches proposées par les différents acteurs de ces domaines est établi et nous permet de dégager notre problématique générale.

2.1. TRANSITION NUMERIQUE ET USINE DU FUTUR

Depuis quelques années maintenant, une nouvelle économie voit le jour avec l'avènement de nouveaux modes de consommation et de nouveaux business model supportés par les nouvelles capacités des technologies de communications. Cette transformation numérique peut être définie comme *l'intégration des technologies de l'information et de la communication dans la vie quotidienne par la virtualisation de tout ce qui peut être numérisé* (Business Dictionary, 2015).

Cette révolution atteint l'industrie manufacturière et l'industrie mécanique en particulier. Elle est identifiée comme la 4^{ème} révolution industrielle et est connue en France sous la dénomination d'usine du futur. Mais il s'agit bien évidemment d'un phénomène mondial qui s'appelle *Advanced Manufacturing* aux USA, *Intelligent Manufacturing* en Chine, *Manufacturing 4.0* en Allemagne ou encore *High Value Manufacturing* au Royaume-Unis. Cette révolution est basée sur des systèmes de production plus automatisés et connectés, rendue possible grâce à l'arrivée massive du numérique (FIM, 2016).

L'avènement récent des objets connectés nous permet d'avoir des informations en temps réel du produit, quelle que soit la phase du cycle de vie dans laquelle il se trouve (production, utilisation, maintenance, fin de vie...) grâce à des technologies embarquées (capteurs, puces RFID...). Une catégorie d'objets connectés particuliers sont les Cyber Physical Systems (CPS) (Khaitan et McCalley, 2015) et sa version industrielle, les Cyber Physical Production Systems (CPPS) (Monostori et al., 2016) qui sont des systèmes embarqués complexes conçus pour interagir avec leur environnement (dont les autres machines), de manière continue, via l'intégration de processus physique et informatique (FIGURE 11).

Ces objets connectés communiquent à travers l'internet des objets (Internet of Things : IoT) qui peut être défini comme un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données s'y rattachant (Ashton, 2009). L'internet des objets industriels (Industrial Internet of Things : IIoT) (Da Xu et al., 2014) est la déclinaison industrielle de l'IoT, spécifiquement appliqué au milieu industriel, permettant de faire communiquer les produits mais aussi l'ensemble des machines permettant la production, la maintenance ou le recyclage de ces produits.

L'information disponible concernant un produit est devenue massive. Les données sont trop nombreuses pour que l'entendement humain puisse les traiter dans un temps raisonnable. Elles sont pourtant une source de connaissance très importante, permettant de renforcer la valeur du produit, de faire évoluer les services associés et d'offrir aux clients une expérience accrue.

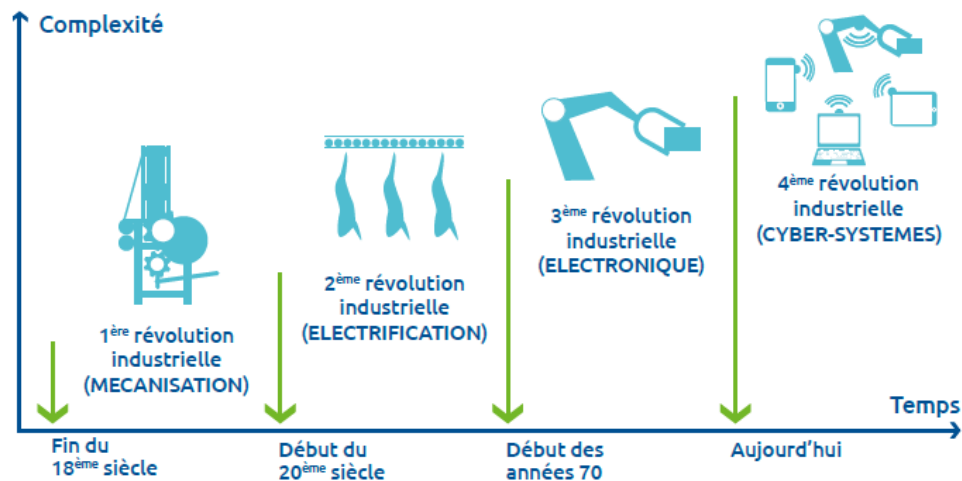


FIGURE 11: LES QUATRE ETAPES DE LA REVOLUTION INDUSTRIELLE DE L'AUTOMATION

Les données concernant les produits peuvent être structurées ou non structurées, persistantes ou temporaires. Cette catégorisation n'est pas binaire mais bien continue, les données pouvant être partiellement structurées et persistantes selon une échelle de temps plus ou moins longue.

Les données structurées sont des données libellées, hiérarchisées et reliées entre elles. C'est le cas par exemple des données contenues les entrepôts de données (*data warehouse*) des systèmes d'information d'entreprises (PDM, MPM, ERP, MES, CRM, SCM...) où les données sont structurées selon les relations des tables des bases de données relationnelles ou des cubes. Les objets connectés peuvent fournir des données structurées « by design », à partir du moment où cela a été pensé en amont. Les requêtes de type SQL ou SPARQL² sont alors utilisées pour accéder à ces données.

Les données non structurées (ou semi-structurées) sont des données généralement brutes et déposées sans structure hiérarchique dans un espace de stockage. C'est le cas des données contenues dans les *data lake* qui sont déposées à plat dans leurs formats natifs avec un identifiant unique et un jeu de métadonnées (Miloslavskaya et Tolstoy, 2016). Les données sont entreposées dans les *data lakes* en l'état jusqu'à ce qu'elles soient requises par un système qui les utilise alors sans pour autant compromettre la structure du lac. Les approches NOSQL (Not Only SQL) sont alors nécessaires pour récupérer au mieux ces données.

La persistance des données dépend de l'espace dont on dispose et de la nécessité de traiter ces données plus ou moins vite. Cela va de quelques secondes à plusieurs dizaines d'années. Certaines données nécessitent un traitement en temps réel (ou proche du temps réel) et ne sont plus utiles après. C'est le cas par exemple de certaines données de capteurs sur les lignes de production qu'il faut analyser en temps réel pour pouvoir voir une dérive et anticiper une défaillance du système. D'autres données au contraire nécessitent un archivage long terme, comme par exemple les données de conception en aéronautique.

L'augmentation récentes des capacités de calcul avec des serveurs de type HPC (*High Performance Computing*) et l'avènement des techniques de *Big Data* permettent aujourd'hui le traitement informatique de ces données (FIGURE 12). Nous entendons ici les techniques de *Big Data* comme

² <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

l'ensemble de techniques permettant de traiter des données nombreuses, incertaines, hétérogènes et qui varient rapidement, alors que les méthodes classiques de traitement de l'information n'arrivent pas à gérer ces données convenablement (Gandomi et Haider, 2014).

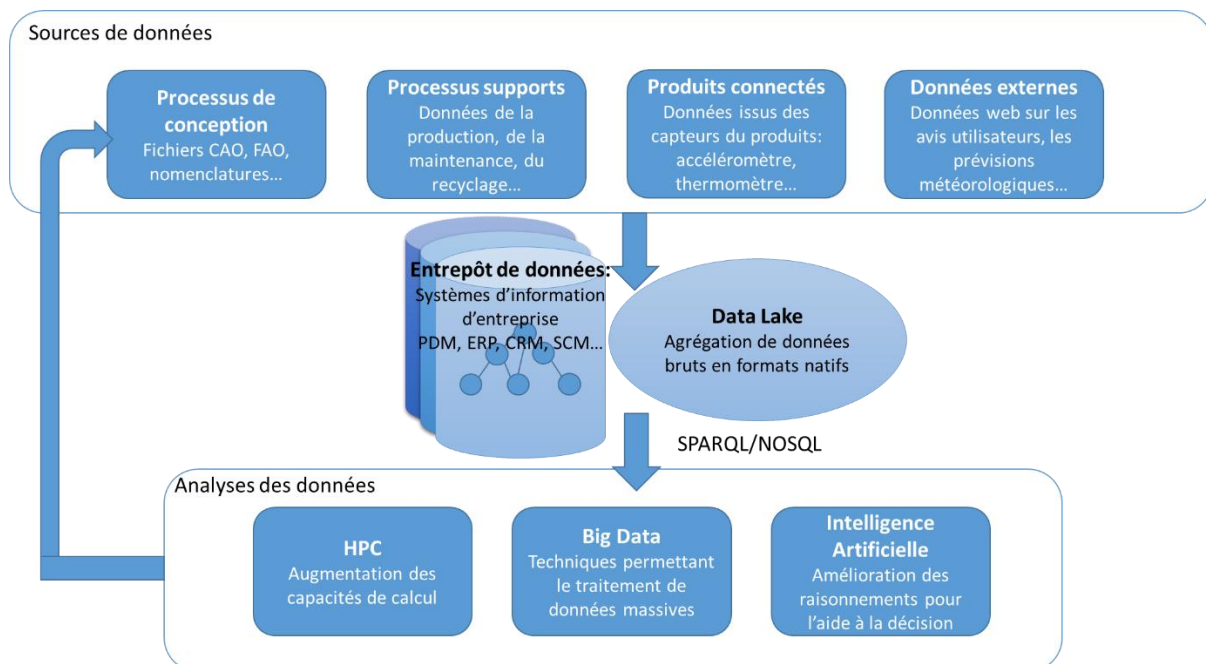


FIGURE 12: DES OBJETS CONNECTES A L'ANALYSE DES DONNEES MASSIVES

Si depuis quelques années les données sont collectées et stockées, elles ne sont pas encore pleinement exploitées. Prenons par exemple les données de production de type fonderie qui sont très nombreuses et hétérogènes (acquisition temps réel des températures, images et vidéos du flux de matière, compositions chimiques...). Elles sont utilisées pour répondre plus rapidement et plus précisément lorsqu'un défaut apparaît ou que la ligne de production connaît une avarie mais elles sont encore peu exploitées pour piloter la production en temps réel ou pour mettre en place des modèles prédictifs permettant de prévoir et donc d'éviter des dérives du processus vers des non-qualités (Delplace, 2004).

C'est dans ce contexte de transformation numérique et de données massives que nous allons nous placer pour étudier plus en détail les processus de conception de systèmes mécaniques et les approches permettant la prise en compte de ces données issues de l'ensemble du cycle de vie du produit.

2.3. *INTEGRATION DU CYCLE DE VIE DU PRODUIT EN CONCEPTION MECANIQUE : CLOSED-LOOP PLM*

La conception, telle que définie par Blessing et Chakrabarti (2009) est un phénomène complexe et multifacette, basé sur une étroite collaboration entre concepteurs de multiples domaines, de nombreuses activités et procédures, divers outils et connaissances ainsi qu'une multitude de contextes.

Les premières formalisations des méthodes de conception remontent au début des années 1980 avec Pahl et Beitz (1984) et la création de la Workshop Design Konstruktion (WDK) Society marquant le début des recherches scientifiques sur le sujet. Cette conception séquentielle formalise les étapes usuelles d'une démarche de conception. Le besoin de l'utilisateur est formalisé, transformé en fonctions puis en mécanismes permettant de répondre à ces fonctions. Une multitude d'autres méthodes ont été élaborées depuis, dont certaines s'appuient sur des bases plus anciennes, mais qui n'avaient pas forcément été formalisées dans le cadre de la recherche scientifique auparavant. Citons parmi les plus connues, la conception axiomatique, la conception intégrée, le design for X, l'ingénierie simultanée, l'ingénierie système, les méthodes agiles, le lean product development, ou encore l'ingénierie basée sur les connaissances.

La conception axiomatique (Suh, 1988) propose une analyse systématique qui décompose les paramètres des différentes étapes de conception et les lie entre eux d'une étape à une autre. La conception intégrée, développé par Tichkiewitch (1994), propose d'utiliser la chaîne numérique comme support aux étapes précédemment définies et intègre les informations sur la maquette numérique. Le Design for X (X pour manufacturing, assembly, maintenance...) vient se focaliser sur une expertise en particulier permettant d'intégrer les recommandations et impératifs d'une phase aval du cycle de vie du produit au plus tôt dans le processus de conception (Huang, 1996). L'ingénierie simultanée (Sohlenius, 1992), vise à faire travailler les différents experts en parallèle, permettant un gain sur le temps de développement du produit. Venant de l'ingénierie logicielle se sont développées plusieurs autres approches, comme l'ingénierie système (NASA, 2007), qui se concentre sur l'intégration des différents composants. Cette approche s'appuie sur plusieurs modèles de conception, dont le plus connu est le cycle en V. Le Model Based System Engineering (MBSE) est une méthode dérivée de l'Ingénierie Système qui vise à produire des modèles du système à chaque étape du processus de conception et à les rendre de plus en plus détaillés et proches du comportement du produit physique. Venant comme l'ingénierie système du génie logiciel, une approche disruptive est celle des méthodes agiles (Mills, 1980). Elle va à l'encontre des méthodes traditionnelles en proposant une simplification du processus et des outils, réintégrant le client dans la démarche conception et travaillant par cycle court (comme c'est le cas par exemple de la méthode Scrum (Schwaber et Beedle, 2001)). Le Lean Product Development lui aussi propose de simplifier le processus en visant à éliminer les gaspillages (mudas), en reprenant une méthode qui a fait ces preuves en production dans l'industrie automobile (Baines et al., 2006, Cheutet, 2012). Enfin, l'ingénierie basée sur les connaissances (Knowledge Based Engineering : KBE) est une approche à la croisée de différentes disciplines comme l'intelligence artificielle, la CAO et la programmation (La Rocca, 2012). Cette approche se base sur l'utilisation d'outils logiciels dédiés, les systèmes à bases de connaissances (Knowledge Based Systems : KBS), qui permettent de capturer et de réutiliser de manière systématique les connaissances produit/process pour favoriser la réduction des temps et des coûts de développement par l'automatisation des tâches de conception routinières et par l'optimisation des solutions proposées.

Ces différentes méthodes continuent d'évoluer et de se combiner donnant régulièrement naissances à de nouvelles évolutions des méthodes de conception et de nombreuses méthodes hybrides. Nous considérons que toutes ces méthodes ont une base commune similaire (besoin / fonction / comportement

/ physique) et qu'il s'agit d'une évolution, d'un continuum des méthodes de conception au fil du temps en fonction de plusieurs facteurs :

- La complexité des produits qui ne cesse de grandir (plus de technologies, plus de fonctions, plus de métiers à intégrer...).
- La servicisation des produits et l'arrivée des systèmes produits/services.
- La personnalisation des produits et les exigences toujours plus grandes des clients.
- L'évolution des outils (l'arrivée de l'informatique, de la CAO, d'internet...).
- La prise en compte de plus en plus poussée de chaque étape du cycle de vie du produit.

La prise en compte de ce dernier facteur a fait naître dans les années 2000 un nouveau paradigme, le Product Lifecycle Management et son évolution quelques années plus tard avec l'avènement des objets connectés, le closed-loop PLM. Le PLM peut être défini comme *une stratégie d'entreprise qui vise à créer, gérer et partager l'ensemble des informations de définition, de fabrication, de maintenance et de recyclage d'un produit industriel, tout au long de son cycle de vie, depuis les études préliminaires jusqu'à sa fin de vie* (Amann, 2002). Le PLM est en général associé à un ensemble d'applications reliées aux processus de développement de produits (XAO, PDM, ERP...) (Terzi et al., 2010) (FIGURE 13).

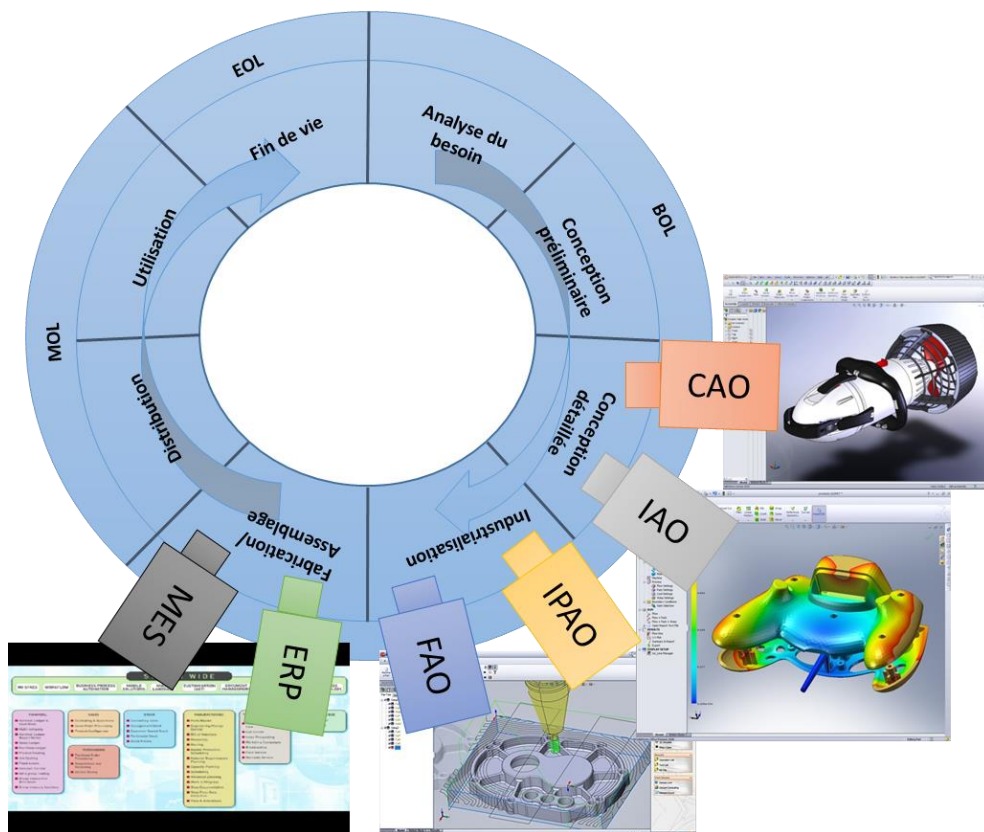


FIGURE 13: SYSTEME PLM ET APPLICATIONS METIERS

Les problématiques PLM touchent :

- A l'ensemble des objets : produit, processus, ressource et organisation.
- A l'ensemble du cycle de vie : analyse du besoin, conception préliminaire, conception détaillée, industrialisation, fabrication/assemblage, distribution, utilisation/maintenance, fin de vie.

- A la génération, l'optimisation et la gestion des évolutions des solutions.

Le PLM vise principalement à améliorer la qualité du système, réduire son cycle de développement et son coût total. Il vise également et de plus en plus à réduire l'impact environnemental du système et à améliorer son impact sociétal.

Mais derrière cette définition très large se cache néanmoins un certain nombre de limitations. Il est très difficile de collecter les informations sur le produit lorsque celui-ci est fabriqué et encore plus lorsqu'il est distribué. Les informations venant du milieu de vie (Middle of Life : MOL) ou de la fin de vie (End of Life : EOL) du produit ne sont que très peu exploitées dans les systèmes PLM actuels. C'est partant de ce constat que fut proposé le concept de Closed-Loop PLM pour collecter et traiter les informations produit du MOL et EOL, basé sur les nouvelles possibilités qu'offrent les objets connectés, les technologies de communication et l'internet de objets. Le concept de Closed-Loop PLM naquit au sein du projet européen FP6 PROMISE (PROduct lifecycle Management and Information tracking using Smart Embedded systems) et peut être défini ainsi : *un système Closed-Loop PLM permet à tous les acteurs qui jouent un rôle pendant le cycle de vie d'un produit (chefs de projet, concepteurs, fabricants, opérateurs de maintenance, recycleurs, etc.) de suivre, gérer et contrôler les informations sur les produits à n'importe quelle phase cycle de vie (conception, fabrication, MOL et EOL), à tout moment et depuis n'importe quel endroit dans le monde* (Kiritsis, 2011). L'objectif est notamment de permettre aux flux d'informations d'aller au-delà du client, pour permettre aux concepteurs d'avoir des retours d'informations sur l'utilisation du produit, sa maintenance ou sa fin de vie. La FIGURE 14 montre les principaux flux d'informations du Closed-Loop PLM détaillés dans (Jun et al., 2007).

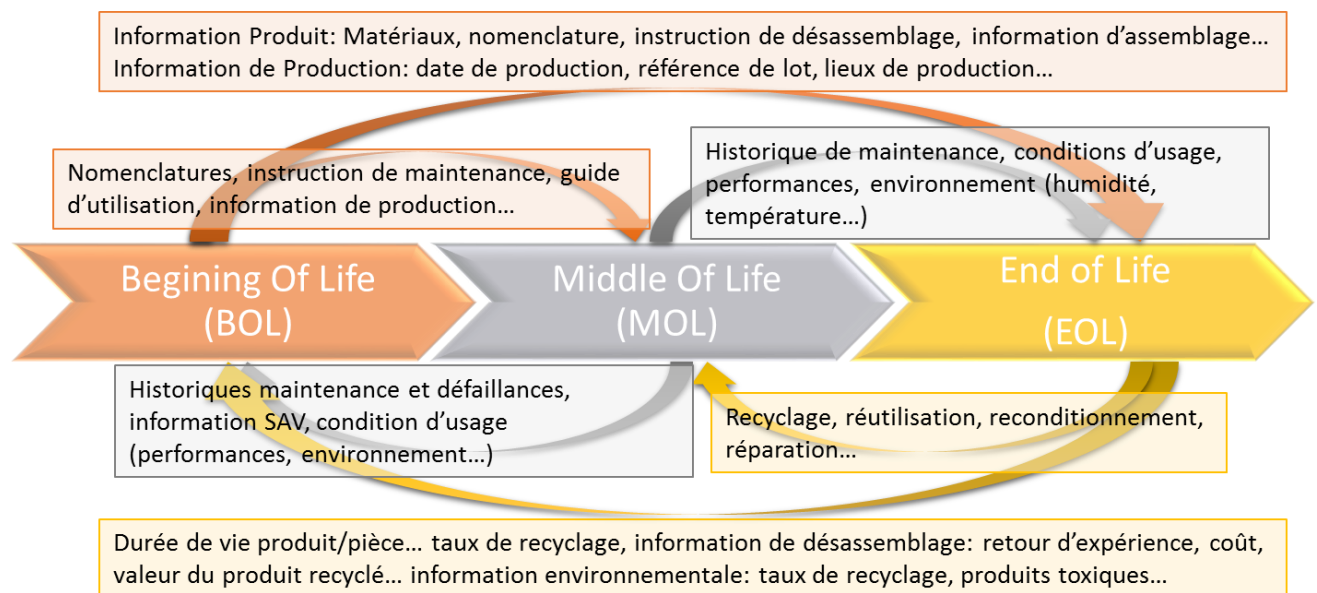


FIGURE 14: PRINCIPAUX FLUX D'INFORMATION DU CLOSED-LOOP PLM

La FIGURE 15 montre l'architecture générale du Closed-Loop PLM. Le produit envoie des informations concernant son état et son environnement à l'agent PLM. Chaque agent collecte l'ensemble des informations du produit en temps réel, pour chaque étape de son cycle de vie et sur chaque site (production, distribution, utilisation...). Ils envoient toutes ces informations au système PLM qui agrège toutes ces informations, puis donne accès à ces informations à tout individu ou organisation ayant les droits adéquats.

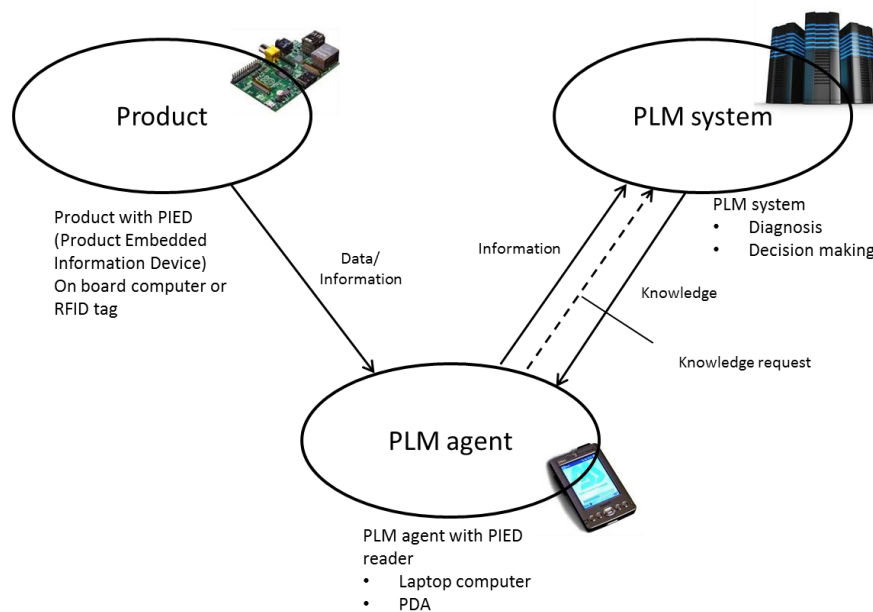


FIGURE 15: ARCHITECTURE DU CLOSED-LOOP PLM

Jusqu'à présent, les optimisations du produit pour les phases de MOL et EOL restaient assez difficiles du fait du manque d'information précise et pertinente. En intégrant les concepts de Closed-Loop PLM, il devient possible de collecter les informations de MOL sur les modes d'utilisation, la localisation du produit, son environnement, ses défaillances ou encore son espérance de vie. Toutes ces informations peuvent être très utiles pour améliorer la conception d'un produit existant comme d'un nouveau produit. Intégrer les informations de EOL est également très prometteur, il est ainsi possible, par exemple, d'estimer le volume de produit en fin de vie dans une zone géographique donnée, mais également de connaître la qualité du matériau recyclé pour définir le processus de recyclage le plus adéquat et maximisant la valeur du recyclage. Les informations de MOL et EOL sont donc disponibles pour les concepteurs dans l'objectif d'améliorer leurs conceptions présentes et futures. Ces informations sont également très utiles pour toutes les autres parties prenantes de la vie du produit (distributeur, réparateur, filière de recyclage...).

Au niveau européen, plusieurs projets H2020, notamment dans les appels à projets Factory of the Future, sont actuellement sur ces thématiques. Diversity³ propose un environnement PLM cloud pour le développement de systèmes produit-services. Falcon⁴, coordonné par BIBA, intègre les données produits de l'IoT et des réseaux sociaux pour améliorer le développement de produits. ICP4Life⁵ propose une plateforme intégrée et collaborative pour la création de systèmes produit-service, leur configuration et leur production. Manutelligence⁶, coordonné par Dassault Systèmes, vise à développer une architecture IT permettant lier les outils PLM avec l'IoT pour permettre aux concepteurs d'avoir une vue holistique de leur produit au travers d'une vue 3D intégrant maquette numérique et données venant des objets connectés. Proregio⁷, coordonné par Politecnico Milano, intègre au sein d'une plateforme PLM cloud des outils pour permettre la conception de produit/service par l'innovation

³ <https://www.diversity-project.eu/>

⁴ <http://www.falcon-h2020.eu/>

⁵ <http://www.icp4life.eu/>

⁶ <http://www.manutelligence.eu/>

⁷ <http://www.h2020-proregio.eu/>

frugale, la coévolution des systèmes de production et la gestion de cette production en fonction des réseaux de production régionaux. Enfin Psymbiosys⁸ développe un environnement basé sur une plateforme OSLC (Open Services for Lifecycle Collaboration) intégrant les contradictions produit/process, produit/service, business/innovation, connaissance/ressenti et architecture orienté service/événement au travers d'outils PLM. Nous participons modestement au sein du GTN NMBP à la structuration des demandes de la France pour le prochain FP9, notamment sur l'appel à projet FoF (Factories of the Future).

Nos travaux visent l'intégration et l'exploitation des expertises métiers pour le développement de systèmes mécaniques et se positionnent principalement sur l'intégration des différents domaines (mécanique, électronique, informatique...) et l'intégration des différentes phases du cycle de vie (conception, fabrication, utilisation, maintenance, fin de vie...). Pour ce faire, une gestion des données, informations et connaissances issues des différentes phases du cycle de vie et des différentes expertises est nécessaire. Dans le paragraphe suivant, nous allons étudier certains aspects de la gestion de connaissances, dont les systèmes à base de connaissances qui fournissent une aide à la décision grâce à l'exploitation des expertises métiers.

⁸ <http://www.psymbiosys.eu/>

2.4. SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCE

Avant d'aller plus loin, nous allons poser quelques définitions concernant les données, informations, connaissances et compétences tel que nous les utilisons dans ce mémoire.

- Donnée : une donnée est le reflet symbolique de nombres, quantités, grandeurs ou faits (Weggeman, 1997).
 - Données hétérogènes : l'hétérogénéité des données est liée aux différents types formats comme par exemple : des vidéos, des photos, des textes, des fichiers CAO, FAO etc.
- Information : l'information est une donnée placée dans un contexte (Kemp, 1999).
 - Information produit : c'est une information qui concerne un produit, ou tout processus s'y rapportant, quel que soit l'étape du cycle de vie dans lequel se trouve ce produit.
- Connaissance : une connaissance est de l'information qui prend un (ou plusieurs) sens dans un (ou plusieurs) contexte(s) à travers les acteurs de l'entreprise. Elle résulte de l'expérience acquise par une personne à partir des informations (Chandrasegaran et al., 2013).
 - Connaissances industrielles : Les connaissances industrielles sont un ensemble de savoirs et savoir-faire de conception et d'exploitation relatifs aux étapes du cycle de vie d'objets et de systèmes physiques artificiels au service de la performance de l'entreprise. (Rose, 2015).
- Compétence : la compétence est la capacité et l'habileté à exploiter des connaissances et des ressources pour exercer une activité dans un contexte contraint donné et atteindre un objectif (Labrousse, 2004).
 - Expertises métiers : il s'agit de l'ensemble des compétences spécifiques à un métier. Dans le cadre de l'ingénierie de produit, il s'agit d'un sous-ensemble des compétences nécessaires au développement du produit. Elles peuvent être liées à une étape du cycle de vie du produit particulière (fabrication, maintenance, fin de vie), à un domaine disciplinaire (mécanique, informatique, électronique...) ou transverse, spécifique à un point de vue particulier (environnement, qualité...).

La FIGURE 16 suivante présente un schéma de synthèse proposé par (Gardonni, 1999)

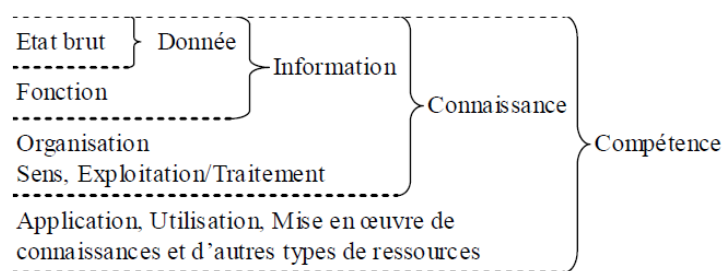


FIGURE 16: LIENS ENTRE DONNEE, INFORMATION, CONNAISSANCE ET COMPETENCE

Afin d'utiliser au mieux ces masses de données hétérogènes, informations produit, connaissances industrielles et expertises métiers, des processus de gestion de la connaissance sont indispensables. Les principaux enjeux pour l'entreprise sont identifiés dans (Dalkir, 2005). De nombreuses définitions de la gestion de la connaissance existent (Ammar Khoja et Bernard, 2008) (Kebede, 2010) (Sarrafzadeh et al., 2006) (Cheung et al., 2010) (Lehaney, 2004) (Giannetti et al., 2014) (Newman, 2002)...

Dans ce mémoire, nous nous baserons sur la définition de la gestion de la connaissance présentée par (Sarrafzadeh et al., 2006) : *la création et la gestion sous-jacente d'un environnement qui favorise la*

création, le partage, l'apprentissage, l'amélioration et l'organisation des connaissances au bénéfice des organisations et des clients.

Parmi ces différentes approches de la gestion de la connaissances, Perry (2007) propose de distinguer trois catégories en fonction du contexte scientifique et du domaine de recherche de chacun :

- Les approches des sciences des organisations : théorisant sur le concept de connaissance, ses dynamiques et ses états, ces travaux à la frontière de la philosophie guident les méthodologies de gestion de la connaissance.
- Les approches des sciences et technologies de l'information et de la communication : ces travaux se focalisent sur la capitalisation, la modélisation et la manipulation de connaissances sans lien direct avec le métier cible. Ils proposent des outils et des langages pour l'automatisation de l'extraction de la connaissance et de ses retranscriptions.
- Les approches des sciences pour l'ingénieur : ces travaux proposent la formalisation et l'intégration d'expertises métiers pour optimiser un processus métier ou pour les intégrer dans un environnement métier. Ils développent des environnements à base de connaissances et des propositions théoriques, des outils et des méthodes pour l'intégration et l'utilisation des connaissances métiers dans les domaines de l'ingénierie.

Nous nous placerons dans cette dernière catégorie puisque nous visons la formalisation et l'intégration des expertises métiers pour optimiser le développement de systèmes mécaniques complexes.

Au niveau européen, le réseau VRL-KCiP (Virtual Laboratory in Knowledge Community in Production), un réseau d'excellence du FP6 dont l'objectif est de développer des recherches autour des thématiques de la gestion de la connaissance et plus particulièrement du développement de nouveaux outils de conception collaborative intégrant de nouvelles approches de gestion de connaissances, regroupait ces différentes communautés. Ce réseau a donné naissance à l'association Emiracle (European Manufacturing and Innovation Research Association) qui continue à promouvoir la recherche sur ces sujets.

Une distinction reste à faire en ce qui concerne les processus de transformation de la connaissance, c'est la distinction entre connaissances explicites et connaissances tacites tel que défini par Nonaka et Takeuchi en 1995. Les connaissances explicites sont exprimables et transmissibles par des informations et des données, par le biais de documents écrits. Les connaissances tacites sont liées à l'expertise et au savoir-faire personnel, acquis durant de longues périodes d'apprentissage et de pratique. La connaissance tacite est difficile à transmettre et à capitaliser. La transmission de connaissances nécessite une conversion entre les connaissances tacites et explicites. Nonaka et Takeuchi ont modélisés ces conversions en quatre étapes, représentées dans la FIGURE 17:

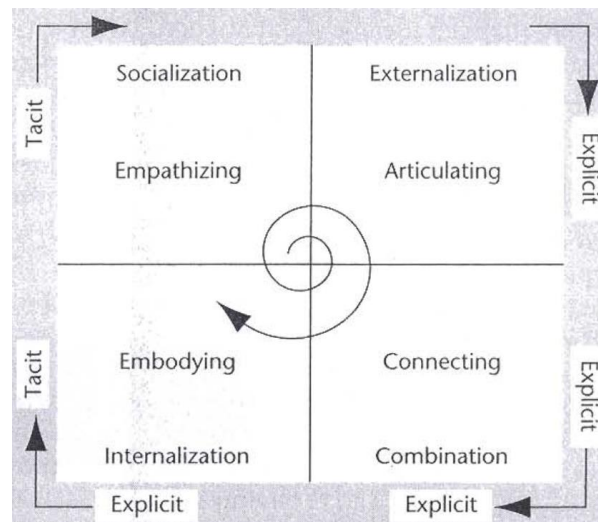


FIGURE 17: MODELE DE CONVERSION DES CONNAISSANCES

D'autres distinctions existent, telles que la distinction entre les connaissances compilées (issus de l'expérience, donnant des résultats pour un contexte donné) et les connaissances dynamiques (théories, équations, etc., permettant de générer d'autres connaissances) (Chandrasegaran et al., 2013), ou celle entre connaissances déclaratives et les connaissances procédurales. Les connaissances déclaratives sont décrites comme une combinaison d'unités atomiques d'informations avec des relations significatives entre ces unités. Les connaissances procédurales sont quant à elles définies comme une description orientée processus de résolution de problème. Les connaissances procédurales correspondent aux connaissances pratiques et, ainsi, aux procédures pour réaliser les actions (Kamsu, 2013).

(Del-Rey-Chamorro et al., 2003) définissent le processus de création de connaissances en quatre phases successives qui sont illustrées sur la FIGURE 18.

1. L'extraction des données.
2. La structuration et la capitalisation des informations.
3. La restitution des connaissances pertinentes.
4. L'utilisation des connaissances.

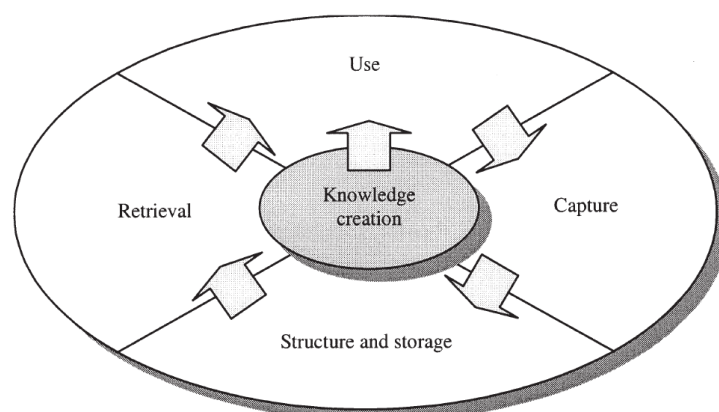


FIGURE 18: PROCESSUS DE LA GESTION DE LA CONNAISSANCE

Nous appellerons par la suite *intégration* les phases 1 et 2 à savoir l'extraction, la capitalisation et la structuration des connaissances, et *exploitation* les phases 3 et 4 à savoir la restitution et l'utilisation des connaissances.

Ces processus permettent de structurer les approches à base de connaissances supportées par des systèmes à base de connaissances. L'architecture informatique d'un tel système se décompose en trois parties principales (Shu-Hsien Liao, 2005) (FIGURE 19) :

1. Une base de connaissances, rassemblant les connaissances capitalisées et garantissant leur disponibilité. Cette base permet d'externaliser et d'internaliser des connaissances.
2. Un moteur d'inférence, raisonnant sur les données et connaissances capitalisées pour assister l'utilisateur.
3. Une interface homme/machine (IHM), permettant à l'utilisateur de soumettre au système son problème et de visualiser et comprendre les résultats du moteur d'inférence. Elle facilite la communication des connaissances entre le système et l'utilisateur, et supporte donc les différents types de conversion des connaissances, réalisés entre l'utilisateur, le moteur d'inférence et la base de connaissances.

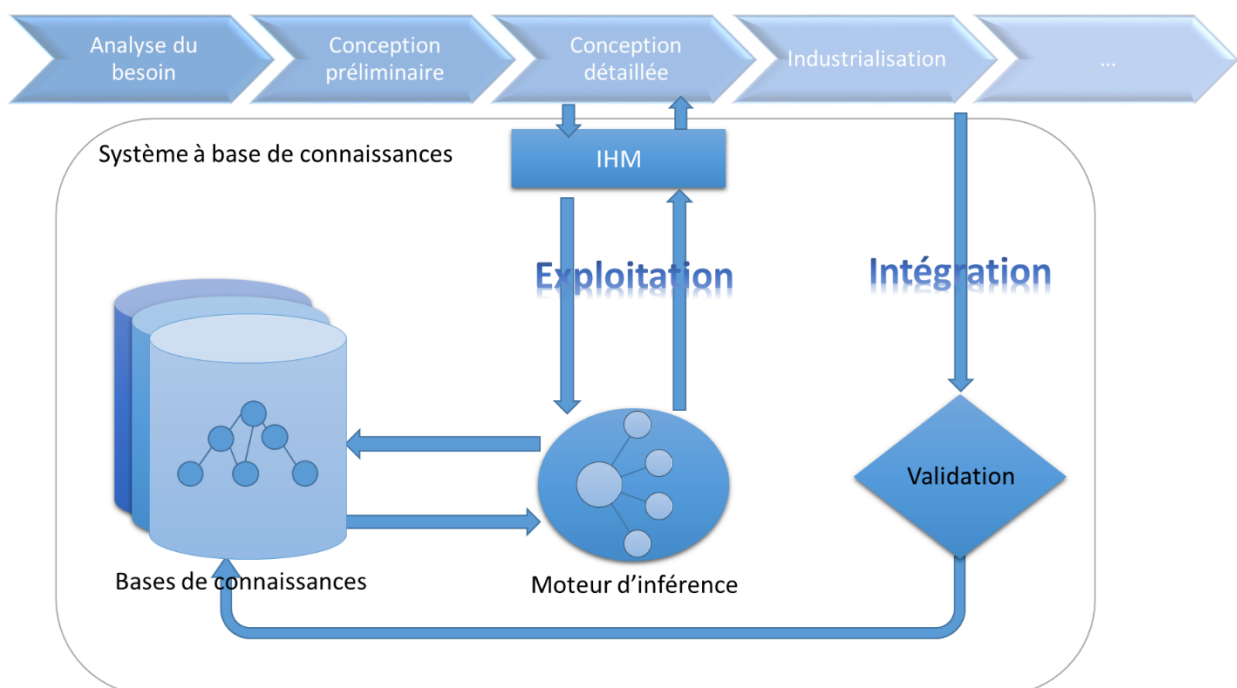


FIGURE 19: SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES

Les données venant des produits peuvent être stockées et utilisées dans ces systèmes, qu'elles soient originaires du processus de conception du produit (des fichiers CAO, des maillages...), des processus supports (données de fabrication, de distribution...) ou des données du produit connecté (information provenant des capteurs du produit pendant son utilisation, sa maintenance, sa fin de vie...). L'objectif de nos travaux est de permettre l'utilisation de ces données grâce à la combinaison de méthodes d'intelligence artificielle mêlant l'utilisation des connaissances formelles (comme c'est le cas par exemple avec les systèmes à base de règles) et des méthodes d'apprentissage automatique (réseaux de neurones, réseaux bayésiens, machines à vecteurs supports...) au sein du système à base de connaissances. Le système à base de connaissances fournit l'aide à la décision en exploitant les données et les connaissances disponibles, pour permettre au concepteur de se concentrer sur les tâches à forte valeur ajoutée, à savoir la création et la prise de décision.

2.5. DE L'INTEGRATION ET L'EXPLOITATION DES EXPERTISES METIERS POUR LE DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES MECANIQUES

Beaud (1980) définit une problématique comme l'ensemble construit, autour d'une question principale, des hypothèses de recherche et des lignes d'analyse qui permettront de traiter le sujet choisi. Nous allons ici définir notre problématique générale. Notre objet d'étude est la conception de systèmes mécaniques complexes, intégrant l'ensemble du cycle de vie du produit, dans un contexte d'usine du futur et de données massives.

La question de recherche à laquelle nous souhaitons répondre dans nos travaux peut s'exprimer ainsi : Comment améliorer la conception de systèmes mécaniques en utilisant les données massives provenant de l'ensemble du cycle de vie du produit ? Nous visons donc à enrichir l'environnement du concepteur pour qu'il puisse prendre de meilleures décisions lors du processus de conception (de meilleurs choix de conception), en lui apportant des connaissances utiles supplémentaires.

La première hypothèse posée est qu'il est possible et souhaitable d'apporter de l'aide à la décision au concepteur afin d'améliorer la conception du produit, en lui apportant des connaissances appropriées et contextualisées. Le corolaire étant que la connaissance est utile à la prise de décision en conception, en d'autres termes que l'expert prendra plus souvent la bonne décision que le profane. La deuxième hypothèse est que les données générées lors du cycle de vie du produit sont sources d'information et de connaissances ayant une valeur ajoutée et qu'elles vont aider à la prise de décision pertinente lors du processus de conception.

Nous proposons de permettre l'utilisation de ces données grâce à la combinaison de méthodes de connaissances formelles (type systèmes à base de règles) et de méthodes d'apprentissage automatique (réseaux de neurones, réseaux bayésiens...) au sein de systèmes à base de connaissances. Cela nécessite à la fois d'être capable d'extraire, de capitaliser et de structurer les données et les connaissances pour permettre d'intégrer les expertises métiers et également d'être capable de fournir, de mettre à disposition, d'utiliser, bref, d'exploiter ces expertises métiers dans le processus de développement de systèmes mécaniques.

Nous pouvons donc résumer notre problématique ainsi : De l'intégration et l'exploitation des expertises métiers pour le développement de systèmes mécaniques. Les axes de recherches qui en découlent sont :

1. L'intégration des expertises métiers pour la conception mécanique : il s'agit de proposer des méthodes de capitalisation et de structuration des données et connaissances tout au long du cycle de vie du produit, notamment au travers d'approches ontologiques.
2. L'exploitation des expertises métiers pour la conception mécanique : il s'agit ici de proposer des méthodes et des outils d'aide à la décision en utilisant notamment des techniques d'intelligence artificielle dont l'apprentissage automatique ou la logique formelle.

Ces travaux s'inscrivent pleinement dans la suite de ce qui a déjà été tracé il y a de cela près de 20 ans sur la conception intégrée et le PLM. Si les techniques et les méthodes évoluent, nous plaçons ces avancées dans le continuum des avancées du domaine de ces dernières années. Les ontologies et les moteurs d'inférence à base d'intelligence artificielle sont bien les outils actuels résultant de l'évolution des modèles de données et des algorithmes en Python et Fortran d'il y a 20 ans.

3. AXE DE RECHERCHE 1 : UTILISATION DES ONTOLOGIES POUR UNE INTEGRATION DES EXPERTISES METIERS POUR LA CONCEPTION MECANIQUE.

Cet axe de recherche présente nos travaux sur l'intégration des expertises métiers pour l'aide à la décision en conception mécanique. Cette intégration repose sur la continuité numérique des données, des informations et des connaissances tout au long du cycle de vie du produit. Pour assurer cette continuité numérique, les approches d'interopérabilité sont nécessaires, notamment en utilisant des modèles, des méta-modèles et des ontologies pour structurer l'information et en assurer l'échange et le partage au sein des différentes et multiples expertises nécessaires à la conception de systèmes mécaniques. Ce chapitre se décompose ainsi : tout d'abord nous traiterons des problématiques d'interopérabilité PLM, en particulier les aspects sémantiques, où nous évoquerons les modèles et ontologies existants dans le domaine. Puis nous présenterons nos travaux sur le sujet avec quatre apports distincts avant de proposer une synthèse et des ouvertures sur le sujet des ontologies produits pour la conception mécanique.

3.1. ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE SPECIFIQUE

La recherche bibliographique présentée ici nous permet de nous positionner vis-à-vis des sujets transversaux présentés plus haut et d'affiner nos concepts. Nous présenterons tout d'abord le concept d'interopérabilité dans le cadre du PLM, puis nous étudierons les standards, les modèles de données et les ontologies produit avant de terminer sur une synthèse.

3.1.1. INTEROPERABILITE PLM

La collaboration entre concepteurs de différents domaines implique que différents points de vue doivent être pris en compte pour aboutir au meilleur compromis en terme de développement de produit (Sohlenius, 1992). Un point de vue est défini comme la vision et les connaissances d'un expert dans une équipe de conception (Brissaud et Tichkiewitch, 2001). Un expert peut être le spécialiste d'une étape du cycle de vie en particulier (par exemple la fabrication ou la maintenance), d'un domaine (mécanique, électronique, informatique...) ou d'une activité transverse (qui apporte leur expertise non pas à une étape du cycle de vie ou à un domaine en particulier, mais sur l'ensemble du cycle de vie avec un point de vue particulier, comme par exemple la qualité ou la prise en compte des aspects environnementaux).

Les experts ont souvent des difficultés à partager les informations avec les autres concepteurs (Lindhal, 2006, Kozemjakina da Silva et al., 2015). Cela peut être dû à la nature des résultats de l'activité d'expertise qui diffèrent de ceux qui sont habituellement utilisés et sont donc plus difficiles à lier avec les autres paramètres de conception (par exemple, comment lier des impacts environnementaux avec des spécifications géométriques n'a rien de trivial). Ce peut être dû également à l'absence de standard d'échange qui engloberait tous ces aspects de la conception, sur une base qui pourrait être STEP (Standard for the Exchange of Product model data ISO 10303). Ce standard permet déjà l'échange d'information entre plusieurs logiciels experts de la conception (avec notamment les logiciels XAO) (Pratt, 2005). Néanmoins il est loin de pouvoir intégrer l'ensemble des informations disponibles et nécessaires à la conception de produit aujourd'hui. Toutes ces difficultés entraînent irrémédiablement un manque d'interopérabilité entre les différents systèmes utilisés en conception.

Selon Kosanke (2005), une recherche spécifique donne 22 définitions de l'interopérabilité. nous retiendrons 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 ».

Au niveau européen, le FP6 a fait émerger le réseau d'excellence INTEROP (Interoperability Research for Networked Enterprises Applications and Software - Network of Excellence) (Interop, 2004). Ce réseau d'excellence a fait émerger une structure de laboratoire virtuel sur le sujet, Interop V-Lab. Ce laboratoire virtuel est toujours actif et promeut des projets sur les thématiques d'interopérabilité selon trois axes : la modélisation d'entreprise, les architectures et leurs plateformes, et les ontologies.

ATHENA (Advanced Technologies for interoperability of Heterogeneous Enterprise Networks and their Application) (Athena, 2004) avait pour but de fournir des architectures de référence, des modèles et des méthodes pour faciliter l'interopérabilité. Ce projet a jeté les bases du projet SIP (Standard pour l'Interopérabilité PLM) de l'IRT SystemX qui cherche à harmoniser les processus et les solutions PLM au sein de l'industrie manufacturière par la création d'une plateforme test pour accélérer l'implémentation des standards et l'interopérabilité PLM.

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

1. Le niveau technique : il assure la continuité du flux d'informations au travers d'outils et de solutions technologiques.
2. Le niveau sémantique : il assure le partage de l'information et des services pour conserver le flux sémantique.
3. Le niveau organisationnel : il concerne les processus, les utilisateurs et les personnes participant au fonctionnement du système.

Un système est dit interopérable si et seulement s'il répond, à chaque instant, aux trois niveaux d'interopérabilité. Nous nous intéressons en particulier au niveau sémantique, celui qui comprend la sémantique des expertises métiers, dans notre cas celles nécessaires à la conception de systèmes mécaniques. Nous délaissions volontairement le niveau organisationnel car il relève de l'organisation de l'entreprise et de fait il est traité par les sciences du management et des organisations. Nous délaissions également le niveau technique relevant plus des sciences de l'information. Les principales avancées ces dix dernières années sur l'interopérabilité technique se situent autour de l'utilisation de médiateur pour assurer la continuité du flux informationnel et de l'utilisation de web services et des SOA (Service Oriented Architecture) garantissant une meilleure flexibilité aux systèmes d'information (Cheutet, 2012).

Concernant le niveau sémantique, la norme (ISO 14258, 1998) définit trois approches distinctes mais complémentaires :

1. 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. Un modèle produit unique est alors proposé.
2. L'unification : un méta-modèle commun à tous les composants du système fournit un moyen pour établir des correspondances sémantiques. Un méta-modèle produit assure alors les liens entre les différents modèles produits existants.
3. 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 (texte mining, string similarity...) et la structure des données

(comparaison de graphes, des instances de graphes...) afin de détecter les couples de concepts qui sont reliés au niveau sémantique (similarité ou équivalence). Il s'agit ici principalement des méthodes d'alignement automatique d'ontologies (Otero-Cerdeira et al, 2015).

Panetto (2007) explique que pour le PLM, l'interopérabilité des applications et l'intégration des bases de données sont les problèmes principaux du point de vue technologie de l'information. Une approche PLM menée sur l'ensemble du cycle de vie du produit, de l'analyse du besoin à la fin de vie, nécessite des modèles de données fiables, complets et efficaces.

Nous allons étudier les modèles et méta-modèles produit qui remontent aux années 1990 avec l'apparition des premiers PDM et de l'ingénierie intégrée. Puis nous évoquerons dans un deuxième temps les ontologies produit qui quant à elles sont apparues dans notre communauté dans les années 2010 et qui gagnent depuis en fréquence d'utilisation et en notoriété.

Nous insistons sur le fait que les modèles et les méta-modèles étaient déjà des ontologies à l'époque et que l'on se place encore une fois dans un continuum. Les modèles et méta-modèles sont des ontologies légères (lightweight ontology) c'est-à-dire contenant les concepts et les relations entre concepts d'un domaine d'application, par opposition aux ontologies dites lourdes (heavyweight ontology) qui comprennent en plus des règles et des axiomes qui permettent à ces ontologies d'acquérir des capacités de raisonnements (Sun et al. 2013).

3.1.2. *MODELES ET META-MODELES PRODUIT*

Les modèles de données produit permettent de structurer un grand nombre d'informations nécessaires à la conception d'un produit. Les modèles de données produit furent introduits par Dupinet (1991), Mony et al. (1992) et Krause et al. (1993) au début des années 90, puis développés par Tichkiewitch (1996) et Bernard (1996) dans le but de gérer l'ensemble des informations relatives au produit dans un contexte multi-acteurs et multi-vues. Tous ces modèles manipulent les informations concernant le produit et les processus attenants, avec pour objectif de structurer les informations pour en faciliter l'échange et la réutilisation. Nous allons passer en revue quelque uns de ces modèles, issus de recherches nationales (FBS-PPRE, PPO), ou internationales (STEP, CPM).

FBS-PPRE (Function Behaviour Structure – Product Process Resource External effect) (Labrousse, 2004), permet une modélisation générique des objets d'entreprise et de leurs dynamiques d'évolution. Il associe une fonction, un comportement et une structure à tous les objets quel que soit leurs rôles (produit, processus, ressource ou effet externe).

PPO (Produit Process Organisation) fut développé dans le projet RTNL IPPOP : (Integration of Product Process Organisation for engineering Performance improvment) (Robin et al., 2007) (Noël et Roucoules, 2008). Il propose un modèle produit permettant de formaliser la connaissance sur le produit (fonction, structure, comportement) et de le lier aux outils experts (ex. CAO), un modèle de processus permettant de tracer et de capitaliser les évolutions de la connaissance, et un modèle d'organisation facilitant la prise de décision multi-objectifs.

Développé initialement au NIST ((National Institute of Standards and Technology), CPM (Core Product Model) propose un model produit générique basé sur les artefacts (composant du produit) agrégeant les trois vues fonction, forme et comportement (Fenves et al., 2008). Il a été complété de plusieurs extensions :

- "Open Assembly Model", détaillant la définition géométrique, le comportement cinématique du produit et toutes les données de tolérancement ;
- "Master product Model" et "Design-Analysis Integration Model", découlant d'une volonté de lier les modèles géométriques aux modèles de simulations idéalisés.
- "Product Family Evolution Model", permettant de prendre en compte les évolutions du produit. Cette extension assure la traçabilité entre les différentes versions et améliorations du produit.

STEP (ISO 10303, STandard for the Exchange for Product model data) est le standard le plus largement utilisé pour l'échange de données sur l'ensemble du cycle de vie du produit. (Rachuri et al. 2008). Développé sous la responsabilité de l'ISO, au sein du sous-comité TC184/SC4 "Données industrielles", il spécifie, entre autres, plusieurs protocoles d'application (Application Protocol (AP)). Ces AP définissent plusieurs modèles de données spécialisés dans un ou plusieurs domaines. Citons par exemple l'AP239 (Product Life Cycle Support, 2015), l'AP242 (Managed model based 3D engineering, 2014), l'AP238 (Application interpreted model for computer numeric controllers 2006), l'AP233 (Systems Engineering 2012) ou encore l'AP209 (Multi-Disciplinary Analysis and design 2010). Il est à noter que les AP233 et AP239 sont modulaires et extensibles en fonction de l'application alors que les AP plus spécialisés tel l'AP209, l'AP242, ou l'AP238 ne le sont pas.

Ces modèles ont tous comme base la combinaison d'une vue Fonction Structure Comportement qui permet selon (Gero, 1990) d'appréhender de manière complète un système, et d'une vue Produit Processus Ressource, qui définit les trois différents types d'objets d'entreprise utilisés dans une approche PLM.

Ces modèles produit peuvent être vu comme des ontologies légères (sans ajout de capacités de raisonnement) qui préfiguraient des ontologies produit apparues dans la communauté scientifique depuis.

3.1.3. ONTOLOGIES PRODUIT

Le terme d'ontologie est apparu il y a vingt ans dans le domaine de l'intelligence artificielle, mais existe depuis le 19ème siècle en philosophie où il vise à représenter l'ensemble des connaissances possibles. Il est plus modeste et plus pragmatique en informatique, ne prétendant représenter que l'ensemble des connaissances d'un domaine. Gruber (1993) la définit comme *la spécification explicite d'une conceptualisation*.

Les ontologies permettent de définir un domaine en identifiant les différents concepts qui le composent et les liaisons entre ceux-ci, leurs propriétés ainsi que des axiomes et des règles les concernant. Selon une revue de la littérature faite par (El Kadiri et Kiritsis, 2015), les principaux rôles des ontologies dans le contexte de conception intégrée et de PLM sont de servir :

1. de source de savoir commune et vérifiée qui est utilisée et partagée par les acteurs (humain ou logiciel) du cycle de vie du produit,
2. de base de données,
3. de base de connaissances,
4. de pont entre différents domaines,
5. de médiateur pour assurer l'interopérabilité,
6. de facilitateur de recherche contextuelle,

7. de facilitateur de Linked Data⁹.

De nombreuses méthodes aident à la création d'ontologies, citons notamment Methontology (Fernández-López et al., 1997) qui propose une première méthode systématique de création d'ontologies, On-To-Knowledge (Sure et al., 2004) qui propose un environnement outillé pour la création d'ontologie d'entreprise à partir de documents semi-structurés, DILIGENT (Tempich et al., 2005), qui se base sur l'utilisation que font les usagers de l'ontologie, et NeOn (Suárez-Figueroa et al., 2012) qui se focalise sur la création d'ontologie dans les entreprises étendues. Rico et al. (2014) proposent quant à eux OntoQualitas, un cadre pour l'évaluation de la qualité des ontologies pour l'échange d'information entre systèmes hétérogènes.

Concernant les langages utilisés pour expliciter un domaine sémantique sous la forme d'ontologies, le langage le plus couramment utilisé est OWL (Ontology Web Language), spécifié par le W3C (World Wide Web Consortium). OWL est un langage permettant d'exprimer des connaissances. Ce langage est basé sur le modèle de données RDF (Resource Description Framework), et RDF-S (RDF-Schema). De nombreux types de propriétés permettent de définir avec une meilleure exactitude le sens des concepts et les liens entre les concepts. OWL permet de construire des axiomes et des propositions logiques, ajoutant une capacité de raisonnement.

Parmi les ontologies produites les plus connues dans le domaine PLM et conception intégrée, nous pouvons citer par exemple :

- ONTO-PDM est une ontologie produite basée sur les normes ISO 10303 et IEC 62264 gérant les données hétérogènes, telles que celles décrivant les matériaux utilisés dans le produit, les relations entre les composants et les produits, les versions, les outils de fabrication, etc. (Panetto et al., 2012).
- SOM (Semantic Object Model) a été proposé par (Matsokis et Kiritsis, 2010) faisant suite au projet PROMISE (Jun et al., 2007). Les données prises en compte décrivent les activités, les ressources (documents, matériels, humaines), la conception du produit (modèle CAO, nomenclatures, coûts, essais, etc.) ou encore le produit physique selon une structure basée sur les différentes phases du cycle de vie du produit.
- OntoSTEP (Barbau et al., 2012) est une ontologie basée sur les modèles de données CPM, OAM ainsi que sur les modèles spécifiés par les AP203, 214 et 239 de la norme ISO 10303 STEP. Ces modèles ont été combinés et enrichis avec des capacités sémantiques et de raisonnements. OntoSTEP couvre ainsi les données géométriques, les données relatives aux fonctions, aux exigences, aux comportements et aux choix de conception du produit.

De nombreux autres ontologies produits ont été développées ces dernières années. Elles sont synthétisées dans le paragraphe suivant.

3.1.4. SYNTHÈSE SUR L'INTEGRATION DES EXPERTISES METIERS

Pour permettre de compléter notre analyse, une synthèse de la recherche bibliographique a été menée (TABLEAU 5) sur les dix dernières années. Les références ont été classées selon les phases du cycle de

⁹ Les Linked Data (Bizer et al., 2009) visent à favoriser la publication de données structurées sur le Web, non pas sous la forme de silos de données isolés les uns des autres, mais en les reliant entre elles pour constituer un réseau global d'informations en s'appuyant sur les standards du Web, tels que HTTP et URI.

vie du produit : Analyse du besoin, conception préliminaire et conception détaillée, industrialisation, fabrication et assemblage, distribution, utilisation, maintenance et fin de vie. Nous les détaillons dans les paragraphes suivants.

De nombreuses ontologies ont pour objet la conception de produits. Ces ontologies peuvent être utilisées au niveau de la conception préliminaire, comme Chang et Terpenney (2009) qui proposent une approche ontologique pour la gestion de la connaissance qui utilise une modélisation graphique pour soutenir la conception préliminaire du produit. Fortineau (2013) propose quant à elle un cadre de référence pour la modélisation produit basée sur les ontologies en s'appuyant sur cinq concepts : produits, processus, ressources, règles et entreprises. Vegetti et al. (2008) proposent PRONTO (PROductONTOlogy) permettant de définir un modèle global autour du produit.

D'autres ontologies se focalisent plus sur la conception détaillée et les liens avec les informations issues de la CAO. Par exemple, Catalano et al. (2008) proposent "Product Design Ontology" (PDO) qui permet d'indexer des informations directement sur le modèle CAO. Li et al. (2011) proposent OntoCAD, une ontologie permettant d'enrichir le modèle CAO avec des annotations standardisées. Lu et al. (2015) proposent une ontologie enrichissant les échanges de données produit de la norme STEP par l'adjonction des données paramétriques pour caractériser les données géométriques variables. Etienne et al. (2011) proposent un modèle basé sur PPO permettant de favoriser l'interopérabilité des systèmes experts CAO. Abdul-ghafour et al. (2012) proposent une ontologie de conception permettant d'échanger la forme du produit, ses paramètres, les contraintes, les fonctionnalités etc. Rahmani et Thomson (2012) proposent une ontologie permettant l'intégration des sous-systèmes au travers du contrôle des interfaces via les interconnexions entre les ports des sous-systèmes. Lim et al. (2011) proposent une ontologie pour les familles de produits. Sanya et Shehab (2014) fournissent une approche ontologique pour renforcer la modularité et la réutilisation des conceptions techniques dans l'industrie aérospatiale. Plus globalement, Bock et al. (2010) proposent une ontologie pour l'ingénierie simultanée.

Les phases de calculs engendrant de nombreux problèmes d'interopérabilité, plusieurs travaux se sont intéressés à l'apport des ontologies sur ce sujet particulier. Biahmou et al. (2010) proposent CAMAT (CATIA-Matlab Translator) qui permet d'assurer l'interopérabilité entre conception et simulation pour ces outils spécifiques. Oestersötebier et al. (2012) développent une ontologie multi-domaine basée sur la structure produit et des modèles de simulation idéalisés. Nosenzo et al. (2014) proposent une intégration CAO/IAO au travers d'une plateforme PDM. Assouroko et al. (2014) définissent une approche pour assurer l'interopérabilité entre la conception et le calcul en reliant les différentes ontologies au travers d'un gestionnaire de relations. Vosgien (2014) définit des échanges entre logiciels CAO et logiciels de simulation, en se basant sur les formats standards comme STEP.

Dans les phases de production, l'apport des ontologies et des modèles de données est également très présent pour assurer le lien entre conception et fabrication. Nassehi et al. (2008) et Valilai et Houshmand (2010) utilisent par exemple l'AP238 pour proposer une plateforme pour l'échange CAO/FAO. Paviot et al. (2011) utilisent un système médiateur pour aligner les ontologies de conception et de fabrication en utilisant des tags sémantiques. Dartigues et al. (2007) proposent une ontologie pour permettre l'échange de fonctionnalités entre le logiciel CAO et IPAO. Harik et al. (2008) proposent un modèle pour l'intégration CAO/IPAO appliqué à l'industrie aéronautique. Suh et al. (2008) proposent UbiDM (design and manufacturing via ubiquitous computing technology) pour générer des retours d'informations de la fabrication vers la conception. Demoly et al. (2011) définissent le modèle Multi-Vues Orienté Assemblage (MUVOA) qui permet le lien entre conception et assemblage. Gruhier et al. (2015) proposent l'ontologie PRONOIA2 pour gérer les données du produit dans les phases de conception et de fabrication.

Les ontologies assurent également la cohérence, le partage et la mise en relations des informations et des connaissances en production. Lin et Harding (2007) créent une ontologie MSE (Manufacturing System Engineering) qui permet de représenter les connaissances de fabrication. (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. (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). Chungoora et al. (2013) proposent l'ontologie MCO (Manufacturing Core Ontology) pour la fabrication.

Au niveau de la chaîne logistique, de nombreuses ontologies existent également. Citons Zhang et Tian (2010) qui proposent une ontologie générique pour la continuité de l'information sur les plateformes logistiques. Lu et al. (2013) proposent une ontologie pour la supply chain basée sur ONTO-PDM et SCOR. Negri et al. (2017) proposent une ontologie pour la logistique interne basée sur les principales ontologies du domaine de la logistique et de la production. Nie et al. (2009) proposent une ontologie combinant logistique et e-commerce. González-Rodríguez et al. (2015) proposent une ontologie pour l'échange et le partage d'information logistique au sein d'une entreprise étendue.

Enfin, concernant la fin de vie spécifiquement, il existe certaines ontologies, mais ces travaux sont peu nombreux. Citons tout de même Chen et al. (2016) qui proposent de combiner un système de retour d'expériences avec les capacités de raisonnement des ontologies pour fournir de l'aide à la décision pour le désassemblage de produits mécaniques.

Ces différentes ontologies sont synthétisées dans le tableau suivant :

TABLEAU 5 : SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE L'INTEROPÉRABILITÉ POUR LE PLM

Ontologies pour l'interopérabilité sémantique		
Analyse du besoin, conception préliminaire et conception détaillée	(Catalano et al., 2008)	(Oestersötebier et al., 2012)
	(Vegetti et al., 2008)	(Rahmani et Thomson, 2012)
	(Chang et Terpenney, 2009)	(Abdul-ghafour et al., 2012)
	(Bock et al., 2010)	(Fortineau, 2013)
	(Biahmou et al., 2010)	(Assouroko et al., 2014)
	(Etienne et al., 2011)	(Nosenzo et al., 2014)
	(Li et al., 2011)	(Vosgien, 2014)
	(Lim et al. 2011)	(Sanya et Shehab, 2014)
	(Barbau et al., 2012)	(Lu et al., 2015)
Industrialisation, fabrication et assemblage	(Lin and Harding, 2007)	(Valilai and Houshmand, 2010)
	(Dartigues et al., 2007)	(Kühnle, 2010)
	(Nassehi et al., 2008)	(Paviot et al., 2011)
	(Harik et al., 2008)	(Demoly et al., 2011)
	(Suh et al., 2008)	(Panetto et al., 2012)
	(Fenves et al., 2008)	(Chungoora et al., 2013)
	(Jiang et al., 2009)	(Gruhier et al., 2015)
	(Chen et al., 2009)	(Negri et al., 2017)

distribution,	(Jun et al., 2007)	(Lu et al., 2013)
utilisation,	(Nie et al., 2009)	(González-Rodríguez et al., 2015)
maintenance et	(Matsokis et Kiritsis, 2010)	(Chen et al., 2016)
fin de vie	(Zhang et Tian, 2010)	

Au regard de l'analyse qui vient d'être menée dans cette partie, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

- Deux solutions apparaissent plébiscitées pour atteindre l'interopérabilité sémantique : l'utilisation de formats standards et l'utilisation de modèles ontologiques. La combinaison de ces deux approches semble une voie prometteuse pour la structuration des expertises métier et leur appropriation par l'industrie.
- Les ontologies en conception de produits sont majoritairement des ontologies légères. L'adjonction de règles et de capacités de raisonnement est encore assez peu fréquente dans ce domaine. Ces capacités de raisonnement auront pourtant une véritable valeur ajoutée pour l'utilisation efficace des données collectées.
- Les phases de MOL et de EOL sont moins couvertes que les phases de BOL. Il reste d'important efforts à faire pour structurer ces phases qui vont amener de plus en plus d'information à intégrer.
- Enfin, de nombreux recouvrements existent entre les ontologies ce qui rend difficile les échanges sans un effort préalable d'harmonisation. Des méthodes d'unification et de fédération sont à développer pour faciliter cette harmonisation.

Le paragraphe suivant détail nos travaux utilisant les ontologies et les standards en proposant une méta-ontologie et trois ontologies distinctes basées sur des standards STEP.

3.2. APPORTS ET RESULTATS OBTENUS

Afin de contribuer au développement de connaissances permettant de faciliter la continuité du flux d'information, la capitalisation et la structuration des expertises métiers, j'ai été amené à encadrer, à diriger et à mener moi-même différents travaux. Tout d'abord lors de ma thèse de doctorat, un méta-modèle Produit-Activité-Ressource-Organisation a été développé pour les PME mécaniciennes. Ce méta-modèle sert de base sémantique à la suite de mes travaux. Dans un second temps, un modèle d'interface multidisciplinaire qui permet de faire le lien entre différents domaines (mécanique, électrique et informatique) lors de la conception de produits mécatroniques. Puis la création de deux ontologies : OntoSTEP-NC concernant l'industrialisation de pièces usinées et ODE pour faciliter la mise en œuvre de simulations et de plans d'expériences numériques.

3.2.1. META-MODELE PRODUIT ACTIVITE RESSOURCE ORGANISATION POUR LES PME MECANICIENNES

La première approche fut développée dans mes travaux de thèse afin d'assurer la continuité numérique et l'intégration d'expertises métiers à un niveau inter-entreprises. Ces travaux furent par la suite complétés par le post-doctorat de Pierre Emmanuel Arduin (2013-2014) et la collaboration avec Marie-Hélène Abel du Laboratoire Heudysic, afin notamment de transformer le modèle de données en ontologie et d'assurer un certain nombre de mapping entre ce méta-modèle et d'autres ontologies.

Dans le contexte des PME mécaniciennes, les approches PLM étaient plébiscitées mais peu implémentées réellement en 2010. La majorité des applications se restreignaient à l'utilisation d'un

système d'information PDM comme base de données et de stockage des fichiers CAO. L'objectif de cette thèse était de proposer des méthodes et des modèles pour faciliter l'intégration des expertises métiers afin de pouvoir dans un second temps proposer des systèmes à base de connaissances pour aller plus loin que l'utilisation classique du PDM dans ces entreprises.

Nous avons alors proposé un modèle produit basé sur une approche déductive, s'appuyant sur les modèles cités plus haut. Nous avons donc pris une approche FBS et PPR, s'appuyant sur PPO, FBS-PPRE, CPM et STEP (AP239) pour proposer un modèle de données Produit Activité Ressource Organisation (PARO) (FIGURE 20).

Elle fut complétée par une approche inductive, basée sur trois PME mécaniciennes, afin de définir la spécialisation du modèle PARO qui convient à leur besoin en terme de PLM. Une méthode en trois étapes (analyse du besoin, identification des processus, création des objets d'entreprises spécifiques) ainsi que les langages préconisés furent proposée et testée.

Enfin, pour réponse aux besoins initialement définis, le développement d'un démonstrateur PLM a permis l'application de notre modèle et de notre méthodologie de spécialisation. Son utilisation dans les PME précédemment identifiées nous a permis l'affinage puis la validation de nos propositions.

Dans un deuxième temps, le post-doctorat de Pierre Emmanuel Arduin nous a permis de reprendre ce méta-modèle comme référence pour nos travaux sur le PLM, de le transformer en ontologie puis d'effectuer certains mappings (en ATLAS Transformation Language : ATL¹⁰) pour en assurer l'interopérabilité avec d'autres plateformes, dont MEMorae (Abel et al., 2004), une plateforme de gestion documentaire basée sur des ontologies développées au sein du Laboratoire Heudaysic.

¹⁰ <http://www.eclipse.org/atl/>

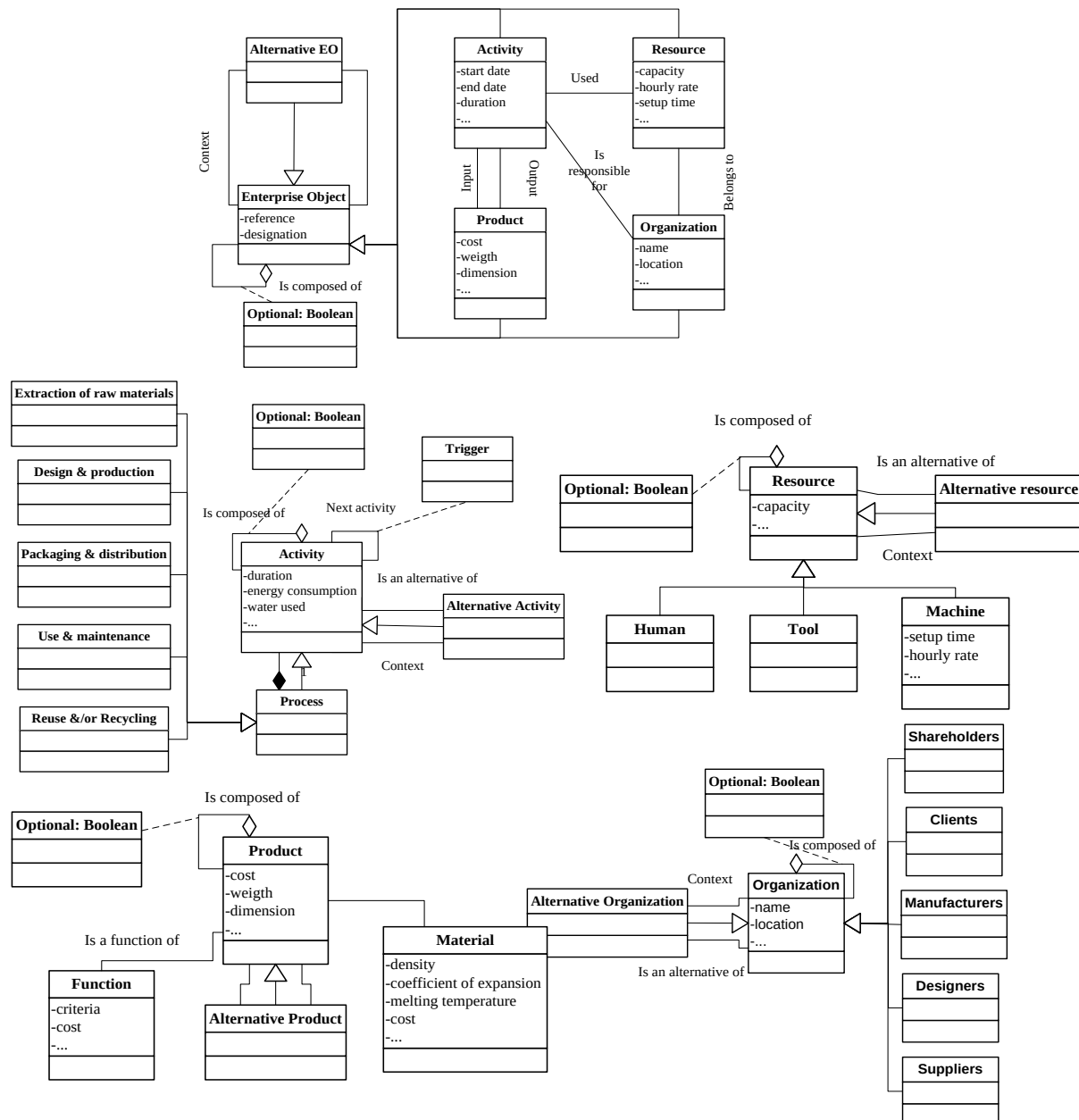


FIGURE 20: META-MODELE PARO

Ces travaux ont donné lieu à la création d'une start-up et à la création d'un logiciel PLM dédié aux PME mécaniciennes.

3.2.2. MODELE D'INTERFACE MULTIDISCIPLINAIRE : APPLICATION A LA CONCEPTION MECATRONIQUE

Une deuxième approche fut développée dans le cadre des travaux de thèse de Chen Zheng, de la collaboration avec Peter Hehenberger de la Johannes Kepler University de Linz en Autriche, et de la collaboration avec d'Erwan Dupont de l'équipe MEEI (Mécatronique, Energie, Electricité, Intégration) du laboratoire Roberval sur l'intégration multidisciplinaire dans le cadre de la conception de systèmes mécatroniques.

Les systèmes mécatroniques sont caractérisés par la combinaison synergique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique. Ils possèdent leur propre cycle de vie et doivent associer des expertises métiers et des technologies très variées, ce qui rend leur conception plus complexe et nécessairement plus intégrée. Afin de mettre en œuvre une approche permettant d'assurer une plus forte intégration fonctionnelle et spatiale des systèmes mécatroniques, nous proposons un modèle de données et un processus de conception assurant une meilleure intégration des expertises métiers.

Un modèle d'interface multidisciplinaire (FIGURE 21) est proposé pour répondre à la problématique relative aux données de conception. Basé sur les principaux modèles produits, dont STEP AP233, ce modèle Multidisciplinary Interface Model (MIM) est aligné sur le méta-modèle PARO. Ces interfaces s'appuient sur l'architecture du système et précisent quels transferts existent entre les composants conçus par les différentes disciplines. Instanciées dans le modèle de données, les interfaces multidisciplinaires permettent d'échanger et de partager les informations entre les différentes disciplines.

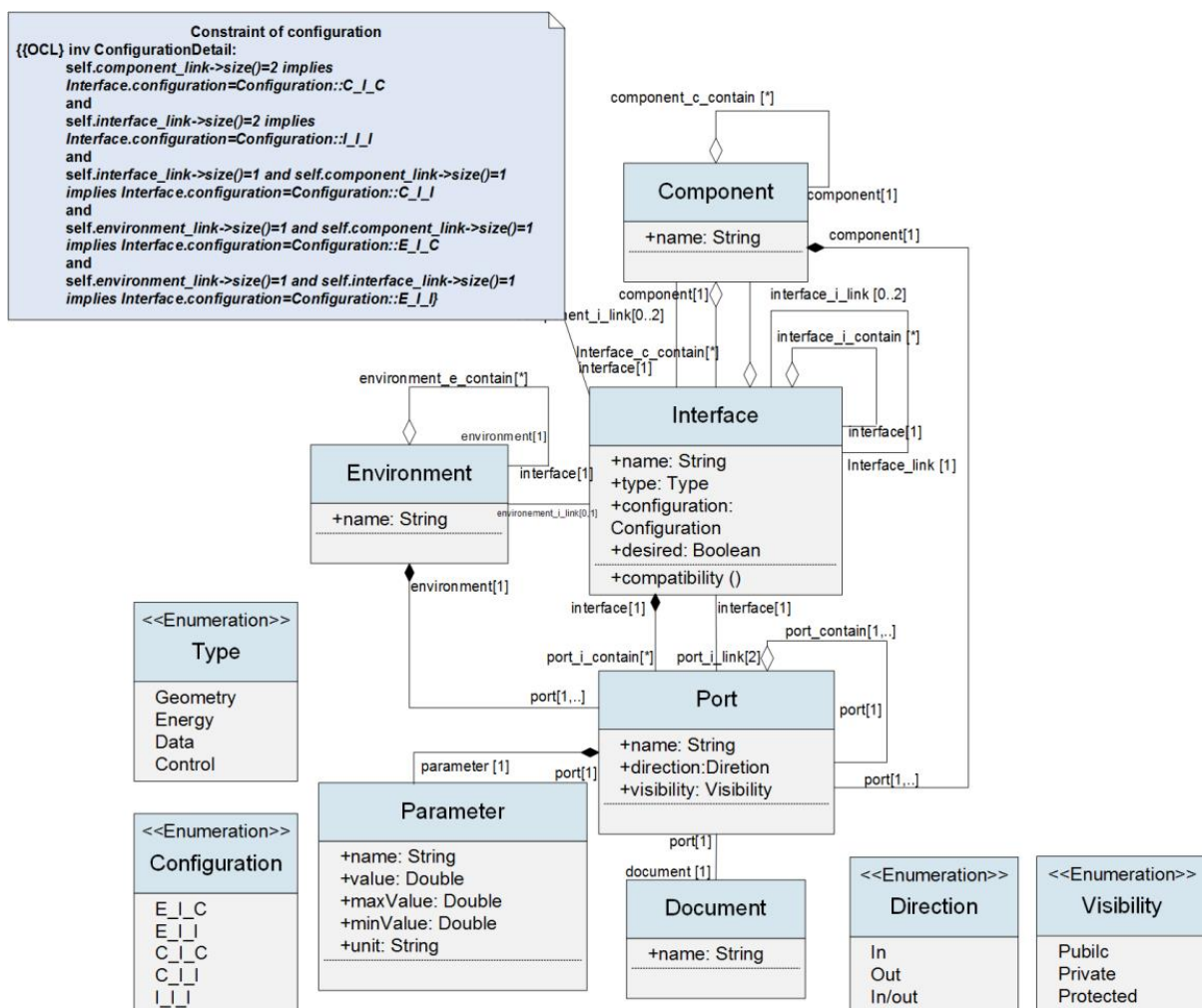


FIGURE 21: DIAGRAMME DE CLASSES UML DE L'INTERFACE MULTIDISCIPLINAIRE

Cette proposition est implémentée par l'intermédiaire d'un démonstrateur basé sur CATIA V6 (FIGURE 22). Deux cas d'étude (un convoyeur électrique et un drone quadripode) ont été utilisés afin de démontrer et de valider les contributions de nos travaux en terme d'intégration multidisciplinaire des expertises métiers lors de la conception des systèmes mécatroniques.

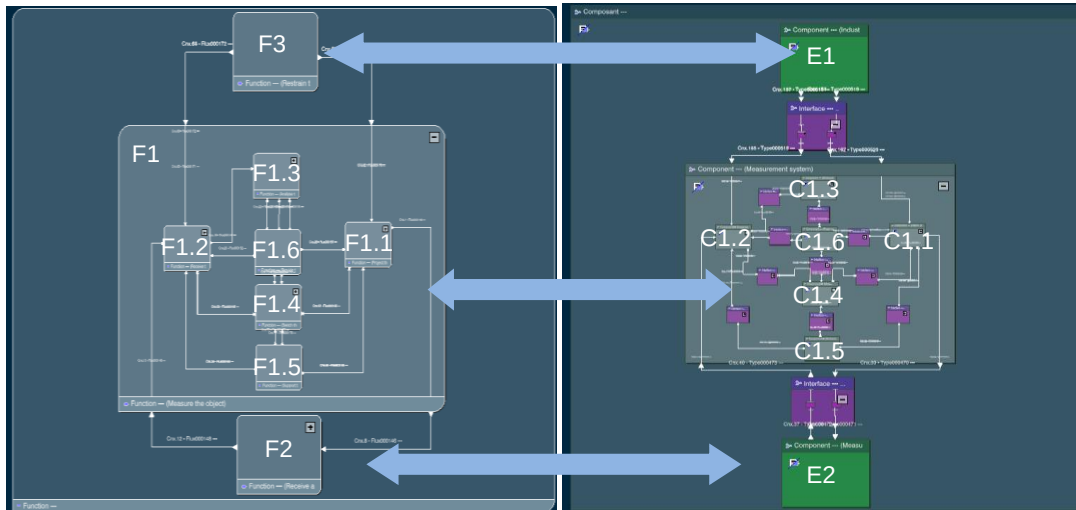


FIGURE 22 : MODELES FONCTIONNEL ET STRUCTUREL D'UN SYSTEME DE MESURE 3D

Ce modèle d'interface a permis de favoriser la transmission d'informations multidisciplinaires au plus tôt dans le processus de développement des cas d'étude, garantissant une meilleure intégration des sous-systèmes.

3.2.3. ONTOSTEP-NC : INTEGRATION D'EXPERTISES EN INDUSTRIALISATION

Ce travail, qui repose sur la thèse de Christophe Danjou et sur le projet FUI ANGEL, s'intéresse à la gestion d'informations et connaissances issues de l'usinage pour assurer l'interopérabilité et la continuité de la chaîne numérique support à la conception-industrialisation-fabrication. Cette chaîne utilise des outils divers (CAO, FAO, Post-Processur, Simulation numérique, MOCN) et différents formats (fichiers CAO, FAO, APT, CLFile, Code G...). La continuité numérique n'est pas assurée et une fois le post-processeur passé, il n'y a plus de bidirectionnalité du flux d'information (un changement après ce point ne sera pas répercuté automatiquement sur les fichiers en amont).

Nous proposons OntoSTEP-NC (FIGURE 23) pour permettre l'extraction et la structuration des données issues de la fabrication. Cette ontologie est basée sur les principaux modèles produit dont STEP AP238 qui contient les informations de définition du produit et les informations nécessaires à son usinage. Elle permet d'intégrer l'ensemble des informations contenues dans les codes en STEP-NC. Ces travaux proposent de structurer la connaissance au niveau entité d'usinage (manufacturing feature) comme définie par le groupe GAMA (1990). Les différents types d'entités d'usinage (trou, poche, rainure...incluant les dimensions et les tolérances) sont alors liés aux différents paramètres de coupe (les vitesses d'avance, les vitesses de broche, les avances par dent, les taux de recouvrement, les taux d'engagement...), aux stratégies d'usinage, d'approche et de retrait, aux matériaux, aux outils coupants... Ce niveau de détail permet de descendre à un niveau de la connaissance d'usinage suffisamment bas pour être réexploitable dans un contexte différent.

A défaut d'avoir de nombreux fichiers utilisant STEP-NC (car ce code n'est pas très répandu dans l'industrie pour le moment, faute de machines-outils acceptant son format), nous utilisons un traducteur code G – STEP-NC fourni par un partenaire du projet (LURPA, ENS Cachan). Ce traducteur nous permet d'obtenir de grandes quantités de données à traiter.

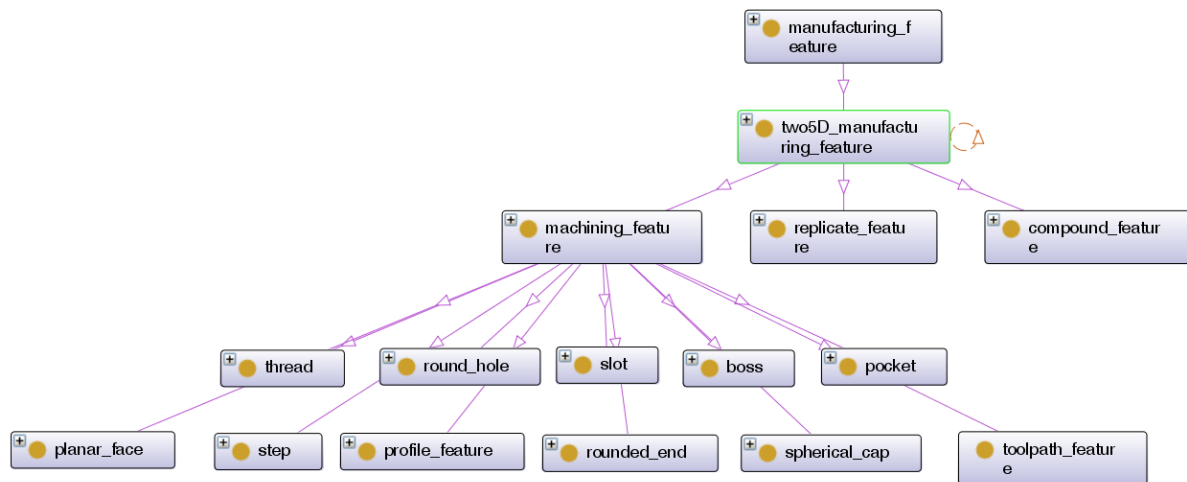


FIGURE 23 : EXTRAIT DU GRAPHE DE L'ONTOLOGIE ONTOSTEP-NC

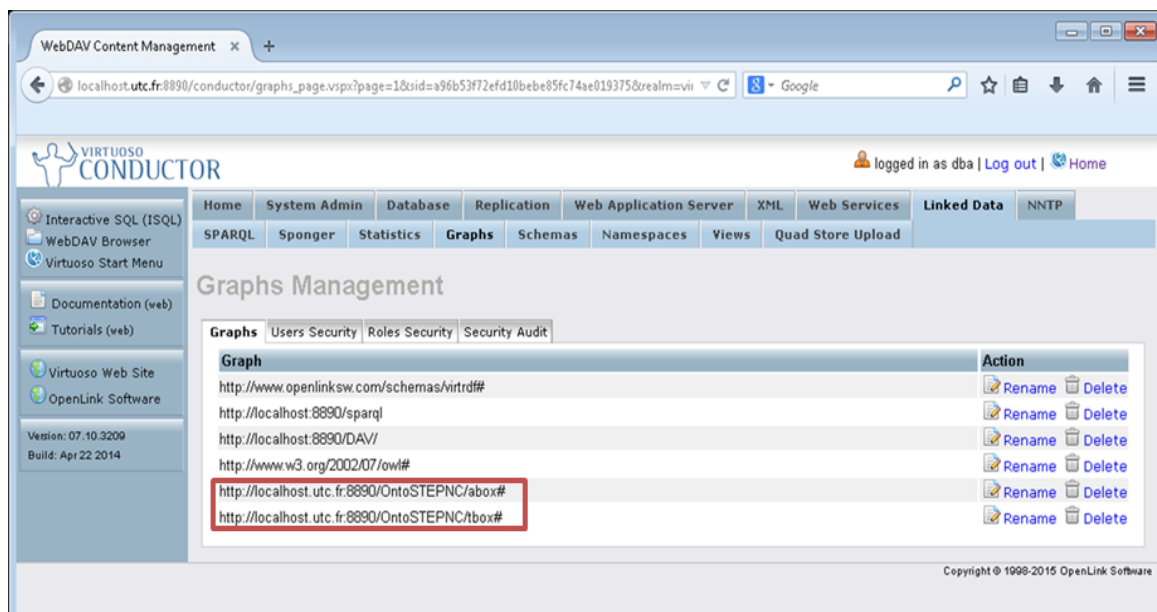


FIGURE 24 : IMPLEMENTATION DES MODELES ABOX# ET TBOX# DANS VIRTUOSO

Ces travaux ont été validés au travers d'un démonstrateur basé sur une ontologie définie sous Protégé, instanciée en base XLM sous VirtuosO. (FIGURE 24) et intégrée sous CATIA V5 pour l'IHM FAO. Un cas d'étude industriel comportant plusieurs scénarii basés sur une pièce test utilisée pour tester les logiciels de simulation de MOCN a permis de valider ces propositions. OntoSTEP-NC est actuellement partiellement implémenté chez un éditeur logiciel dans son logiciel de simulation d'usinage.

3.2.4. ODE : ONTOLOGIE POUR LA SIMULATION ET LES PLANS D'EXPERIENCES NUMERIQUES

Une démarche de gestion du cycle de vie des simulations (Simulation Lifecycle Management : SLM) est, par analogie au PLM, une démarche d'entreprise visant à s'assurer de la persistance et de la sécurisation du patrimoine intellectuel de l'entreprise par une gestion efficace des données, des processus et des applications liées à la simulation (Norris, 2012).

Les travaux de Gaëtan Blondet s'inscrivent dans ce paradigme SLM en se focalisant sur les plans d'expériences numériques (PEN). Ils furent développés dans le cadre du projet FUI SDM4DOE. Les PEN sont de plus en plus utilisés pour intégrer le caractère variable des propriétés du produit et de son environnement directement lors des simulations. Un processus de PEN apporte des méthodes de planification et d'analyse d'un ensemble de simulations pour mieux maîtriser les performances du produit. L'utilisation de PEN conduit à une production de grands volumes de données hétérogènes, par l'exécution simultanée de nombreuses simulations numériques.

Ces travaux se sont orientés vers la réutilisation des connaissances en entreprise grâce à une ontologie spécifique pour supporter la capitalisation et le partage des connaissances liées aux PEN. En effet, la mise en place d'un processus PEN est complexe et demande de nombreuses expertises pour être optimum. Il faut définir l'objectif du PEN (analyse de sensibilité, optimisation, analyse de robustesse, création d'un modèle de substitution (avec le type de modèle : polynômes, krigeage...)), choisir le type de plan (plans de Box-Behnken, de Taguchi, les plans de Sobol, d'Halton, les hypercubes latins...), les critères de remplissage (variance maximale, expected improvement...), les algorithmes d'optimisation (algorithme génétique, essaim particulaire...), ainsi que l'ensemble des relations entre tout ces choix, sans parler du paramétrage spécifique de chacune de ces méthodes ...

Nous avons proposé ODE (Ontology for Design of Experiment) basée sur l'AP209 pour la partie simulation, PARO pour se connecter au niveau processus de conception, EXPO (Soldatova et King, 2006) pour les plans d'expériences classiques, et STATO¹¹ pour les méthodes statistiques (FIGURE 25). Cette ontologie fut ensuite connectée à Uranie¹² et Code_Aster¹³ afin de capitaliser les informations créées lors de l'utilisation de PEN via ces logiciels.

Cette proposition est illustrée par une application sur un produit industriel issu du secteur automobile. Le modèle fut créé avec Protégé et implémenté dans une base Virtuoso, les requêtes sur la base sont faites en SPARQL (TABLEAU 6 et FIGURE 26). Concernant le processus de simulation et de plan d'expériences numériques, les simulations furent effectuées en ANSYS ou Code_Aster, les PEN configurés sous Uranie avec des scripts en Python.

¹¹ <http://stato-ontology.org/>

¹² <https://sourceforge.net/projects/uranie/>

¹³ <http://www.code-aster.org/>

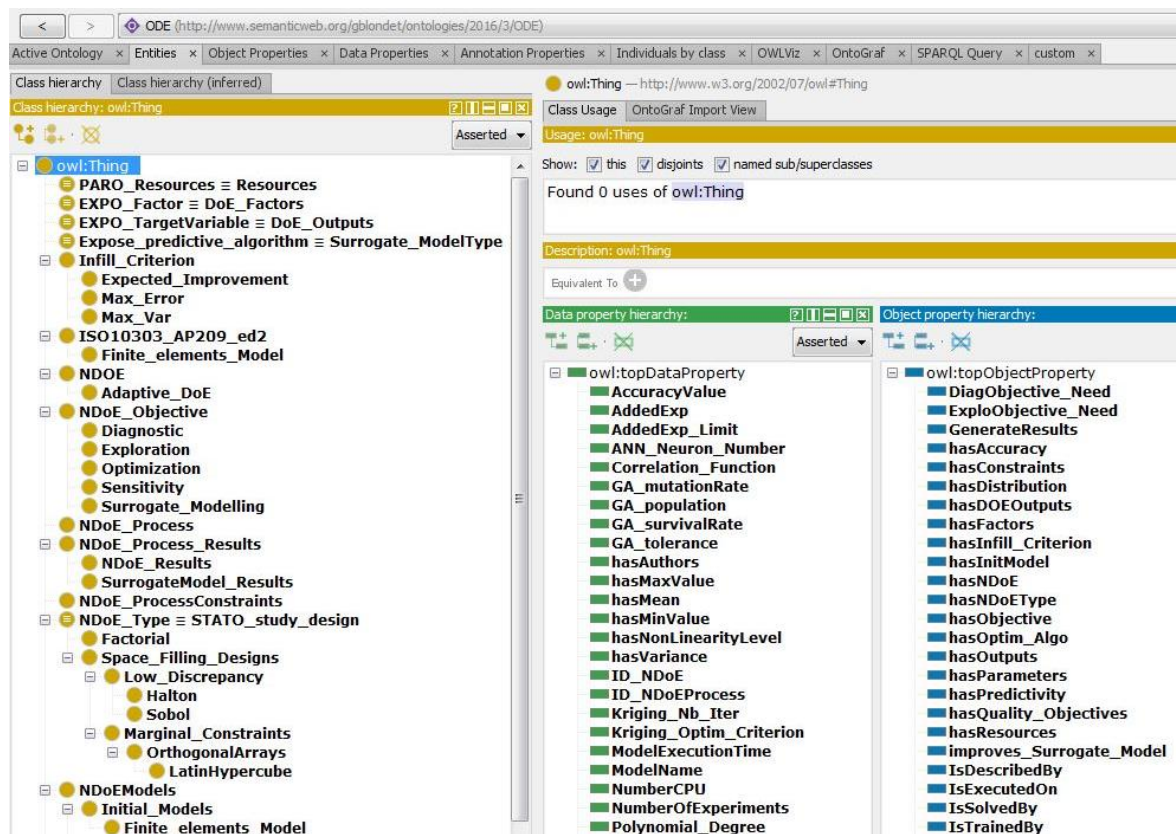


FIGURE 25: VUE GLOBALE D'ODE DANS PROTEGE

TABLEAU 6 : REQUETE ECRITE EN SPARQL

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX ode: <http://www.semanticweb.org/gblondet/ontologies/2016/3/ODE#>

SELECT * WHERE
{
  ?NDOE_Process ode:hasObjective ?objective .
  ?objective rdf:type ?obj_type .
  ?NDOE_Process ode:hasNDOE ?NDOE .
  ?Surrogate_Model ode:IsTrainedBy ?NDOE .
  FILTER (?obj_type = ode:Surrogate_Modelling)
}
UNION
{
  ?NDOE_Process ode:hasObjective ?objective .
  ?objective rdf:type ?obj_type .
  ?NDOE_Process ode:hasNDOE ?NDOE .
  ?Surrogate_Model ode:IsTrainedBy ?NDOE .
  FILTER (regex( str(?Surrogate_Model), "^." ))
  FILTER (?obj_type != owl:NamedIndividual && ?obj_type != ode:NDOE_Objective )
}

```

NDOE_Process	objective	obj_type	NDOE	Surrogate_Model
NDOE_Process_194	NDoE_Process_Objective_194	Sensitivity	NDoE_194	Surr_model_194
NDOE_Process_168	NDoE_Process_Objective_168	Sensitivity	NDoE_168	Surr_model_168
NDOE_Process_23	NDoE_Process_Objective_23	Sensitivity	NDoE_23	Surr_model_23
NDOE_Process_131	NDoE_Process_Objective_131	Sensitivity	NDoE_131	Surr_model_131
NDOE_Process_105	NDoE_Process_Objective_105	Sensitivity	NDoE_105	Surr_model_105
NDOE_Process_396	NDoE_Process_Objective_396	Sensitivity	NDoE_396	Surr_model_396
NDOE_Process_276	NDoE_Process_Objective_276	Sensitivity	NDoE_276	Surr_model_276
NDOE_Process_345	NDoE_Process_Objective_345	Sensitivity	NDoE_345	Surr_model_345

FIGURE 26: EXTRAIT DES RESULTATS DE LA REQUETE

ODE a été utilisé pour structurer la partie plans d'expériences numériques du guide AFNOR FD X06 081 : Mise en œuvre des plans d'expériences par essai ou par simulation numérique : choix et exemples d'application.

3.4. CONTRIBUTIONS ET OUVERTURES

En résumé de ce chapitre, les travaux de recherche que j'ai menés s'inscrivent dans le cadre de la recherche en conception intégrée et en PLM pour faciliter l'interopérabilité sémantique et l'intégration d'expertises métiers notamment par l'utilisation des ontologies.

Nous avons proposé trois ontologies pour la conception intégrée (FIGURE 27). Elles sont toutes basées sur les modèles produits préexistants et une approche FBS et PPR. Elles sont cohérentes entre elles et liées au méta-modèle PARO via des classes d'équivalence.

MIM propose une ontologie facilitant l'intégration multidisciplinaire dans un contexte d'ingénierie système et de conception de produits mécatroniques. Elle se base principalement sur les interfaces entre systèmes pour assurer au fur et à mesure de l'avancée du projet et de la définition des systèmes, une capitalisation, un partage, une compréhension commune et une utilisation des données d'interfaces nécessaires pour les partenaires du projet venant de domaines différents.

OntoSTEP-NC est une ontologie basée sur STEP-NC qui permet de définir, de capitaliser et de partager des données de définition et de fabrication à un niveau de détail permettant leur réutilisation unitaire, c'est-à-dire l'entité d'usinage.

ODE participe à faciliter l'utilisation des processus de PEN dans l'industrie, en offrant un support pour les connaissances de l'entreprise en cohérence avec les ontologies existantes. Les connaissances sont alors mieux capitalisées, plus compréhensibles et plus facilement partagées dans un contexte d'ingénierie collaborative.

Ces propositions apportent :

- Une structuration ontologique des connaissances spécifiques aux PEN, aux entités d'usinage, aux interfaces multidisciplinaires, jusqu'alors inexistantes.
- Une intégration des connaissances relatives aux processus de développement de produit, aux statistiques, à l'industrialisation, à l'ingénierie système dans une même structure ontologique cohérente, par des liens entre les structures existantes via le méta-modèle PARO.
- Une prise en compte des structures standards existantes spécifiées par l'ISO, notamment STEP, AP239 pour PARO, AP233 pour MIM, AP209 pour ODE et AP238 pour OntoSTEP-NC.
- Un support pour la capitalisation, le partage et la diffusion de connaissances relatives aux processus de développement de produit.

Elles ont été implémentées dans des logiciels commerciaux ou libres (CATIA V6 System, CATIA V5 FAO, URANIE) et sur des bases Protégé et Virtuoso. Elles ont été validées sur des cas d'études industriels, venant principalement de l'industrie automobile et aéronautique.

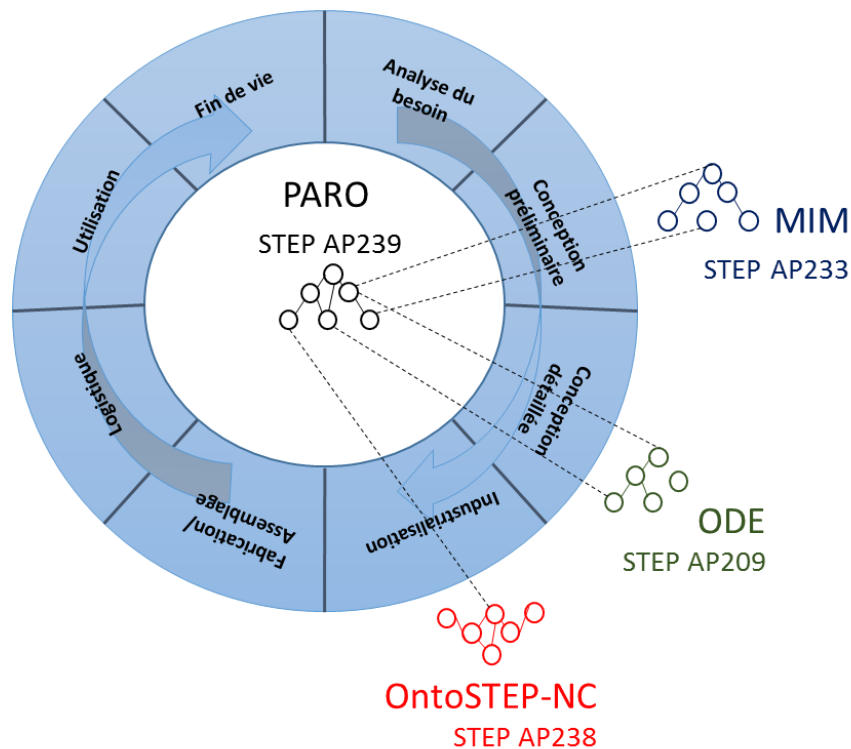


FIGURE 27: ONTOLOGIES PRODUITS

Nous considérons que les standards doivent autant que possible être utilisés pour établir des modèles sémantiques. En effet, ils contiennent une sémantique riche, issue du travail collaboratif de nombreux experts, crédible d'un point de vue industriel. De plus, les récents travaux de normalisation sur le sujet visent à assurer une meilleure cohérence entre eux (notamment au sein de STEP), ce qui est également notre objectif.

Nous avons d'ailleurs dans ce sens mené deux actions :

- Rapporter les incohérences et incomplétudes issues de STEP-NC que nous avons identifiées dans nos travaux au sein du CP IDMI¹⁴.
- Partager notre ontologie sur les PEN au sein de la commission de normalisation « Méthodes statistiques » et en participant à la rédaction du fascicule FD X06-081 « Plan d'expériences - Mise en œuvre des plans d'expériences par essais ou par simulation numérique : choix et exemples d'applications ».

Nous avons proposé des structurations des connaissances pour la conception de systèmes mécaniques en intégrant différentes phases du cycle de vie. Nous ne cherchons pas à proposer un modèle universel qui couvre tout le scope du développement de produit. Il est maintenant communément admis dans la communauté scientifique du domaine que ce n'est pas possible. Nous pensons que différentes ontologies, spécifiques aux problèmes qu'elles traitent, basées sur les standards et facilement connectables seront plus efficaces pour supporter l'échange d'information, la gestion des connaissances et l'aide à la décision en conception mécanique.

¹⁴ Ingénierie des Données et des Modèles pour l'Industrie (<http://norminfo.afnor.org/structure/afnorcp-idmi/ingenierie-des-donnees-et-des-modeles-pour-lindustrie/3310>)

Au total, le rayonnement scientifique de cette axe de recherche a donné lieu à :

- 11 articles en revues indexées WoS ou Scopus [A1] [A2] [A3] [A5] [A9] [A10] [A16] [A17] [A20] [A22] [A23]
- 3 articles en revues à comité de lecture non indexées WoS ou Scopus [B1] [B4] [B5]
- 1 chapitre publié dans un ouvrage de synthèse [C2]
- 27 communications à des congrès internationaux à comité de sélection et actes publiés [D1] [D2] [D3] [D4] [D5] [D6] [D7] [D8] [D9] [D10] [D11] [D12] [D18] [D19] [D20] [D22] [D24] [D25] [D26] [D27] [D30] [D34] [D40] [D45] [D46] [D47] [D48]
- 12 communications à des congrès nationaux à comité de sélection [E1] [E2] [E3] [E4] [E5] [E8] [E9] [E10] [E11] [E12] [E17] [E19]
- 3 rapport de projet [H4] [H5] [H7]

4. AXE DE RECHERCHE 2 : APPORT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA REUTILISATION DES EXPERTISES METIERS

Cet axe de recherche présente nos travaux sur l'exploitation et la réutilisation des expertises métiers pour l'aide à la décision en conception mécanique, notamment grâce à des systèmes à base de connaissances utilisant des techniques d'intelligence artificielle. L'aide à la décision pour la conception nécessite d'utiliser des raisonnements pour imiter la réflexion du concepteur. Il s'agit là d'une branche des sciences cognitives qui se scinde elle-même en deux sous-branches : le symbolisme, qui va utiliser une approche déductive à partir de connaissances et des règles pour mener une réflexion formelle, et le connexionnisme qui va utiliser une approche inductive à partir des données et expérimentations disponibles pour mener une réflexion statistique. Nous allons utiliser ces deux approches pour permettre d'exploiter au mieux à la fois les connaissances et les données dont nous disposons pour l'aide à la décision dans les différentes expertises nécessaires à la conception mécanique. Nos travaux sur le sujet se présentent ainsi : nous commençons par un état de l'art sur l'utilisation des méthodes d'intelligence artificielle permettant les raisonnements symboliques et connexionnistes. Puis nous présenterons nos travaux sur le sujet avec trois apports distincts, un système à base de règles, un système de retour d'expériences (Case-Based Reasoning : CBR) et une approche d'apprentissage automatique basée sur un réseau bayésien. Nous terminerons par une synthèse et des ouvertures sur le sujet.

4.1. ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE SPECIFIQUE

4.1.1. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : CONNEXIONNISME ET SYMBOLISME

Marvin Lee Minsky (1975) définit l'intelligence artificielle comme « *la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique* ».

Un système sera considéré comme intelligent s'il reproduit le comportement d'un être humain dans un domaine spécifique (Simons, 1985). Pour ce faire, il devra :

- Comprendre comment apprendre, mémoriser,
- Modéliser les connaissances et le raisonnement,
- Fournir des modèles et en tester le comportement.

Un système d'intelligence artificielle devra comporter une base de connaissance et une capacité de raisonnement. Nous avons déjà évoqué les bases de connaissances au chapitre précédent. Intéressons-nous maintenant aux méthodes de raisonnement.

Deux types de raisonnement sont classiquement identifiés en intelligence artificielle (Valiant, 2003) :

- Le symbolisme : basé sur la logique formelle, il propose des symboliques avec des prédicats logiques pour le raisonnement sur les connaissances. Parmi les systèmes utilisant le symbolisme, on retrouve classiquement les systèmes à base de règles. Ces systèmes fournissent des descriptions et permettent d'expliquer leur processus d'inférence, par exemple à travers la démonstration automatique de théorèmes, et l'utilisation de puissants langages déclaratifs pour la représentation des connaissances et du raisonnement.
- Le connexionnisme : basé sur le calcul statistique, il s'appuie sur les données pour en extraire des règles statistiques. Les méthodes d'apprentissage automatique font partie de cette catégorie de raisonnement. Citons parmi les plus utilisées dans le contexte PLM et conception intégrée

qui nous intéresse, les réseaux de neurones, les réseaux bayésiens, les arbres de décisions et les machines à vecteurs de support (Support Vector Machine : SVM). Ces méthodes présentent l'avantage d'accepter le parallélisme massif, d'avoir une bonne tolérance aux défaillances (apprentissage robuste), de permettre un apprentissage inductif et enfin d'avoir des capacités de généralisation.

Si ces deux types de raisonnements sont classiquement séparés dans le domaine de l'informatique et des sciences cognitives, il existe aujourd'hui une tendance vers une voie médiane combinant ces deux approches afin de cumuler les avantages de chacun des deux paradigmes.

Dans la pratique, et notamment dans des situations où l'imperfection et l'incertitude influent fortement sur certains paramètres, des approches alternatives comme la théorie des probabilités (Pearl, 2014) et la logique floue (Zadeh, 1978) peuvent s'avérer appropriées et compléter intelligemment les approches précédentes.

Nous allons maintenant étudier plus en détail les différentes méthodes de raisonnement issues du symbolisme et du connexionnisme les plus fréquemment utilisées dans le contexte de la conception intégrée pour supporter les systèmes à base de connaissances.

4.1.2. SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCE : SYSTEMES EXPERTS ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Une revue des développements concernant les systèmes à base de connaissances (Shu-Hsien Liao, 2005) (Sahin et al., 2012) ont permis d'identifier les principales méthodes de raisonnement existantes. Parmi celles-ci, nous retrouvons les systèmes à base de règles, les systèmes de retour d'expériences et les méthodes d'apprentissage automatique, dont les réseaux de neurones, les réseaux bayésiens, les arbres de décisions et les machines à vecteurs de support.

Les systèmes experts sont des systèmes ayant pour but de modéliser et de simuler le savoir d'un expert humain dans un domaine donné. Ils sont généralement constitués d'une base de connaissances (comportant une base de faits et une base de règles) et d'un moteur d'inférence permettant le raisonnement à proprement parler. Parmi les systèmes experts les plus utilisés en conception intégrée et en PLM, nous avons principalement deux types de systèmes : les systèmes à base de règles et les systèmes à base de cas.

Les systèmes à bases de règles

Les systèmes à base de règles sont des systèmes constitués de faits avérés, de connaissances opératoires associées au domaine, exprimées sous la forme de règles *Si Condition 1 Alors Conséquence A* et de faits à établir. Ainsi, selon les faits à établir, un chaînage avant est effectué afin de prouver d'autres faits. L'inférence se fait généralement selon quatre phases :

1. La sélection qui détermine à partir d'un état présent de la base de faits et de la base de règles, un sous-ensemble qui méritera d'être comparé à la phase de filtrage.
2. Le filtrage (ou Pattern Matching) compare les déclencheurs de chacune des règles du sous-ensemble par rapport à l'ensemble des faits du sous-ensemble. Cela mène à créer un nouveau sous-ensemble de règles, appelé ensemble de conflits, qui rassemble toutes les règles du sous-ensemble qui ont des déclencheurs actifs dans le sous-ensemble de faits.
3. La résolution de conflits sélectionne les règles qui peuvent effectivement être déclenchées.

4. Enfin la phase d'exécution met en œuvre les actions définies par les règles déclenchées.

Dans le domaine de la mécanique, Naranje et Kumar (2014) proposent un système à base de règle pour la conception automatisée des pièces de formage asymétriques. Subba Rao et Pratihar (2007) combinent système à base de règle et logique floue pour prédire les résultats de simulation par éléments finis. C'est également cette combinaison qu'utilise Urrea et al. (2015) pour une sélection automatique du matériau en fonction de la structure mécanique. Torres-Treviño et al. (2013) proposent un système basé sur des règles métiers pour trouver le séquençage le plus adapté et la meilleure stratégie d'usinage. Des capacités d'apprentissage ont été par la suite ajoutées aux systèmes à base de règles, notamment en utilisant la méthode d'Inductive Logic Programming (Dolšák, 2002).

Les systèmes de retour d'expériences

Les systèmes de retour d'expériences sont une seconde catégorie de systèmes experts basés sur la réutilisation et l'adaptation de solutions pour un nouveau cas. Ce type de raisonnement se décompose en quatre étapes principales (Aamodt et Plaza, 1994) :

1. Retrouver les cas les plus similaires. De nombreuses méthodes de mesure de similarité ont été proposées (Lopez de Mantaras et al., 2005).
2. Réutiliser les connaissances de ces cas pour résoudre le problème considéré. La réutilisation peut être réalisée par l'adaptation du cas le plus similaire ou par la réutilisation de la méthode ayant abouti à ce cas.
3. Réviser la solution proposée. La solution issue des deux premières étapes n'étant qu'une proposition, elle peut être imparfaite et peut nécessiter des ajustements.
4. Retenir cette nouvelle solution. La base de cas est enrichie à chaque cycle.

Les systèmes de retour d'expériences supportent le raisonnement à base de cas. Ils sont capables d'apprendre des données et de fournir des explications concernant la génération des solutions proposées. Cependant les règles expertes sont nécessaires à la réutilisation et l'adaptation de solutions existantes à un nouveau problème.

Ce type de système est appliqué par Khan et al. (2014) pour proposer un maillage automatique pour la simulation par éléments finis. Hashemi et al. (2014) proposent un système de retour d'expériences pour déterminer la mise en position et le posage d'une pièce à usiner. Toujours au niveau de l'usinage, Cao et al. (2013) utilisent ce système pour déterminer les meilleures conditions de coupe.

L'expérience de mise en œuvre de systèmes experts pour l'aide à la décision a montré un certain nombre de limites quant à l'utilisation de ces approches (Perry, 2007). D'une part, le nombre important de règles rend la cohérence difficile à assurer, sans compter les temps de traitements qui peuvent être longs. De plus, la maintenance de tels systèmes devient problématique car les règles évoluent avec l'avancée des connaissances ou des solutions techniques du domaine considéré. La gestion devient alors un enjeu majeur pour l'efficacité dans la durée de ces solutions.

L'apprentissage automatique

Les méthodes d'apprentissage automatique sont quant à elles basées sur des méthodes statistiques et connexionnistes pour permettre le raisonnement à partir d'apprentissage sur des données. Chaque instance d'un jeu de données est définie par une série de variables. Si les noms des variables sont connus pour chaque instance, on parle alors d'apprentissage supervisé (Kotsiantis, 2007). Par contre, si les noms des variables ne sont pas déterminés, il est nécessaire d'appliquer des algorithmes de clustering afin de déterminer les différentes classes, en espérant découvrir de nouvelles classes utiles et jusqu'alors

inconnues (Jain et al., 1999). On parle alors d'apprentissage non supervisé. Un autre type d'apprentissage automatique est celui utilisant l'apprentissage renforcé, qui permet de favoriser tel ou tel comportement (Barto et Sutton, 1997). Le jeu de données fourni au système pour la phase d'apprentissage se présente sous la forme d'un signal de renforcement scalaire qui constitue une mesure de l'efficacité du système. Le système apprenant n'est pas informé des actions à entreprendre, mais doit découvrir quelles actions produisent les meilleurs résultats, en essayant chaque action tour à tour.

Une des dernières avancées en la matière est l'apprentissage profond (Deep Learning) (Lecun et al., 2015). Il se base sur des modèles de calcul composés de multiples couches qui représentent différents niveaux d'abstraction. L'apprentissage profond permet de découvrir une structure complexe dans de grands ensembles de données en utilisant l'algorithme de rétropropagation pour indiquer comment changer les paramètres internes de la machine afin de calculer la représentation de chaque couche à partir de la représentation dans la couche précédente. Ce type d'algorithme a fourni de grandes avancées ces dernières années dans de nombreux domaines, les réseaux convolutionnels ont par exemple généré des percées dans le traitement des images et de la vidéo, alors que les réseaux récurrents ont brillé sur des données telles que le texte et la parole.

Les principales méthodes d'apprentissage automatique en conception intégrée sont les réseaux de neurones, les arbres de décisions, les réseaux bayésiens et les machines à vecteurs de support.

Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont des modèles mathématiques inspirés par le biomimétisme. Un réseau de neurones est une structure de plusieurs couches de neurones artificiels reliées entre elles (Dreyfus et al., 2011). Un neurone est défini par des entrées, une fonction d'activation, et des sorties. Les fonctions d'activation peuvent être de différents types (fonction seuil, sigmoïde, etc.). Une connexion entre deux neurones représente un coefficient de pondération. Les coefficients sont estimés par des algorithmes apprenant, comme par exemple l'algorithme de rétropropagation. Différents types de réseaux de neurones existent, comme les réseaux Perceptron Multi-Couches (PMC) (Shahin, 2014), les réseaux convolutionnels, les cartes auto-organisatrices ou encore les réseaux récurrents (Ding et Matthews, 2009). Les réseaux de neurones sont capables d'apprendre des données, même bruitées et incomplètes. Ils peuvent gérer des comportements complexes, fortement non linéaires, avec de multiples variables. La principale limitation est l'aspect « boîte-noire » pour l'utilisateur, car il est difficile d'expliquer une décision venant d'un réseau de neurones.

Tasdemir et al. (2011) utilisent un réseau de neurones combiné à de la logique floue pour prédire la performance d'un moteur à essence. Roy et Pratihari (2013) utilisent cette même combinaison pour prédire la consommation d'énergie d'un robot. Cui et al. (2016) utilise les réseaux de neurones pour faciliter l'obtention de modèles de substitution pour la simulation. Ding et Matthews (2009) utilisent les réseaux de neurones pour l'automatisation de l'intégration CAO/FAO pour la fabrication de moules. Sunil et Pandle (2009) quant à eux combinent réseaux de neurones et des graphes de proximités pour la reconnaissance d'entités d'usinage. Wang et al. (2011) utilisent les réseaux de neurones pour l'automatisation de la planification des étapes de fabrication des pièces usinées. Martinez-Martinez et al. (2015) combinent réseau de neurones et algorithme génétique pour le diagnostic de machines agro-industrielles.

Les arbres de décisions

Les arbres de décision reposent sur un partitionnement hiérarchisé des données d'apprentissage, représentable par un arbre. Il existe un certain nombre de types d'arbres de décision (CHAID (Kass,

1980), C4.5 (Quinlan 1996), CART (Breiman, 2001)) ainsi que des évolutions, comme par exemple les forêts aléatoires (Breiman, 2001). A chaque itération, une variable de segmentation est déterminée par un indicateur de qualité. De nombreux types d'indicateur de qualité existent. Pour la méthode CHAID, on utilise par exemple la statistique χ^2 , ou sa variante normalisée (le t de Tschuprow). La variable optimisant cet indicateur est choisie pour partitionner l'ensemble d'apprentissage pour l'itération en cours. Cela génère une structure arborescente, composée d'une variable "racine", plusieurs niveaux de branches et enfin des feuilles, terminant l'arbre. Les arbres de décisions sont généralement utilisés pour réaliser des classifications (Rakotomalala, 2005). Les arbres de décisions sont non-paramétriques (sans aucune hypothèse sur la distribution des données), robustes par rapport aux données aberrantes, capables de traiter tout type de données, et sont non-linéaires. De plus, ils sont facilement interprétables et lisibles. Les difficultés d'apprentissage peuvent être levées par des méthodes correctives, ou par l'utilisation de forêts aléatoires (Hastie et al., 2009). Bubenik et Horak (2014) par exemple, utilisent les arbres de décision pour la planification de la production. Sakthivel et al. (2010) les utilisent pour le diagnostic de défauts de pompes centrifuges monoblocs.

Les réseaux bayésiens

Un réseau bayésien est représenté par un graphe acyclique orienté (Naïm et al. 2011). Ce graphe est composé d'un ensemble de variables (liées à une loi de probabilité) et un ensemble d'arcs, représentant la dépendance entre les variables. L'ensemble des arcs orientés constitue la structure du réseau bayésien. L'ensemble des lois de probabilités conditionnelles, défini à partir de la structure, est appelé ensemble des paramètres du réseau bayésien. La construction d'un réseau bayésien se fait en deux étapes. Premièrement la structure (le graphe) est déterminée, soit par l'expression de connaissances expertes a priori (telle relation est interdite, ou obligatoire), soit par l'apprentissage statistique à partir de données expérimentales. Dans ce cas, de nombreux algorithmes existent pour définir la structure, principalement basés sur des tests d'indépendance statistique ou des scores (Liu et al. 2017). Ces deux approches peuvent être appliquées conjointement. Deuxièmement, les distributions de probabilités sont déterminées en fonction de la structure. Comme pour la structure, ces distributions peuvent soit se baser sur de la connaissance experte, soit se calculer à partir de méthodes statistiques (comme par exemple l'estimateur du maximum de vraisemblance). Les réseaux bayésiens peuvent facilement représenter de la connaissance incertaine grâce aux distributions de probabilités. Ils combinent aisément connaissances expertes et apprentissage sur les données.

Dans le domaine de la mécanique, Hanafy et ElMaraghy (2014) utilisent les réseaux bayésiens pour améliorer l'affectation des machines pour la production de nouvelles pièces. Correa et al. (2009) comparent les résultats des réseaux bayésiens et des réseaux de neurones pour la prédiction de la qualité de surface de pièces usinées par usinage à grande vitesse. McNaught et Chan (2011) propose un réseau bayésien pour l'aide au diagnostic lors de phases de test en production sur des téléphones portables. Jones et al. (2010) utilisent ces mêmes réseaux pour définir les plannings de maintenance.

Les machines à vecteurs de support

Les machines à vecteurs de support (Support Vector Machine : SVM) sont des algorithmes d'apprentissage supervisés qui ont été conçus à l'origine pour de la classification de tâches (Boser et al., 1992). Le SVM vise à résoudre de manière optimale les classifications de tâches non-linéaires, en utilisant deux techniques pour atteindre ce but : la séparation de marges maximales et les fonctions noyaux (Kernel Functions). Sous sa forme la plus simple, le SVM linéaire construit un hyperplan ou une série d'hyperplans dans un espace à haute dimension. Le SVM linéaire peut être considéré comme un perceptron mais l'améliore en réalisant une classification optimale. Une classification binaire est réalisée

en trouvant deux hyperplans. Ils séparent les données pour que la distance entre eux soit maximisée. La région formée par ces deux hyperplans est appelée la marge. L'intérêt de cette approche est qu'en général, plus la marge est grande, plus l'erreur de généralisation du classifieur est petite. Le SVM a par exemple été utilisé dans le diagnostic d'erreurs et le contrôle de processus industriels complexes (Yin et Hou, 2016). Sugumaran et Ramachandran (2011) les utilisent pour le diagnostic de défauts de roulements à billes.

Il est communément admis que la cognition humaine intègre avec succès les paradigmes connexionnistes et symboliques de l'intelligence artificielle. Pourtant, ces deux branches de l'intelligence artificielle sont développées séparément dans les domaines du calcul statistique et de la logique symbolique. Nous voyons cependant depuis quelques années un mouvement vers une hybridation des systèmes de raisonnement pour intégrer les avantages des différentes méthodes utilisées. (Sahin et al., 2012) dressent une vue d'ensemble des productions scientifiques publiées dans 70 journaux et 16 conférences entre les années 1988 et 2010. Toutes ces productions scientifiques proposent des démarches hybrides, mêlant les systèmes à base de règles, les réseaux de neurones ou les arbres de décisions. Trois approches principales ont été identifiées, parmi les 45 systèmes hybrides relevés.

1. Les systèmes à base de règles, intégrant un réseau de neurones. Par exemple, un tel système a été proposé pour la création automatique de modèles par éléments finis pour des fuselages d'avions (Li, 2003).
2. Les réseaux de neurones flous. Ces systèmes combinent des règles floues et un réseau de neurones, comme par exemple ANFIS (adaptive-network-based fuzzy inference system) (Roy et Pratihari, 2013).
3. Les réseaux de neurones approximatifs, basé sur la théorie des ensembles approximatifs (Pawlak et Sowinski, 1994).

Les systèmes hybrides ont ainsi différentes propriétés, dépendant des propriétés initiales des méthodes intégrées.

4.1.1. SYNTHÈSE SUR L'EXPLOITATION DES EXPERTISES MÉTIERS

Pour permettre de compléter notre analyse, une synthèse de la recherche bibliographique (TABLEAU 7) a été menée et les références classées selon deux axes :

- Le type de système à base de connaissances : systèmes à base de règles, systèmes de retour d'expériences et apprentissage automatique (réseaux de neurones, arbres de décision, réseaux bayésien et VSM).
- Le cycle de vie du produit : (analyse du besoin, conception préliminaire et conception détaillée), (industrialisation, fabrication et assemblage), (logistique, utilisation et fin de vie).

TABLEAU 7 : SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DES MOTEURS D'INFÉRENCE UTILISÉS EN CONCEPTION INTÉGRÉE

	Systèmes à base de règles	Systèmes de retour d'expériences	Apprentissage automatique			
			Réseau de neurones	Arbre de décision	Réseau bayésien	VSM
Analyse du besoin, conception préliminaire et	Subba Rao et Pratihari (2007) Urrea et al. (2015)	Khan et al. (2014)	Tasdemir et al. (2011) Roy et Pratihari (2013)			

conception détaillée			Cui et al. (2016)			
Industrialisation, fabrication et assemblage	Naranje et Kumar (2014) Torres-Treviño et al. (2013)	Hashemi et al. (2014) Cao et al. (2013)	Ding et Matthews (2009) Sunil et Pandle (2009) Wang et al. (2011)	Bubenik et Horak (2014)	Hanafy et ElMaraghy (2014) Correa et al. (2009) McNaught et Chan (2011)	Yin et Hou, 2016
Logistique, utilisation et fin de vie			Martinez-Martinez et al. (2015)	Sakthivel et al. (2010)	Jones et al. (2010)	Sugumaran et Ramachandran (2011)

Les conclusions que nous pouvons tirer de cette analyse est que :

- Les techniques d'apprentissage automatique sont de plus en plus utilisées en conception mécanique. La révolution numérique engendrant l'accès à de multiples données, la montée de la puissance de calcul et les récentes avancées des algorithmes d'apprentissage automatique sont aucun doute la combinaison qui a permis cet essor.
- Les systèmes hybrides font de plus en plus appel aux logiques floues pour compléter les raisonnements classiques afin de mieux prendre en compte les incertitudes. Mais les raisonnements hybrides symbolique/connexionniste sont encore très rares.
- On notera que parmi les méthodes d'apprentissage automatique, les réseaux de neurones sont les plus utilisés. Les arbres de décision, les machines à vecteurs de support et les réseaux bayésiens sont peu utilisés en conception mécanique et cantonnés à des utilisations dans les domaines de la production et de la maintenance.
- Concernant la couverture du cycle de vie du produit, on note une forte disparité. Les phases très amonts (analyse du besoin, conception préliminaire) et les phases très aval (fin de vie) sont moins représentées que les phases centrales (conception détaillée, industrialisation, fabrication/assemblage, distribution, utilisation/maintenance).

L'analyse que l'on peut faire de ce dernier constat est que pour l'instant les systèmes de raisonnement se basent uniquement sur des données issues de la phase du cycle de vie où se pose le problème à résoudre. La possibilité d'utiliser les données d'autres phases du cycle de vie du produit pour répondre à des problèmes situés ailleurs est encore peu exploitée. Par exemple, utiliser les données sur l'utilisation pour fournir de l'aide à la décision lors de la phase de conception préliminaire. Cela nécessite alors la traduction sémantique des informations d'une phase vers une autre, au moyen de techniques vues dans le chapitre précédent afin d'être en mesure d'exploiter les informations venant d'une phase X du cycle de vie du produit dans une phase Y.

4.3. APPORTS ET RESULTATS OBTENUS

Dans le cadre de l'exploitation d'expertises métiers pour la conception intégrée, j'ai participé à plusieurs travaux, en intervenant directement dans des projets de recherche et en encadrant des post-doctorats, des thèses et des masters.

Comme expliqué précédemment, les différents types de moteurs d'inférence utilisés dans le cadre de la conception intégrée peuvent se baser sur des raisonnements symboliques ou connexionnistes. Je vais décrire dans le paragraphe suivant mes travaux sur trois types de moteur d'inférence couvrant les deux types de raisonnements : les systèmes à base de règles et les systèmes de retour d'expériences et les réseaux bayésiens.

4.3.1. SYSTEME A BASE DE REGLES POUR LA CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE

La première approche consistant à proposer un système d'aide à la décision à base de règles fut développée dans le cadre des travaux de thèse de Chen Zheng sur les aspects conception mécanique. Nous avons déjà proposé un modèle de données pour gérer dans le détail les données relatives aux interfaces entre composants avec les différents points de vue venant de différents domaines (3.2.2). Ce modèle de données est intégré à un processus d'ingénierie système pour permettre son instantiation au fur et à mesure du déroulement du processus de développement (FIGURE 28).

Le système expert à base de règles que nous avons proposé ici se base sur les données décrivant les interfaces et vient aider les concepteurs à s'assurer de la cohérence de ces différentes interfaces et de l'intégration future des sous-systèmes, et ce, tout au long du cycle en V, selon la précision des informations disponibles à chaque étape.

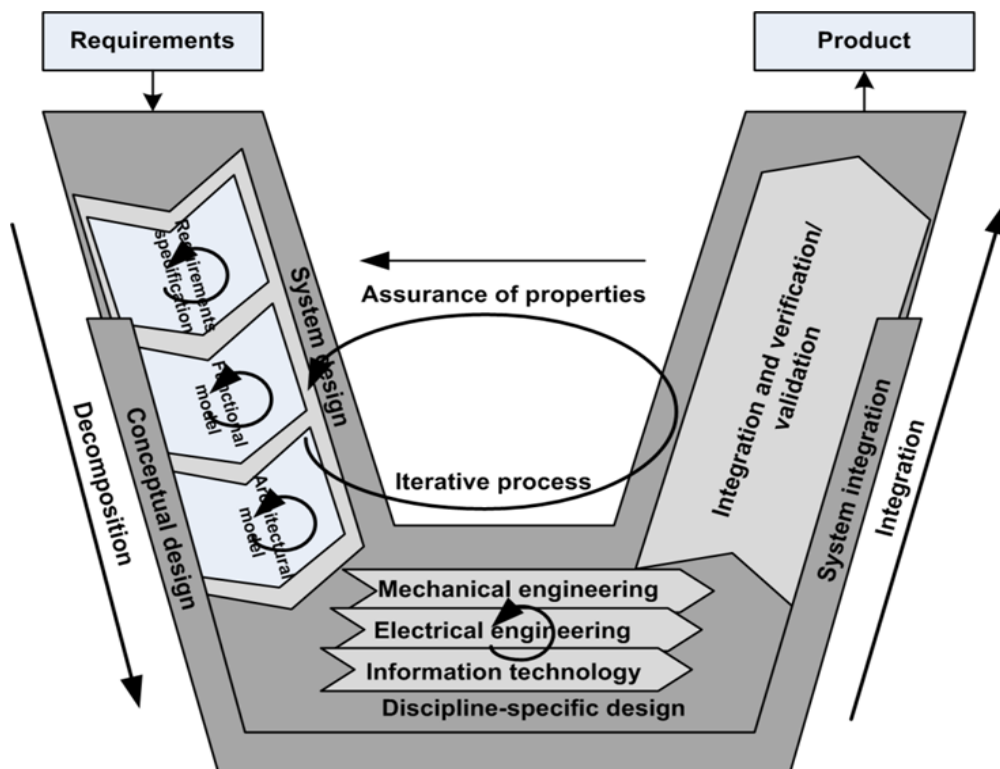


FIGURE 28 : PROCESSUS DE CONCEPTION : UNE EXTENSION DU CYCLE EN V

Les règles appliquées à chaque interface viennent vérifier la compatibilité de chaque sous-système en interaction. Ces règles viennent par exemple vérifier que deux paramètres géométriques sont bien compatibles dans le cas d'une connexion physique entre deux sous-systèmes (en tenant compte des tolérances) (FIGURE 29). Des règles similaires ont également été écrites pour les autres types d'interfaces (de contrôle, d'énergie ou de données) définies dans MIM.

FIGURE 29: EXEMPLE DE REGLES ECRITES EN OBJECT CONSTRAINT LANGUAGE (OCL)¹⁵

```
CP1. Parameter1. value < CP2. Parameters2. maxValue
CP1. Parameter1. value > CP2. Parameters2. minValue
CP1. Parameter1. unit = CP2. Parameters2. unit
```

En fonction des résultats, plusieurs solutions sont proposées :

- Si le test de compatibilité est TRUE, pas d'action spécifique (et le processus de conception peut suivre son cours).
- Si le test de compatibilité est FALSE, alors trois solutions sont possibles :
 1. Changer l'un des deux composants constituant l'interface.
 2. Décomposer l'interface en interface-composant-interface (rajouter un élément de liaison).
 3. Passer à l'étape suivante de la conception, tout en sachant qu'à un moment ou un autre, il faudra rendre cette interface compatible par l'une des deux solutions précédentes.

Ces règles sont ensuite transcrites en langage sémantique pour être intégrées au niveau de l'ontologie MIM (FIGURE 30).

FIGURE 30: EXEMPLE DE REGLES ECRITES EN SEMANTIC WEB RULE LANGUAGE (SWRL)¹⁶

```
componentPort(?CP1), componentPort(?CP2), hasValue(?CP1) <
hasMaxValue(?CP2), hasValue(?CP1) > hasMaxValue(?CP2), hasUnit(?CP1) =
hasUnit(?CP2) -> isCompatible(?CP1,?CP2,True)

isCompatible(?CP1,?CP2,False) -> AddComponent(?P1,?P2) OR
changeComponent(?P1) OR changeComponent(?P2)
```

Ce système expert fut implémenté sous CATIA V6 en utilisant les modules RFLP et Knowledgeware workbench (FIGURE 31). Il fut testé lors de la conception d'un système optomécatronique de mesure 3D élaboré au laboratoire Roberval.

¹⁵ <http://www.omg.org/spec/OCL/>

¹⁶ <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>

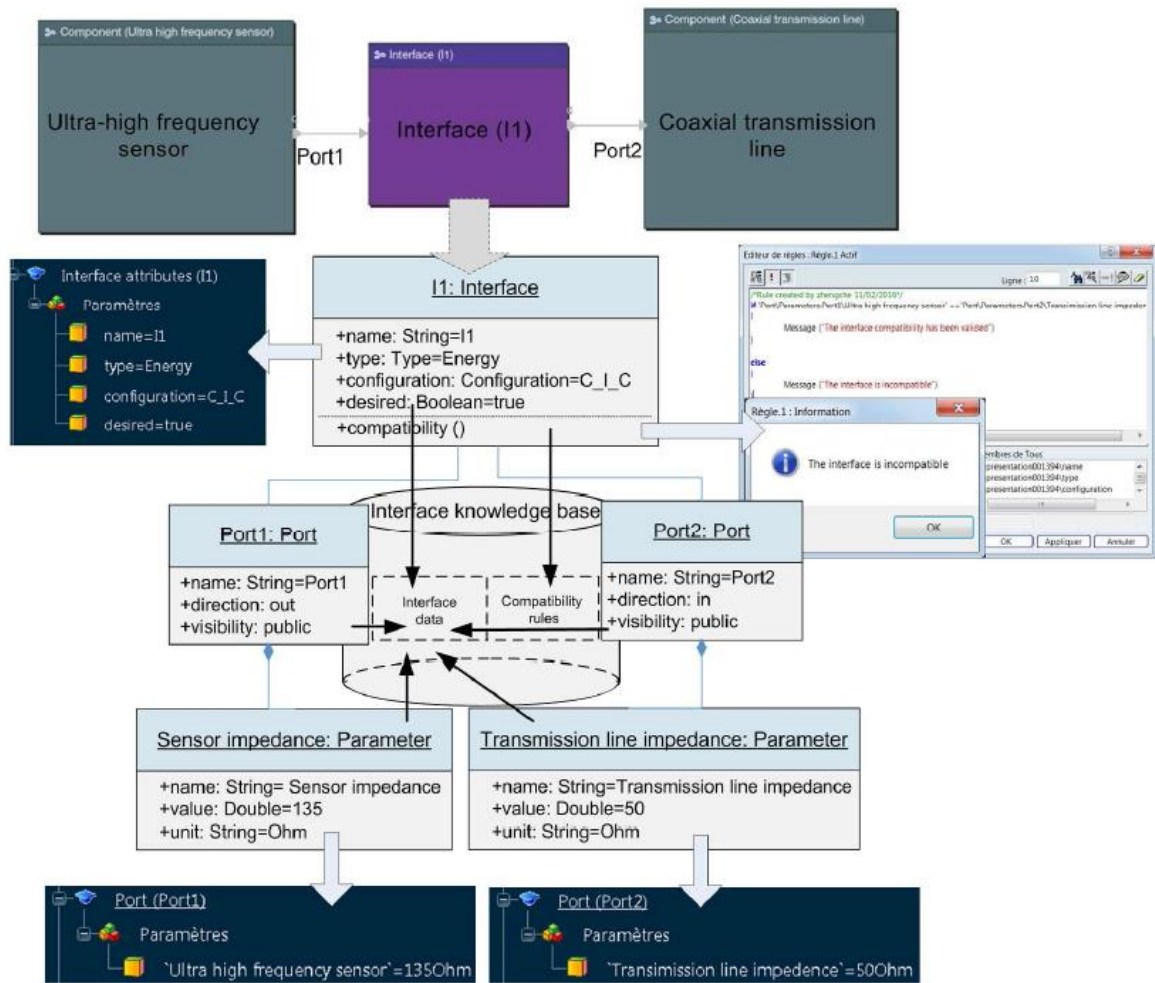


FIGURE 31: INSTANCIATION D'UNE INTERFACE MULTIDISCIPLINAIRE DANS LA BASE DE CONNAISSANCES

Ce système à base de règles a permis de proposer de nouvelles solutions de conception qui ont aboutis à des systèmes plus intégrés en résolvant des incompatibilités d'interfaces au plus tôt dans le processus de développement.

4.3.2. SYSTÈME DE RETOUR D'EXPERIENCES POUR L'INDUSTRIALISATION DE PIÈCES AERONAUTIQUES

Notre deuxième proposition est un système expert basé sur un raisonnement à base de cas. Il fut développé dans le cadre des travaux de thèse de Christophe Danjou et du projet FUI Angel. Il s'agit d'un système de retour d'expériences qui propose une approche cartésienne du problème, le décomposant jusqu'au niveau atomique correspondant aux entités d'usinage. L'ensemble des informations afférentes à ces entités d'usinage sont stockées dans la base de données supportée par l'ontologie OntoSTEP-NC décrite en 3.2.3. Elle contient la géométrie et les tolérances des entités, les matériaux, les paramètres de coupes (vitesse d'avance, vitesse de broche, taux de recouvrement ...) des cas précédemment validés.

Le système expert procède en trois étapes (FIGURE 32):

1. Tout d'abord l'extraction des données. Issues des Code-G, ces données correspondent à des programmes validés car elles sont passés sur les MOCN et ont permis l'obtention de pièces conformes. Ces données sont stockées dans OntoSTEP-NC.
2. La deuxième étape est la phase de validation. Comme tout système intelligent, notre système doit être capable de savoir sur quelle information pertinente s'appuyer pour améliorer ses modèles. Dans notre cas, l'expert valide ou non la nouvelle donnée entrée si les paramètres de coupe sont différents de ceux déjà présents dans la base (à entité d'usinage, matériaux et machine équivalente). Des indicateurs de performances comme la durée de l'opération ou des impacts environnementaux permettent d'aider l'expert à valider ou non une pratique.
3. La troisième étape permet la réutilisation des informations stockées. Directement depuis son environnement de travail (le logiciel FAO), l'utilisateur peut interroger la base à tout moment. Il envoie alors un minimum d'information manuellement pour remplir la requête, les autres données étant récupérées directement de l'environnement logiciel. La base renvoie les cas les plus similaires, la règle de similitude s'appuyant par ordre croissant de poids sur les matériaux, le type de machine-outil, le type d'entité d'usinage puis les dimensions de celle-ci et enfin les outils coupants utilisés. L'utilisateur est alors à même de procéder ou non à l'intégration des informations fournies pour l'obtention de sa nouvelle pièce. L'information fournie peut correspondre parfaitement ou imparfaitement. Dans tous les cas, l'utilisateur procède à la modification et/ou à la validation de la proposition sélectionnée.

Enfin le programme est constitué et est chargé sur une MOCN pour obtenir la pièce. Il rentre alors dans un nouveau cycle d'intégration.

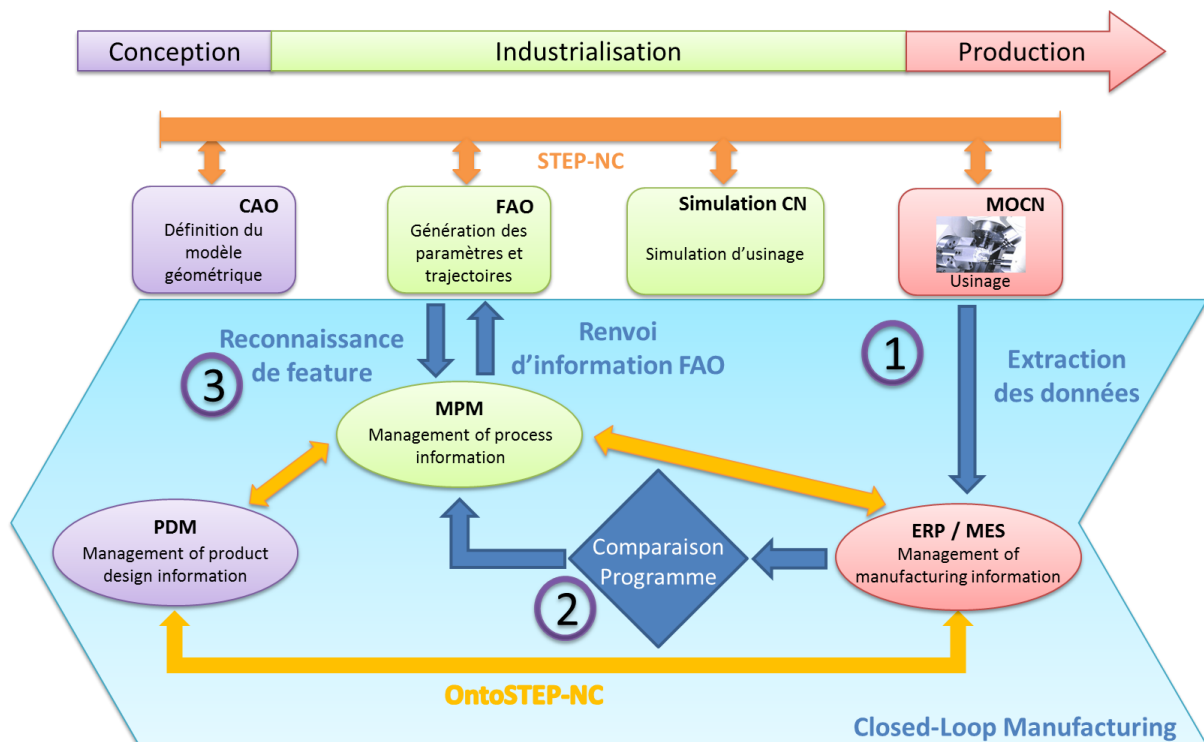


FIGURE 32: CLOSED-LOOP MANUFACTURING

Le système proposé fut testé sur plusieurs pièces aéronautiques. Il est implémenté sur CATIA V5 (FIGURE 33) pour la partie FAO, VB pour l'intégration et les interfaces, Virtuoso pour la base XML.

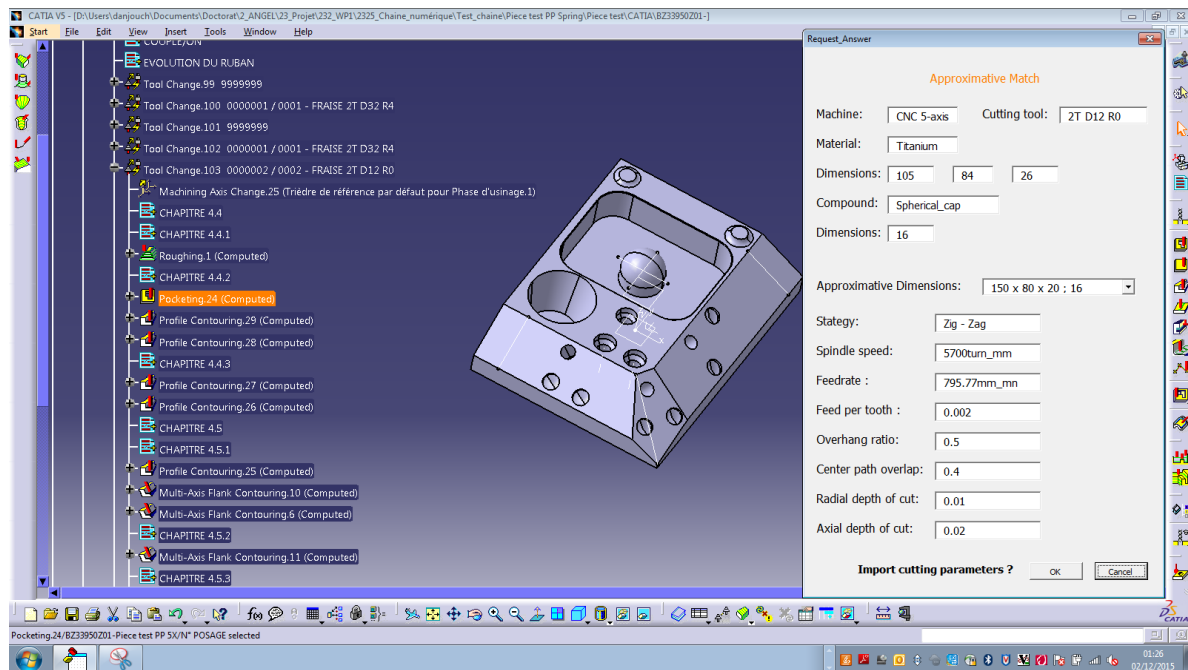


FIGURE 33: IHM DU SYSTEME DE RETOUR D'EXPERIENCES DANS CATIA V5

Ce système de retour d'expériences c'est montré très prometteur et à donner lieu à un nouveau projet collaboratif (FUI 21 LUCID) qui vise à améliorer l'aide aux choix fournie. Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de la thèse d'Emeric Ostermeyer soutiennent ces travaux.

Les systèmes experts à base de règles sont assez fréquents dans ce domaine, mais ils sont basés sur des raisonnements symboliques et connaissent donc les limitations dues à ce type de raisonnement (difficultés de mise à jour d'un grand nombre de règles). Les raisonnements connexionnistes sont quant à eux beaucoup plus rares et presque entièrement dévolus dans ce domaine à la détection de défauts, le diagnostic et la maintenance (McNaught et Chan, 2011) (Yin et Hou, 2016). Notre proposition vise à compléter l'aide à décision fournie grâce au système de retour d'expériences en venant compléter cette approche symbolique par une approche connexionniste basée sur des méthodes d'apprentissage automatique. Nous proposons donc ici d'utiliser une méthode d'apprentissage automatique pour aider aux choix de stratégie d'usinage. Un travail de prétraitement des données est nécessaire pour pouvoir créer une association entre la géométrie et la stratégie d'usinage. Tout d'abord une première étape de reconnaissance d'entité est nécessaire, car basé sur des fichiers APT et code-G qui ne contiennent pas explicitement cette information. Puis une phase d'extraction des trajectoires et enfin la liaison des trajectoires et des entités. Une méthode de classification, ici Support Vector Machine, est utilisée pour découvrir quels paramètres de l'entité d'usinage ont conduit à l'utilisation de telle stratégie. Ces connaissances peuvent ensuite être intégrées au système de retour d'expériences précédemment défini et enrichi avec de nouvelles PMI (Product and Manufacturing Information) comme les matériaux ou les paramètres de coupe.

Nous allons ainsi pouvoir vérifier des règles existantes, définir de nouvelles règles qui étaient auparavant implicites, auxquelles on aboutissait auparavant par un jeu d'essais-erreurs, ou même créer de nouvelles règles métiers uniquement basées sur l'observation des données.

4.3.3. APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE EN CONFIGURATION DE PLAN D'EXPERIENCE NUMERIQUE

L'utilisation des plan d'expériences numérique (PEN) est de plus en plus répandue dans l'industrie, à mesure que les coûts de calcul diminuent (avènement du cloud, démocratisation de l'HPC...). Néanmoins, la définition d'un processus de PEN est caractérisée par de nombreux choix et l'utilisation de méthodes complexes, nécessitant une expertise avancée. Ce paramétrage du PEN est d'autant plus critique que le modèle de simulation est complexe et coûteux à exécuter. L'obtention rapide de la configuration optimale du processus de PEN devient un enjeu de compétitivité majeur. Ainsi, le gain de temps se place à la fois durant la préparation de la démarche et durant son exécution.

Cette troisième approche illustre une méthode d'apprentissage automatique utilisée dans un contexte de simulation numérique. Nous proposons un système à base de connaissances basé sur un réseau bayésien pour fournir une prédiction de performance de la configuration d'un PEN ou pour compléter une configuration afin d'obtenir une performance cible. Ces travaux furent conduits dans le cadre des travaux de thèse de Gaëtan Blondet et du projet FUI SDM4DOE.

Ce système à base de connaissances est constitué (FIGURE 34) :

- D'un moteur d'inférence basé sur des réseaux bayésiens utilisant à la fois des données statistiques issues des PEN passés et des expertises métiers a priori.
- De l'ontologie ODE (chapitre 3.2.4).
- D'une IHM afin de recueillir la définition de configuration de PEN de l'utilisateur et de lui fournir les réponses souhaitées.
- D'une connexion aux processus de développement de produit pour permettre la mise en œuvre du PEN et de son exécution.

Son processus de fonctionnement suit quatre étapes :

1. L'utilisateur demande la prédiction de la performance (temps d'exécution, précision du modèle...) d'une configuration PEN proposée. Il peut également demander une configuration (complète ou partielle s'il impose certains paramètres) visant à s'assurer une performance donnée.
2. Le système crée un réseau bayésien (ou en récupère un existant s'il correspond au besoin) en se basant sur les données de la base et les connaissances expertes.
3. Le réseau bayésien prédit la performance de la configuration demandée, d'autres configurations, et propose des améliorations pour obtenir telle ou telle performance...
4. Une fois le PEN configuré, il est exécuté. Sa configuration et ses performances (temps d'exécution réel, précision réelle du modèle de substitution...) sont enregistrées dans la base et serviront à l'apprentissage du prochain réseau.

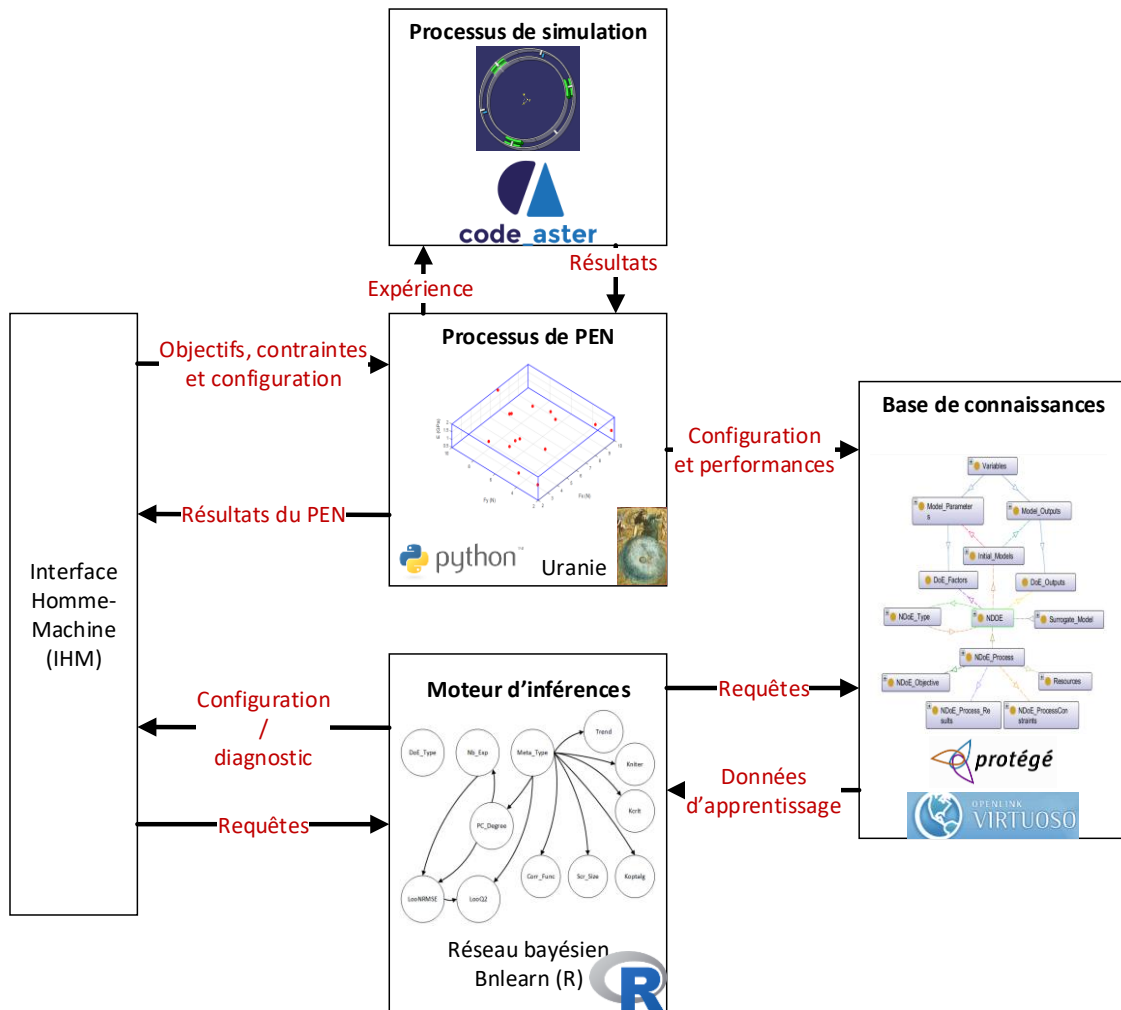


FIGURE 34: ARCHITECTURE GLOBALE DU SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES

Nous allons maintenant détailler les étapes de création du réseau bayésien. Bien que spécifiques à cette méthode, elles sont représentatives des étapes nécessaires pour mettre en place un moteur d'inférence utilisant une méthode d'apprentissage automatique.

Pour créer un réseau bayésien, trois étapes sont nécessaires : la définition des variables, l'estimation de la structure et de la distribution et la validation du réseau.

1. La sélection et la définition des variables du réseau.

Les variables correspondent aux éléments de configuration du processus PEN ou de sa performance. Une variable est définie par sa nature discrète (quantitative ou qualitative) ou continue. Elles correspondent au besoin de l'utilisateur. L'objectif est ici de minimiser le nombre de variables pour garder le réseau le plus simple possible. Une approche utilisée ici pour simplifier les réseaux bayésiens est la stratégie "multi-net" (Naïm et al., 2011). Le réseau complet est découpé avec l'externalisation de certaines variables, dans notre cas la variable discrète qualitative « objectif du PEN » qui nous permet d'obtenir des sous-réseaux indépendants de tailles plus modestes.

2. L'estimation de la structure et des distributions de probabilités par apprentissage et/ou par expertises a priori.

La seconde étape est la détermination de la structure et des distributions de probabilités. La structure est la série de liens entre chaque nœud (les variables) du réseau (FIGURE 35). Ces liens sont dirigés d'un nœud vers l'autre, et ils ne doivent pas créer de cycle dans le réseau (un réseau bayésien est un graphe dirigé acyclique). Ils représentent les relations de causalité entre les nœuds.

La structure est déterminée par des connaissances expertes et complétée par un algorithme d'apprentissage. L'insertion de connaissances expertes permet de définir les relations interdites (entre deux variables indépendantes) ou évidentes. L'algorithme d'apprentissage est ensuite utilisé pour compléter la structure en se basant sur les données existantes. Il existe de nombreux algorithmes comme ceux se basant sur des tests d'indépendance statistiques (Spirtes et al., 1993; Pearl, 2000), ou sur la minimisation d'un score (Akaike, 1970; Schwarz, 1978), ou encore, plus récemment des algorithmes hybrides (Scutari, 2010; Madsen et al., 2015). Nous en avons testé plusieurs, l'exemple donné ci-après utilisait l'algorithme Hill-Climbing utilisé sur une base de 1360 configurations de PEN adaptatifs.

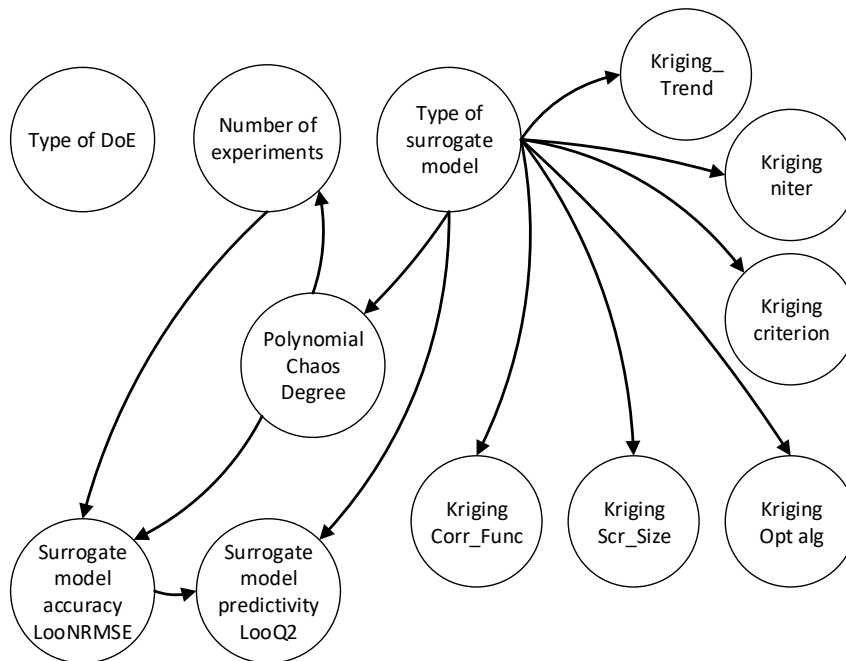


FIGURE 35: EXEMPLE DE STRUCTURE DE RESEAU BAYESIEN

Les distributions de probabilités peuvent également être estimées par des connaissances expertes, en modélisant la distribution réelle par une distribution commune (normale ou uniforme), ou en paramétrant manuellement la probabilité de chaque événement. Les distributions manquantes sont ensuite estimées à partir du jeu de données d'apprentissage par des méthodes comme le maximum de vraisemblance ou le maximum a posteriori. C'est ce dernier que nous avons utilisé car il combine une approche fréquentiste avec une distribution de probabilité définie à priori. Si peu de données d'apprentissage sont disponibles, la probabilité de distribution (définie par un expert ou par une loi uniforme) devient plus significative que les données. Ainsi le système est peu sensible aux données manquantes et aux situations nouvelles.

3. La validation du réseau bayésien et le contrôle de la confiance de ses prédictions.

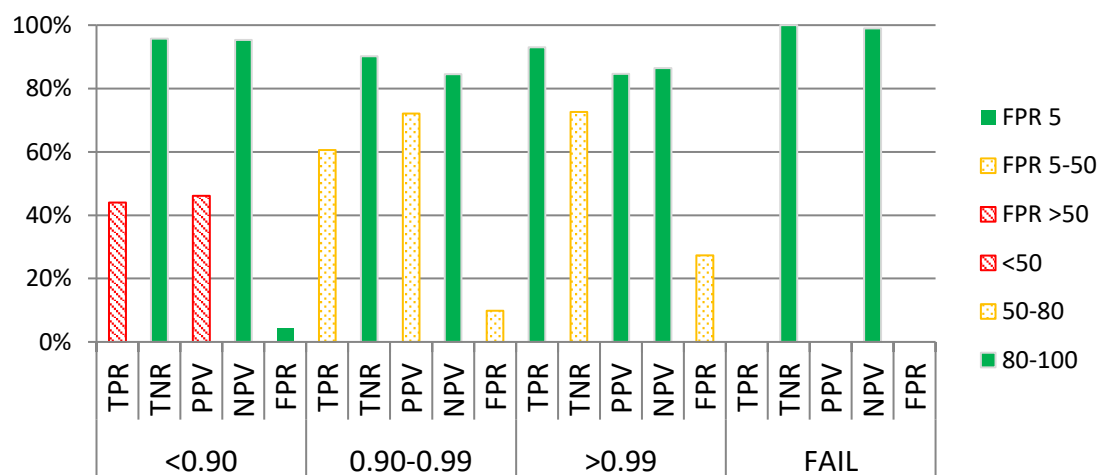
La validation d'un réseau bayésien consiste à faire une validation croisée pour évaluer sa capacité à faire de bonnes prédictions. Le jeu de données est généralement coupé en deux, 80/20. La première partie

(les 80% du jeux de données) est utilisée pour la phase d'apprentissage, la seconde sert à valider l'étape d'apprentissage. Une matrice de confusion (TABLEAU 8) est alors calculée ainsi qu'une série d'indicateurs (détailés dans (Powers, 2011)), comme la « precision » (Predicted Positive Value, PPV), la « sensitivity » (True Positive Rate, TPR), le « fall-out » (False Positive Rate, FPR), le « negative predicted value » (NPV) et la « specificity » (True Negative Rate, TNR) du réseau bayésien pour cette variable en particulier (FIGURE 36).

Ces indicateurs sont fournis à l'utilisateur pour qu'il puisse juger de la pertinence de suivre les recommandations du réseau bayésien.

TABLEAU 8 : MATRICE DE CONFUSION

Prédicativité Q ² du modèle de substitution		Prédit par le réseaux bayésien			
	Evènements	<0.90	0.90-0.99	>0.99	FAIL
Observé dans le jeu de données de validation	<0.90	59	45	30	0
	0.90-0.99	55	313	149	0
	>0.99	0	76	1005	0
	FAIL	14	0	4	0

FIGURE 36: NIVEAU DES INDICATEURS DE PERFORMANCES DU RESEAU BAYESIEN POUR Q²

Ce système à base de connaissance fut instancié avec 2000 configurations de PEN, testé sur un cas industriel issu de l'industrie automobile et est en cours de déploiement dans le service simulation numérique de cette entreprise. Il a déjà permis l'expansion de l'utilisation de techniques de PEN plus avancées dans cette entreprise, notamment celle de plan d'expériences adaptatif.

4.5. CONTRIBUTIONS ET OUVERTURES

Mes travaux de recherche sur cet axe s'inscrivent dans le cadre de la recherche en conception intégrée et PLM pour améliorer l'exploitation des expertises métiers. Ils s'appuient notamment sur des systèmes à base de connaissances, faisant appel à des raisonnements connexionnistes et symboliques, supportés par des moteurs d'inférence de type système à base de règles, système de retour d'expériences ou apprentissage automatique.

Le premier apport est un système à base de règles pour faciliter le processus d'ingénierie système. Ces règles sont basées sur la compatibilité des interfaces des sous-systèmes. Il permet ainsi de s'assurer de l'intégration future du système en procédant à la vérification de cette compatibilité au plus tôt et ceux malgré les différentes disciplines impliquées.

Le deuxième système est un système de retour d'expériences basé sur les entités d'usinage pour l'aide à l'industrialisation de pièces usinées, et en particulier la définition des trajectoires et des paramètres de coupe. Il se base sur une base de connaissance unique qui vise à recueillir les bonnes pratiques de l'entreprise pour fournir de l'aide à la décision lorsqu'un cas similaire se présente au sein de cette même entreprise.

Enfin le troisième apport utilise un système d'apprentissage automatique pour fournir des prédictions de performance d'un processus de simulations par plan d'expériences numériques en se basant sur les données recueillies. Il combine intégration d'expertises métiers et apprentissage au sein d'un réseau bayésien, permettant ainsi l'aide au paramétrage et à la configuration des PEN et la prédiction des performances de ceux-ci.

Ainsi nous avons proposé trois types de systèmes à base de connaissances pour l'amélioration de l'exploitation des expertises métiers au sein du développement de systèmes mécaniques (FIGURE 37).

Ces propositions apportent :

- L'utilisation de deux types de raisonnements (symbolique et connexionniste) nécessaires à l'activité cognitive de conception.
- Une utilisation renforcée des connaissances, et l'utilisation de données non exploitées jusqu'à présent.
- Une meilleure utilisation des expertises métiers relatives aux processus de développement de produit, aux statistiques, à l'industrialisation, à l'ingénierie système.
- Une mise en commun des connaissances au niveau de l'entreprise (voir de l'entreprise étendue) favorisant ainsi le partage et la diffusion des bonnes pratiques.
- Un support pour la réutilisation et la création de connaissances relatives aux processus de développement de produit.

Elles ont été implémentées dans des logiciels commerciaux ou libres (CATIA V6 RFLP, CATIA V5 FAO, Code_Aster, URANIE) et des bases de connaissances (Protégé et Virtuoso). Les requêtes ont été effectuées en SPARQL, les réseaux bayésiens sous R, les règles en SWRL. Des interfaces VB et des scripts Python ont complété l'implémentation. Elles ont été validées sur des cas d'études industriels, venant principalement de l'industrie automobile et aéronautique.

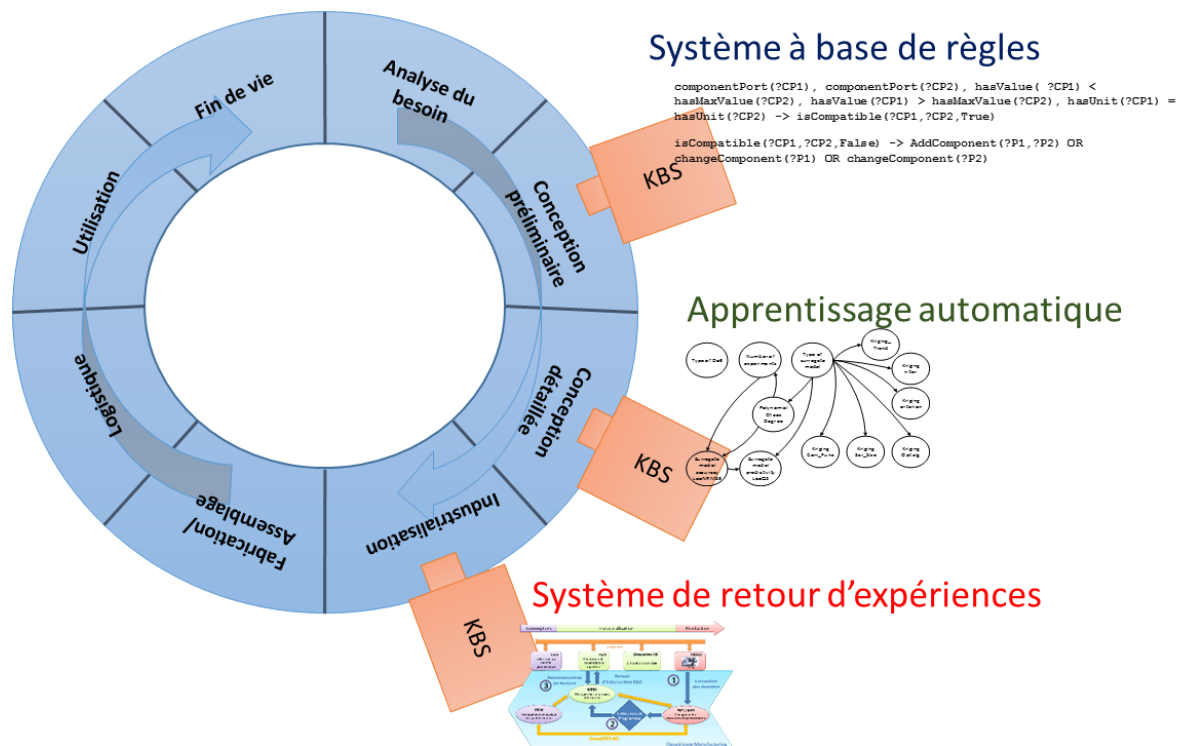


FIGURE 37: MOTEURS D'INFERENCE

Nous ne prenons pas en compte l'extraction des connaissances implicites des experts dans ces travaux. Ces méthodes d'interviews et de recueils, classiquement utilisées dans les méthodes de gestion de la connaissance, utilisent un ingénieur de la connaissance qui extrait et traite ces connaissances pour les rendre exploitables. Nous nous intéressons à un autre type de connaissances implicites, celles contenues dans les données massives issues du produit ou de ses processus supports et qui vont pouvoir être extraites de façon automatique (ou semi-automatique) par les algorithmes d'apprentissage automatique, favorisant ainsi le facteur de sérendipité pour découvrir de nouvelles connaissances.

Nous proposons différentes approches de raisonnements pour l'aide à la décision en conception mécanique. Nous pensons que l'hybridation des types raisonnements est une voie prometteuse dans un contexte aussi complexe que la conception mécanique, imitant ainsi le modèle cognitif du concepteur alternant inférence inductive et déductive.

Au total, le rayonnement scientifique de cette axe de recherche a donné lieu à :

- 12 articles en revues indexées WoS ou Scopus [A4] [A6] [A7] [A8] [A11] [A12] [A13] [A14] [A15] [A18] [A19] [A21]
- 2 articles en revues à comité de lecture non indexées WoS ou Scopus [B2] [B3]
- 1 chapitre publié dans un ouvrage de synthèse [C1]
- 22 communications à des congrès internationaux à comité de sélection et actes publiés [D13] [D14] [D15] [D16] [D17] [D21] [D23] [D28] [D29] [D31] [D32] [D33] [D35] [D36] [D37] [D38] [D39] [D41] [D42] [D43] [D44] [D49]
- 7 communications à des congrès nationaux à comité de sélection [E6] [E7] [E13] [E14] [E15] [E16] [E18]
- 7 rapports de projet [H1] [H2] [H3] [H6] [H8] [H9] [H10]

5. PERSPECTIVES : VERS UNE AIDE A LA DECISION DYNAMIQUE EN CONCEPTION MECANIQUE

Les travaux synthétisés dans les chapitres précédents s'inscrivent dans un objectif d'aide à la décision pour la conception mécanique à l'aide de systèmes à base de connaissances. Ils visent à intégrer les expertises métiers en capitalisant et structurant les données, informations et connaissances produit au travers d'approches ontologiques. Ils exploitent ensuite ces expertises métiers au travers de systèmes à bases de connaissances utilisant des moteurs d'inférence raisonnant sur ces données, informations et connaissances au travers de systèmes à base de règles, des systèmes de retour d'expériences et des systèmes d'apprentissage automatique.

Les perspectives développées dans ce chapitre se situent à la fois dans le prolongement des deux axes de recherches développés jusqu'à présent et dans l'élargissement à une proposition englobante qui vise à fournir un cadre pour mes recherches dans les années à venir sur ce domaine : l'aide à la décision dynamique pour la conception de systèmes mécaniques (FIGURE 38).

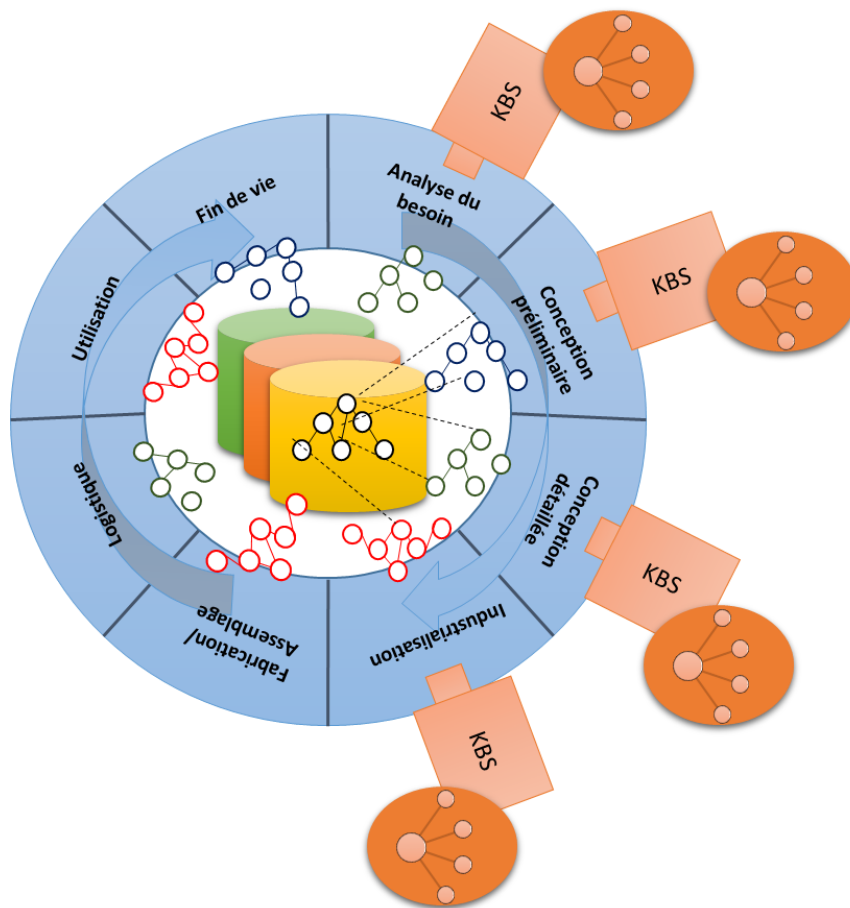


FIGURE 38: AIDE A LA DECISION DYNAMIQUE EN CONCEPTION MECANIQUE

Nous nous situons dans le contexte de "rationalité limitée" tel que défini par Simon qui stipule que la rationalité individuelle est limitée en terme de capacité cognitive et d'information disponible (Simon, 1957). Ce concept permet de mieux comprendre le comportement de choix dans le monde réel puisque la réflexion de l'acteur est limitée par son environnement qui conditionne sa décision. En situation de rationalité limitée, il écrit : "Il est souvent judicieux de recourir à des procédures instituées, à des

connaissances disponibles et à un équipement donné, en se limitant à une solution qui n'est peut-être pas optimale mais qui satisfait les besoins exprimés (principe du seuil de satisfaction de l'individu)".

Dans le contexte actuel de l'IoT et du big data, le concepteur a accès à trop de données pour que l'entendement humain puisse les traiter dans un temps raisonnable. Il faut donc faire appel à des systèmes d'aide à la décision. Cela peut se faire au travers de procédures instituées, de connaissances disponibles et d'un équipement donné, comme le propose Simon. Nous pouvons aussi, et ce n'est pas contradictoire, proposer de créer de nouvelles procédures, connaissances et équipements en fonction des informations disponibles afin de les valoriser au mieux.

Nous proposons une approche d'aide à la décision dynamique qui utilise les informations massives disponibles et les traite par les méthodes d'intelligence artificielle pour fournir de l'aide à la décision pour le concepteur, afin qu'il puisse se concentrer sur les tâches à forte valeur ajoutée tel l'innovation et la prise de décision.

Pour chaque phase nous disposerons dans un futur proche d'un grand nombre des informations du produit concernant son environnement (température, humidité...), son utilisation (mode, vitesse/accélération, durée de vie), sa fabrication (matière, machine utilisée, conditions d'utilisation...), sa maintenance (réparation, changement de pièces...), sa fin de vie (désassemblage, recyclage...). Ces données, si nous sommes capables d'en sortir des informations pertinentes, aideront à l'amélioration de la conception.

Nous proposons une approche d'aide à la conception dynamique, combinant des approches d'intégration des données, informations et connaissances avec une approche ontologique et des approches d'exploitation de ces connaissances utilisant des systèmes d'aide à la décision basés sur des raisonnements symboliques et/ou connexionnistes (FIGURE 39).

Ces systèmes à bases de connaissances sont composés de trois parties :

1. Les données sont capitalisées et structurées au sein d'ontologies basées sur le standard STEP et ses différentes AP pour faciliter son appropriation industrielle. Elles sont cohérentes entre elles grâce au méta-modèle PARO qui permet de relier les informations des différentes phases du cycle de vie.
2. Les données et les connaissances capitalisées sont ensuite exploitées selon le besoin par des moteurs d'inférence utilisant des raisonnements symboliques ou connexionnistes afin d'apporter de l'aide à la décision. Ces systèmes d'aides à la décision peuvent intervenir à différents moments de la conception (de l'analyse du besoin à l'industrialisation) et exploiter des informations venant de différentes étapes du cycle de vie du produit. Directement de la conception bien sûr, mais également d'autres étapes comme la fabrication, la maintenance ou la fin de vie.
3. Une IHM adaptée à chaque besoin d'aide à la décision permet de définir le contexte du problème à résoudre. Elles sont intégrées dans l'environnement de travail du concepteur, facilitant son appropriation. Les travaux sur l'expérience utilisateur et les interfaces intelligentes (dont les robots conversationnels par exemple) pourront aussi venir faciliter cette appropriation dans un contexte où l'aide à la décision deviendra de plus en plus intégrée et omniprésente.

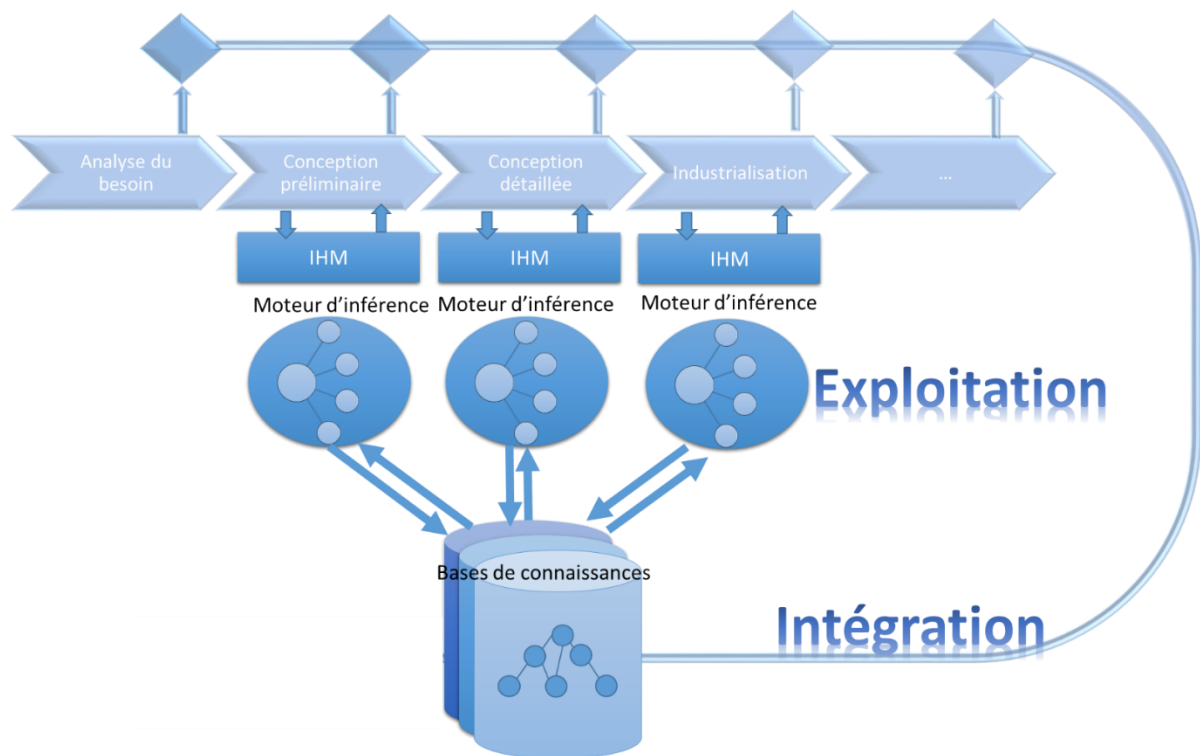


FIGURE 39: SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCES POUR L'AIDE A LA DECISION DYNAMIQUE

Maintenant que nous avons posé les bases de l'aide à la décision dynamique pour la conception de systèmes mécaniques, nous allons proposer des perspectives de recherche qui nous permettront à la fois de continuer dans le prolongement des axes précédemment exposés et de développer de manière globale cette approche. Nous allons ici identifier les principaux verrous et directions de recherche existants avant d'exposer nos propositions concernant les ontologies et les systèmes de raisonnements.

- Direction de recherche 1 : Dynamic Design Ontology

L'objectif est ici de définir un cadre de référence pour les différentes ontologies produit nécessaires à la conception de systèmes mécaniques associées aux différentes techniques permettant leur interopérabilité afin de faciliter l'intégration agile d'expertises métiers au sein du processus de conception mécanique. Le premier projet à court terme vise à proposer une approche ontologique agile sur un domaine encore peu structuré de l'usine du futur. La vision plus long terme est de combiner méthodes intégrées, unifiées et fédérées spécifiques au contexte de la conception intégrée et du PLM pour permettre de l'intégration de l'ensemble des données, informations et connaissances sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

- Direction de recherche 2 : Dynamic Design Inference

La deuxième direction de recherche envisagée est le Dynamic Design Inference : cet aspect correspond à la prolongation de l'axe 2, à savoir l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle pour fournir un raisonnement s'appuyant à la fois sur les connaissances expertes et sur les données issues du terrain. Le premier projet vise ici à développer l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle en utilisant les données produit contenues dans les ontologies, notamment celle venant des phases de MOL et EOL en utilisant des systèmes hybrides symboliques et connexionnistes. Le second projet plus long terme est de définir la feuille de route pour l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle sur les différentes étapes du processus de conception en fonction des besoins d'aide à la décision des concepteurs et des données et connaissances disponibles.

5.1.DIRECTION DE RECHERCHE 1 : DYNAMIC DESIGN ONTOLOGY

Les ontologies répondent à un certain nombre de challenges concernant la gestion des données, informations et connaissances en particulier au niveau sémantique. Ces outils et concepts sont une des voies de développement majeure pour la structuration, le partage et l'échange de connaissances dans un langage utilisable par l'homme et interprétable par la machine (El kadiri et Kiritsis, 2015). Néanmoins plusieurs verrous apparaissent concernant leur utilisation optimale dans le cadre du PLM et de la conception intégrée :

- Il faut être capable de fournir des ontologies qui répondent à un besoin le plus largement répandu possible, afin d'assurer leurs généricités, mais qui n'est pas déjà couvert par d'autres ontologies. De nombreux domaines de la conception mécanique ne sont pas encore structurés en terme de connaissances, ou en tout cas, pas dans un langage interprétable par une machine.
- Il faut être capable de maintenir la cohérence de ces ontologies entre elles. De nombreuses ontologies sont créées chaque année. Elles ont leur intérêt dans leur contexte propre, plus ou moins large et plus et avec plus ou moins de recouvrement avec d'autres ontologies. Il faut être capable de les intégrer pour utiliser les informations et connaissances qu'elles recèlent.

Le premier verrou scientifique identifié se situe au niveau de la structuration des connaissances, ou certains domaines (ou sous-domaines) ne sont pas encore structurés. De nombreuses expertises métiers nécessitent encore aujourd'hui la création d'ontologies spécifiques pour permettre cette structuration de la connaissance. C'est par exemple le cas sur l'usine du futur qui combine les aspects classiques de fabrication et production, l'IIoT (Industrial Internet of Things) (Da Xu et al., 2014) et les CPPS (Cyber Physical Production Systems) (Monostori et al., 2016). Les connaissances concernant ces deux derniers domaines sont encore mal structurées et nécessitent la création d'ontologies permettant de récupérer l'information et d'intégrer les règles métiers pour analyser les données récoltées.

Babiceanu et Seker (2016) expliquent qu'un des futurs challenges pour les CPS dans le domaine de l'industrie est le développement de modèles multi-niveaux sur les aspects traditionnels de l'usine (planification, allocation de ressources, conception d'atelier, gestion d'inventaire...) combinée aux spécificités des CPS. Concernant l'IIoT, les premières ontologies sont en cours de développement. Kotis et Katasonov (2012) proposent une ontologie sur l'IIoT permettant de connecter des objets et d'aligner les données hétérogènes de ces objets. Lutzenberger et al. (2013) proposent une ontologie pour les objets connectés afin de représenter le domaine physique et le domaine virtuel de manière synchrone en s'appuyant sur les possibilités de raisonnements des ontologies. Maleki et al. (2017) proposent une ontologie pour les capteurs facilitant leur utilisation en conception de CPS en se basant sur des données théoriques et expérimentales. Rong et al. (2016) proposent des solutions techniques pour l'IIoT (basé sur les technologies de National Instrument) pour l'usine du futur, en proposant des solutions hardware améliorant ainsi l'interopérabilité technique. D'un autre côté, les ontologies sur l'usine du futur sont encore majoritairement basées sur la fabrication et la gestion de la production et intègre rarement les CPS et les objets connectés. Szejka et Cancigliieri (2017) proposent une approche ontologique pour l'usine intelligente permettant d'aligner différentes ontologies. Shariatzadeh et al. (2016) proposent une intégration des objets connectés pour l'usine numérique au travers du standard Open Services for Lifecycle Collaboration (OSLC).

Notre proposition est ici de venir définir une approche ontologie (liant les ontologies existantes) qui permette de structurer les informations nécessaires à l'usine du futur. Elle viendra mettre en relation ces différentes informations avec le niveau de granularité nécessaires à la prise de décision permettant

l'autonomie des CPPS. En effet, de telles machines sont la caractéristique de l'automatisation flexible de la production, puisqu'elles s'adaptent automatiquement aux variations des conditions environnementales, aux produits à fabriquer, aux variations des volumes de production ou aux aléas qui apparaissent lors de la production. Pour ce faire, les CPPS utilisent des capteurs pour percevoir leur environnement et la situation actuelle. Ils utilisent également un raisonnement automatisé basé sur une planification pour déterminer leur action, et ils utilisent des actionneurs pour exécuter la séquence d'action déterminée afin d'atteindre les objectifs globaux fixés par le processus de fabrication en vigueur (Beckey, 2005). Ainsi de nombreuses informations, issus de systèmes d'information multiples (PDM, ERP, MES...), des produits connectés (RFID, mémoire embarquée...) et des machines elles-mêmes (capteurs...) doivent être mis en relation pour permettre au CPPS d'avoir les informations nécessaires à la prise de décisions (Rosen et al., 2015). Ces informations devront être structurées pour faciliter leur interprétation et supporter par des règles pour prétraiter les données pour le travail d'analyse. Les ontologies existantes concernant les données de conception et de production, les produits connectés et les données issues des CPPS seront combinées pour permettre la prise de décision des CPPS dans un contexte de production autonome. Ces aspects nécessitent de plus une coordination avec les organismes de standardisation nationaux et internationaux afin de permettre la diffusion et l'acceptation d'une structuration commune de ce domaine. Ce fut le cas dans nos travaux, notamment au sein de l'AFNOR et de la norme ISO STEP. Concernant l'IoT, des travaux sont en cours au sein de l'ISO et de QLM-SOM sous des activités de l'Open Group. Nous souhaitons continuer dans cette voie avec nos travaux futurs.

La deuxième partie de ce projet est de permettre plus de flexibilité dans la structuration des ontologies. Il s'agit ici de venir proposer des approches d'interopérabilité sémantique fédérées afin de faciliter la connexion des différentes ontologies pour permettre l'utilisation des données sur l'ensemble du cycle de vie de manière agile. L'utilisation d'approches d'alignement ontologique spécifiquement adaptées au contexte du PLM permettrait d'intégrer de manière dynamique de nouvelles informations issues d'autres phases du cycle de vie ou d'autres expertises métiers pour faciliter la conception de systèmes mécaniques avec une approche holistique.

Nous avons proposé dans les chapitres précédents des modèles et méta-modèles produit permettant de mener les approches intégrées et unifiées. Le méta-modèle PARO permet de définir les concepts généraux utilisés en PLM, indépendamment du domaine et peut ainsi servir de colonne vertébrale pour connecter les différentes ontologies plus spécifiques métiers comme nous l'avons proposé pour ODE, OntoSTEP-NC et MIM. Néanmoins, l'interopérabilité ne peut pas exister dans une seule approche mais nécessite une agrégation des trois approches (unification, intégration et fédération) pour la conservation du flux sémantique (Kosanke, 2005). En effet, (Hoffmann, 2008) émet des réserves quant à l'utilisation de chacune des approches prises individuellement. En revanche, une combinaison des trois permettrait d'éviter une situation critique en vue de la conservation du flux sémantique. Afin de compléter nos approches unifiées et intégrées, nous devons être en mesure de proposer également des approches fédératives. Ces approches viendront contribuer à une véritable interopérabilité sémantique et favoriseront l'agilité des systèmes à base de connaissances pour l'aide à la conception dynamique.

Nous proposons d'ajouter une approche fédérée par l'adaptation des méthodes d'alignement automatique d'ontologies (Ontology Matching, Ontology Mapping, Ontology Alignment) (Shvaiko et Euzenat, 2013), (Otero-Cerdeira et al., 2015) spécifiquement au contexte PLM. Ce contexte particulier s'appuie sur de nombreuses descriptions arborescentes (dont les différentes nomenclatures) ce qui permet de combiner plusieurs types d'approches d'alignement automatique d'ontologies. L'objectif est ici de combiner les approches les plus appropriées pour permettre l'alignement sémantique d'ontologies métiers. Cela permet alors de venir connecter plus facilement de nouveaux systèmes métiers. Pour ce

faire, nous proposons une combinaison de méthodes adaptées au contexte d'intégration des expertises métiers en conception mécanique. Nous proposons donc de nous baser sur des approches pouvant être menées au niveau des concepts de l'ontologie ou de ces instances :

- Des approches de fouille de texte (Text Mining) pour comparer les noms des entités (similarité de chaînes de caractères (String-Based Similarity)) : par exemple deux articles dans deux ontologies différentes) ou leurs définitions (un grand nombre de mots similaires dans deux définitions de concepts).
- Des approches basées sur les graphes (homomorphisme, chemin, enfant, feuille...) pour reconnaître la nomenclature arborescence d'un système sous différentes vues.

Nous proposerons ainsi une approche d'interopérabilité sémantique triple, proposant des ontologies, méta-ontologie et techniques d'alignement automatique d'ontologies permettant une intégration des expertises métiers plus agile et flexible.

5.2. DIRECTION DE RECHERCHE 2 : DYNAMIC DESIGN INFERENCE

L'intelligence artificielle, et en particulier l'apprentissage automatique, est de plus en plus populaire ces dernières années grâce à des percées spectaculaires dans des domaines comme la reconnaissance vocale ou la reconnaissance d'image ou encore la victoire face à un champion du jeu de Go (Churchland et Sejnowski, 2016). Une seconde évolution, celle-là plus continue, est la croissance des capacités de calcul, notamment grâce au HPC, qui permet aujourd'hui à n'importe quelle entreprise d'accéder à des puissances de calcul jusqu'alors réservées à quelques grands groupes. Enfin, et plus particulièrement dans le domaine de la conception mécanique, l'arrivée de l'usine du futur, de l'IIoT et des objets connectés, fournissent les données nécessaires à l'utilisation de ces techniques d'intelligence artificielle. C'est la combinaison de ces trois facteurs qui font qu'aujourd'hui, les techniques d'intelligence artificielle sont arrivées assez matures pour que l'on essaye de nouvelles applications, notamment en conception intégrée. Il reste cependant quelques verrous scientifiques à lever afin de pouvoir utiliser pleinement ces techniques dans le domaine de la conception mécanique.

- Un verrou spécifique à l'apprentissage automatique et particulièrement vrai en conception intégrée est la problématique de l'acquisition des données pertinentes (Wuest et al., 2016). Les données produites sont généralement très hétérogènes, dispersées, incomplètes et incertaines. Ces données devront donc être structurées afin de permettre leur utilisation par les moteurs d'inférence. Cette structuration est critique quant à la qualité des résultats que donneront les algorithmes d'apprentissage automatique.
- Deuxièmement le choix des méthodes d'intelligence artificielle à appliquer aux différents problèmes d'aide à la décision en conception de systèmes mécaniques. La combinaison de ces méthodes, leur succession et leur hybridation doivent permettre de se rapprocher de la cognition du concepteur afin de proposer des aides à la décision sur des problèmes plus complexes et moins routiniers.

Notre premier projet sur cet axe consiste à exploiter les ontologies précédemment définies pour permettre l'utilisation de méthodes d'intelligence artificielle sur des données nouvelles, non encore exploitées et non reliées entre elles. Nous pensons que ces nouvelles données et nouvelles relations permettront aux techniques d'intelligence artificielle d'apporter des solutions plus pertinentes, prenant en compte l'intégralité du cycle de vie du produit pour une approche holistique amenant à de meilleurs résultats.

L'utilisation d'ontologies tels que définies au chapitre précédent permettrait une structuration des informations facilitant son exploitation par des systèmes à base d'intelligence artificielle. Dans les travaux récents, cette approche commence à être mise en place. Trappey et al. (2013) utilisent un réseau neuronal artificiel basé sur une ontologie pour classer automatiquement et rechercher des documents dans un environnement collaboratif. Milicic et al. (2013) proposent un outil d'exploitation de l'ontologie basé sur des mécanismes de raisonnement et des extractions de pattern via de la fouille de données sur les instances des ontologies. Ou encore Chen et al. (2016) proposent de combiner ontologies et systèmes de retour d'expériences pour aller vers de la prise de décision automatique pour le désassemblage de systèmes mécaniques. Dans nos travaux, l'utilisation de réseaux bayésiens basés sur l'ontologie ODE ou encore de Machines à vecteurs supports basée sur OntoSTEP-NC nous permette de tester les possibilités offertes par ces nouvelles approches qui semblent très prometteuses. L'utilisation de réseaux de neurones profonds (toujours sur les informations issues d'OntoSTEP-NC) est également une voie que nous souhaitons explorer. La principale limitation des travaux en cours est que les techniques d'apprentissage automatique s'appuient uniquement sur des données issues de la phase du cycle de vie qu'ils visent à améliorer.

Notre proposition est donc de se servir de données issues de l'ensemble du cycle de vie pour permettre de découvrir de nouvelles relations, de nouvelles règles, de nouvelles connaissances qui étaient jusqu'alors non exploitées. Pour ce faire nous proposons de relier plusieurs ontologies (notamment au travers de PARO), puis de les instancier sur différents produits en récupérant des données issues des différentes phases du cycle de vie, dont les phases de MOL et EOL. Enfin nous proposerons des moteurs d'inférences à base d'apprentissage automatique pour obtenir des résultats que nous espérons utiles et pertinent pour l'aide à la décision, améliorant ainsi l'aspect holistique de la conception de systèmes mécaniques. Nous sommes actuellement en cours de montage de partenariats avec différents acteurs industriels pour mettre en place ce type de systèmes à base de connaissances sur un système hydraulique.

La deuxième phase est la sélection du meilleur système d'inférence (ou de la meilleur combinaison) dans un contexte donné pour obtenir des résultats pertinents. Il s'agit ici de fournir un cadre pour la sélection de l'approche la plus appropriée en fonction du problème abordé et des données, informations et connaissances disponibles. Une des difficultés majeures est de savoir quelle information utiliser et à l'aide de quel type de moteur d'inférence. Nous ne pensons pas qu'il y ait un meilleur moteur d'inférence, ni même un meilleur hybride. L'un des verrous scientifiques principaux dans ce contexte est de trouver le bon raisonnement (ou la bonne combinaison) pour un problème donné.

Nous proposons de développer un cadre pour la sélection des méthodes d'intelligence artificielle pour l'aide à la décision en conception mécanique. Dans ce sens, Danglade et al. (2017) proposent une méthode pour la simplification des modèles CAO en vue de la simulation sur des assemblages aéronautiques. Ils mettent en compétition plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique (réseaux de neurones, arbres de décision, machines à vecteur support et réseaux bayésiens). Cette approche est très intéressante mais illustre bien les limites que nous rencontrons quant aux choix de bon moteur d'inférences face à un problème donné. Kotsiantis (2007) propose dans ce sens un tableau comparatif (TABLEAU 9) mais les critères très génériques ne permettent pas à eux seul de faire un choix pour un problème d'aide à la décision en conception.

TABLEAU 9: COMPARAISON DES ALGORITHMES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE SUPERVISE

	Arbres de décision	Réseau de neurones	Réseau bayésien	SVM
Précision en général	**	***	*	****
Vitesse d'apprentissage en ce qui concerne le nombre d'attributs et le nombre d'instances	***	*	****	*
Vitesse de classification	****	****	****	****
Tolérance aux valeurs manquantes	***	*	****	**
Tolérance aux attributs non pertinents	***	*	**	****
Tolérance aux attributs redondants	**	**	*	***
Tolérance aux attributs hautement interdépendants	**	***	*	***
Capacité à traiter les attributs discrets / binaires / continus	****	*** (non discrète)	*** (non continue)	** (non discrète)
Tolérance aux données bruitées	**	**	***	**
Risque de surapprentissage	**	*	***	**
Essais d'apprentissage progressif	**	***	****	**

Capacité d'explication / transparence des connaissances / classifications	*****	*	*****	*
Traitement des paramètres du modèle	****	*	*****	*

Nous proposons donc de développer un cadre pour orienter ce choix. Ce cadre sera spécifique pour le domaine de la conception mécanique, nous permettant ainsi la prise en compte d'un certain nombre de caractéristiques spécifiques liées à ce domaine (complexité du produits, données issues de l'intégralité du cycle de vie du produit, règles métiers, lois physiques...). De nombreux facteurs sont alors à prendre en compte, tel que :

- Le type de problème à résoudre : classification, optimisation, exploration, estimation de valeur, prédiction...
- L'existence de connaissances sur le sujet : dispose-t-on de connaissances, sont-elles explicites ou tacites, compilées ou dynamiques, déclaratives ou procédurales ?
- L'existence de données sur le sujet : dispose-t-on de données, sont-elles incertaines, sont-elles bruitées, sont-elles complètes, sont-elles hétérogènes ?

Il faut ensuite être en mesure de sélectionner le bon algorithme en fonction de ces critères. Les méthodes existantes peuvent de plus se combiner afin d'obtenir des méthodes hybrides qui sont censés allier les avantages des deux (ou plus) méthodes utilisées. Les hybridations de méthodes d'apprentissage automatique sont assez fréquentes. Par contre les hybridations de raisonnements symboliques et connexionnistes sont plus rares. Nous pouvons imaginer la création du moteur d'inférence, en fonction de la question, des données et des connaissances disponibles. Le moteur d'inférence serait généré pour répondre à la question posée combinant l'ensemble de règles connues, l'ensemble des données utiles selon un contexte défini.

Aujourd'hui, il semble que de nouvelles opportunités s'ouvrent concernant les systèmes d'aide à la décision en conception mécanique. Les nouvelles capacités de calcul, les nouveaux algorithmes d'intelligence artificielle et la disponibilité de données massives semblent indiquer qu'il est peut-être temps de remettre à l'ouvrage ces approches. Afin de parvenir à exploiter des systèmes d'aide à la décision sur des tâches de conception plus complexes, plus innovantes et moins routinières, nous proposons de combiner des approches des sciences cognitives, de la mécanique et de l'intelligence artificielle.

6. CONCLUSIONS

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le domaine de la conception mécanique et plus particulièrement dans celui de la conception intégrée et du PLM. Dans un contexte de croissance exponentielle des données produits disponibles, du fait de la 4^{ème} révolution industrielle, de l'IoT, du big data, le concepteur ne peut plus intégrer l'ensemble des informations utiles pour améliorer son produit. Il a besoin d'aide à la décision et du support de systèmes à base de connaissances pour l'assister dans le développement de systèmes mécaniques de plus en plus complexes. C'est dans ce cadre que nous proposons une méthode d'aide à la décisions dynamique pour la conception de systèmes mécaniques.

Nos contributions se déclinent selon deux axes : d'une part, l'intégration des expertises métiers, par la capitalisation et la structuration des données produits, notamment au travers d'approches ontologiques. Et d'autre part l'exploitation de ces expertises métiers par l'utilisation de raisonnements symboliques et connexionnistes pour fournir une aide à la décision. Sur le premier axe de recherche, nous avons proposé quatre ontologies cohérentes, connectées entre elles et reposant sur le standard STEP. Une méta-ontologie sur les objets PLM, une ontologie sur les interfaces multidisciplinaires pour l'ingénierie système, une ontologie pour la fabrication de pièces usinées et une ontologie pour la simulation et les plans d'expériences numériques. Enfin une approche fédérative, basée sur de l'alignement automatique d'ontologies, vient compléter notre cadre de référence. Sur le deuxième axe de recherche, nous proposons divers systèmes à base de connaissances, basés sur les ontologies précédemment définies, pour fournir de l'aide à la décision en utilisant des systèmes à base de règles, des systèmes de retour d'expériences et des réseaux bayésiens. Un nouveau système est actuellement en cours de développement pour venir ajouter un moteur d'inférence basé sur les machines à vecteurs de support au système de retour d'expériences, venant ainsi exploiter la complémentarité des approches symboliques et connexionnistes.

Ces différents travaux sont combinés dans un cadre plus large d'aide à la décision pour la conception de systèmes mécaniques exploitant les données, les informations et les connaissances existantes sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Cette évolution vers une aide à la conception plus dynamique entraînera une modification des métiers de la conception, avec une montée en compétences nécessaire sur les aspects innovations et une élévation générale du niveau d'étude dans les bureaux d'études. De nouveaux métiers vont également émerger, notamment en lien avec les ontologies et l'intelligence artificielle, compétence rare et très recherchée en ce moment. Enfin nous verrons la disparition d'une partie du travail (tâches routinières auparavant effectuées par des humains) vers un système distribué et moins cher ou chacun contribuera à l'automatisation de ces tâches (crowdsourcing nécessaire pour nombre de prétraitement de données avant de pouvoir effectuer de l'apprentissage automatique). Enfin, ce type de conception ouvrira une série de questions philosophiques sur les enjeux sociétaux, éthiques, anthropologiques et de responsabilité de la conception de produit entièrement conçu par une intelligence artificielle.

D'un point de vue quantitatif, ces recherches ont été diffusées dans les communautés scientifiques nationales et internationales du domaine (IFIP, CIRP, Design Society, AFM, GdR MACS et GIS Smart), donnant lieu à 23 publications dans des revues internationales indexées WoS ou Scopus, 5 publications dans des revues non indexées WoS ou Scopus, 49 communications à des congrès internationaux à comité de sélection et actes publiés, 19 communications à des congrès nationaux à comité de sélection et 10 rapports de projets nationaux ou européens. Ces travaux ont également été

valorisés via des transferts industriels, notamment chez des éditeurs de logiciels et des industriels du secteur automobile et aéronautique.

BIBLIOGRAPHIE

- Aamodt A., Plaza E. (1994). Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Communications* 7(1):39-59.
- Abdul-ghafour S., Ghodous P., Shariat B. (2012). Integration of product models by ontology development. *IEEE 13th International Conference on Information Reuse and Integration* :548–555, Las Vegas, USA, 8-10 August.
- Abel M.-H., Benayache A., Lenne D., Moulin C., Barry C., Chaput B. (2004). Ontology-based Organizational Memory for e-learning. *Educational Technology & Society* 7 (4): 98-111.
- ActionPlanT (2011). *ICT Enabled Future Manufacturing and Vision for a Manufacturing Business Web*. Deliverable D2.1, EU-FoF-258617.
- Akaike H. (1970). Statistical predictor identification. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 22(1):203-217.
- Amann K. (2002). *Product Lifecycle Management “Empowering the future of business”*. CIM Data, Inc.
- Ammar-Khodja S., Bernard A. (2008). An overview on knowledge management. *Methods and tools for effective knowledge life cycle management*, Springer-Verlag.
- 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.
- Ashton K. (2009). The ‘internet of things’ thing. *RFiD Journal* 22(7):97-114.
- Athena (2004). *Enterprise modelling in the context of collaborative enterprises*. Deliverable D.A.1.1.1, EU-IP-507849.
- Babiceanu R. F., Seker R. (2016). Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Computers in Industry* 81 :128-137.
- Bachelard G. (1934). *La formation de l'esprit scientifique*.
- Baines T., Lightfoot H., Williams G. Greenough R. (2006). State-of the-art in lean design engineering : a literature review on white collar lean. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 220:1539-1547.
- Barbau R., Krma 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.
- Barto A. G., Sutton R. (1997). *Introduction to Reinforcement Learning*, MIT Press.
- Beaud M. (1980). *L'Art de la thèse*, La Découverte, Paris.

Beckey G. A. (2005). *Autonomous Robots*, MIT Press.

Bernard A. (1996). *Contribution à la modélisation des produits et à l'intégration des technologies productrices dans un environnement multi-acteurs*, Habilitation à Diriger des Recherche, École Centrale Paris.

Biahmou A., Fröhlich A., Stjepandic J. (2010). Improving Interoperability in Mechatronic Product Development, *International Conference on Product Lifecycle Management*: 510–521, Bremen, Germany.

Bizer C., Heath T., Berners-Lee T. (2009). Linked data-the story so far. *Semantic services, interoperability and web applications: emerging concepts*:205-227.

Blessing L.T., Chakrabarti A. (2009). *DRM - A Design Research Methodology*. Springer Science & Business Media.

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.

Boser B. E., Guyon I. M., Vapnik V. N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers, *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*: 144-152, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

Breiman L. (2001). Random Forests. *Machine Learning* 45(1):5–32.

Brissaud D., Tichkiewitch S. (2001). Product Models for Life Cycle. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 50(1):105–108.

Bubeník P., Horák F. (2014). Knowledge-Based Systems To Support Production Planning. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette* 21(3): 505-510.

Business Dictionary (2015). *Definition Digitalization*.
<http://www.businessdictionary.com/definition/digitalization.html>

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.

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.

Chang X., Terpenney J. (2009). Ontology-Based Data Integration and Decision Support for Product E-Design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25 (6): 863–870.

Chandrasegaran S.K., Ramani K., Sriram R.D., Horváth I., Bernard A., Harik R.F. (2013). The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-Aided Design* 45(2):204–228.

- Chen S., Yi J., Jiang H., Zhu X. (2016). Ontology and CBR based automated decision-making method for the disassembly of mechanical products. *Advanced Engineering Informatics* 30(3):564-584.
- 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.
- Cheutet V. (2012). *Contribution à la continuité des flux d'informations et de connaissances dans le lien conception-production*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne.
- Cheung Y.-L., Jiang P., Limpaphayom P., Lu T. (2010). Corporate Governance in China: a Step Forward. *European Financial Management* 16(1): 94-123.
- Chungoora N., Young R.I., Gunendran G., Palmer C., Usman Z., Anjum N. (2013). A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. *Computers in Industry* 64 (4): 392–401.
- Churchland P. S., Sejnowski T. J. (2016). *The computational brain*. MIT press.
- Correa M., Bielza C. Pamies-Teixeira J. (2009). Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process. *Expert Systems with Applications* 36(3) :7270–7279.
- Cui C., Hu M., Weir, J.D., Wu T. (2016). A recommendation system for meta-modeling: A meta-learning based approach. *Expert Systems with Applications* 46:33–44.
- Da Xu L., He W., Li S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on industrial informatics* 10(4):2233-2243.
- Dalkir K. (2005). *Knowledge Management in Theory and Practice*. Elsevier B.V.
- Danglade F., Pernot J. P., Véron P., Fine L. (2017). A priori evaluation of simulation models preparation processes using artificial intelligence techniques. *Computers in Industry* 91:45-61.
- Dartigues, C., Ghodous P., Gruninger M., Pallez D., Sriram R. (2007). CAD/CAPP Integration using Feature Ontology. *Concurrent Engineering* 15 (2): 237–249.
- 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.
- Delplace, J.C. (2004). *L'ingénierie numérique pour l'amélioration des processus décisionnels et opérationnels en fonderie*, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- 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.

- Ding L., Matthews J. (2009). A contemporary study into the application of neural network techniques employed to automate CAD/CAM integration for die manufacture. *Computers and Industrial Engineering* 57(4):1457–1471.
- Dolšák B. (2002). Finite element mesh design expert system. *Knowledge-Based Systems* 15(5–6):315–322.
- Dreyfus G., Martinez J.M., Samuelides M., Gordon M. B, Badran F., Thiria S. (2011). *Apprentissage statistique : Réseaux de neurones-Cartes topologiques-Machines à vecteurs supports*. Eyrolles.
- Dupinet E. (1991). *Contribution à l'étude d'un système informatique d'aide à la conception de produits mécaniques*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris.
- EIF (2004). *European interoperability framework*.
- 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* 53(18):5657-5668.
- Etienne A., Guyot E., Van Wijk D., Roucoules L. (2011). Specifications and Development of Interoperability Solution dedicated to Multiple Expertise Collaboration in a Design Framework. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 5(2-4):272-294.
- 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.
- Fernández-López M., Gómez-Pérez A., Juristo N. (1997). *Methontology: from ontological art towards ontological engineering*.
- FIM (2016). *Guide pratique de l'usine du futur. Enjeux et panorama de solutions*.
- Fortineau, V. (2013). 5 Root Concepts for a Meta-ontology to Model Product Along Its Whole Lifecycle. *Proceedings of Intelligent Manufacturing Systems*: 47–52, São Paulo, Brazil.
- Groupe GAMA (1990). *La gamme automatique en usinage*, Editions Hermès.
- Gandomi A., Haider M. (2014). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management* 35(2) :137-144.
- Gardoni M. (1999). *Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée. Cas d'étude Aérospatiale*, Thèse de Doctorat, Université de Metz.
- Gero J.S. (1990). Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. *AI Magazine* 11(4):26-36.
- Giannetti C., Ransing R.S., Ransing M.R., Bould D.C., Gethin D.T., Sienz J. (2014). Knowledge management and knowledge discovery for process improvement and sustainable manufacturing : a foundry case study. *Sustainable Design and Manufacturing*: 254–266.
- González-Rodríguez M., Vennesland A., Dalmolen S. (2015). A common language for logistics services interoperability. *Advanced Logistics and Transport (ICALT)*:70-75.

- Gruber T.R. (1993). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human-Computer Studies* 43(5-6):907-928.
- Gruhier E., Demoly F., Dutartre O., Abboudi S., Gomes S. (2015). A formal ontology-based spatiotemporal mereotopology for integrated product design and assembly sequence planning. *Advanced Engineering Informatics* 29(3) :495-512.
- Hanafy M., ElMaraghy H. (2014). Co-design of Products and Systems Using a Bayesian Network. *Procedia CIRP* 17 :284–289.
- Harik R.F., Derigent W.J.E., Ris G. (2008). Computer Aided Process Planning in Aircraft Manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications* 5 (6): 953-962.
- Hashemi H., Shaharoun A.M., Sudin I. (2014). A case-based reasoning approach for design of machining fixture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74(1-4): 113-124.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*, Springer-Verlag.
- Hoffmann P. (2008). *Similarité sémantique inter-ontologies basée sur le contexte*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon 1.
- Huang Q. (1996). *Design for X: concurrent engineering imperatives*. Chapman & Hall Edition.
- Interop (2004). *Knowledge map of research in interoperability in the INTEROP NoE*, Deliverable D1.1, EU-NoE Project IST-508 011.
- ISO 10303-209 edition 2 (2010). *Multidisciplinary Design and Analysis Background and Capabilities High Level Overview and Background*.
- ISO10303-233 (2012). *Application protocol: Systems engineering*.
- ISO 10303-238 (2006). *Application interpreted model for computerized numerical controllers*.
- ISO 10303-239 edition 3 (2015). *Application Protocol For Product Life Cycle Support (PLCS)*.
- ISO 10303-242 (2014). *Application protocol: Managed model-based 3D engineering*.
- ISO 14258 (1998). *Industrial automation systems - Concepts and rules for enterprise models*.
- Jain A.K., Murty M. N., Flynn P. (1999). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys* 31(3): 264–323.
- 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.
- Jones B., Jenkinson I., Yang Z., Wang J. (2010). The use of Bayesian network modelling for maintenance planning in a manufacturing industry. *Reliability Engineering & System Safety* 95(3):267–277.

- Jun H.-B., Kiritsis D., Xirouchakis P. (2007). Research issues on closed-loop PLM. *Computers in Industry* 58 (8-9): 855–868.
- Kamsu Foguem B. (2013). *Contribution des modèles de connaissances à l'amélioration continue des processus industriels*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse.
- Kass G. V. (1980). An Exploratory Technique for Investigating Large Quantities of Categorical Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 29:119–127.
- Kebede G. (2010). Knowledge management: An information science perspective. *International Journal of Information Management* 30(5): 416–424.
- Kemp J.L.C. (1999). *Fractal organising of knowledge intensive organisations*. Thèse de doctorat, Erasmus Universiteit.
- Khaitan S. K., McCalley J. D. (2015). Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey. *IEEE Systems Journal* 9(2) :350-365.
- Khan A.A., Chaudhry I.A., Sarosh A. (2014). Case Based Reasoning Support for Adaptive Finite Element Analysis: Mesh Selection for an Integrated System. *Applied Physics Research* 6(3):.21–39.
- Kiritsis D. (2011). Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things. *Computer-Aided Design* 43(5): 479–501.
- Kosanke K. (2005). ISO Standards for Interoperability : a comparison. *Proceedings of the 1st International Conference on Interoperability of Enterprise Software and Applications*: 55-64, Geneva, Swiss.
- Kotis K., Katasonov A. (2012). An ontology for the automated deployment of applications in heterogeneous IoT environments. *Semantic Web Journal*.
- Kotsiantis S. B. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Informatica* 31:249–268.
- Kozemjak da Silva M., Remy S., Reyes T. (2015). On providing design process information to the environmental expert. *Research in Engineering Design* 26(4): 327-336.
- Krause F.L., Kimura F., Kjellberg T., Lu S. Y., Alting L., Elmaraghy H. A., Week, M.. (1993). Product Modeling. *Annals of the CIRP* 42(2):695-706.
- Kühnle H. (2010). *Distributed Manufacturing: Paradigm, Concepts, Solutions and Examples*, Springer Verlag London.
- Labrousse M. (2004). *Proposition d'un Modèle Conceptuel Unifié pour la Gestion Dynamique des Connaissances d'entreprise*, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes.
- La Rocca, G. (2012). Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. *Advanced Engineering Informatics*, 26: 159-179.
- LeCun Y., Bengio Y. Hinton G. (2015). Deep learning. *Nature* 521 :436–444

- Lehanev B. (2004). *Beyond knowledge management*. IGI Global.
- Le Moigne J.-L. (1977). *La Théorie du Système Général*, PUF.
- Li C., McMahon C., Newnes L. (2011). Progress with OntoCAD : A Standardised Ontological Annotation Approach to CAD Systems, *International Conference on Product Lifecycle Management*: 364–374, Eindhoven, Netherlands.
- Li S. (2003). A hybrid expert system for finite element modeling of fuselage frames. *Expert Systems with Applications* 24(1):87–93.
- Lim J., Chong S., Liu Y., Lee W.B. (2011). A Methodology for Building a Semantically Annotated Multi-faceted Ontology for Product Family Modelling. *Advanced Engineering Informatics* 25 (2): 147–161.
- Lin H.K., Harding J. (2007). A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. *Computers in Industry* 58 (5): 428–437.
- Lindhal M. (2006). Engineering designers' experience of design for environment methods and tools- Requirement definitions from an interview study. *Journal of Cleaner Production* 14(5):487-496.
- Liu H., Zhou S., Lam W., Guan J. (2017). A new hybrid method for learning bayesian networks: Separation and reunion. *Knowledge-Based Systems* 121:185–197.
- Lopez de Mantaras R., McSherry D., Bridge D., Leake D., Smyth B., Craw S., Faltings B., Maher M.L., Cox M.T., Forbus K., Keane M., Aamodt A., Watson I. (2005). Retrieval, reuse, revision and retention in case-based reasoning. *The Knowledge Engineering Review* 20(3):215.
- Lu W., Qin Y., Liu X., Huang M., Zhou L., Jiang X. (2015). Enriching the semantics of variational geometric constraint data with ontology. *Computer Aided Design* 63:72-85.
- Lu Y., Panetto H., Ni Y., Gu X. (2013). Ontology alignment for networked enterprise information system interoperability in supply chain environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 26(1-2):140-151.
- Lutzenberger J., Klein P., Thoben K.D. (2013). Using Knowledge Based Engineering to Support the Design of Smart Products. *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies, Vol. 6: Design Information and Knowledge*, Seoul, Korea.
- Madsen A. L., Jensen F., Salmerón A., Langseth H., Nielsen T. D. (2015). Parallelisation of the PC Algorithm. In *Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence* :14-24, Springer, Cham.
- Maleki E., Belkadi F., Ritou M., Bernard A. (2017). A Tailored Ontology Supporting Sensor Implementation for the Maintenance of Industrial Machines. *Sensors* 17(9):2063.
- Martínez-Martínez V., Gomez-Gil F. J., Gomez-Gil J., Ruiz-Gonzalez R. (2015). An Artificial Neural Network based expert system fitted with Genetic Algorithms for detecting the status of several rotary components in agro-industrial machines using a single vibration signal. *Expert Systems with Applications* 42(17–18) :6433–6441.

- Matsokis A., Kiritsis D. (2010). An ontology-based approach for Product Lifecycle Management. *Computers in Industry* 61(8), 787–797.
- McNaught K., Chan A. (2011). Bayesian networks in manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management* 22(6) :734–747.
- Milicic A., Perdikakis A., El Kadiri S., Kiritsis D. (2013). PLM Ontology Exploitation through Inference and Statistical Analysis – A Case Study for LCC. *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, St Petersburg, Russia.
- Mills H.D. (1980). The management of software engineering, Part I: Principles of software engineering. *IBM Systems Journal* 19 (4):414–420.
- Miloslavskaya N., Tolstoy A. (2016). Big Data, Fast Data and Data Lake Concepts. *Procedia Computer Science* 88:300–305.
- Minsky, M. (1975). A framework for representing knowledge. *The psychology of computer vision*: 211-277.
- Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., ... & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 65(2):621-641.
- Mony C., Dupinet E., Bernard A. (1992). A mechanical product integrated model for machining and manufacture of raw parts. *Proceedings of the CIRP Seminar: Manufacturing Systems*, 21(2):137-145.
- Morin E. (1977). *La méthode*. Seuil, Paris.
- Naïm P., Wuillemin P. H., Leray P., Pourret O., Becker A. (2011). *Réseaux bayésiens*, Eyrolles.
- Naranje V., Kumar, S. (2014). A knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts. *Expert Systems with Applications*, 41(4):1419–1431.
- NASA (2007). *NASA Systems Engineering Handbook*.
- 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.
- Negri E., Perotti S., Fumagalli L., Marchet G., Garetti M. (2017). Modelling internal logistics systems through ontologies. *Computers in Industry* 88:19-34.
- Newman B. (2002). An Open Discussion of Knowledge Management. *The Knowledge Management Forum* accessed 3.1.15.
- Nie G., Fu M., Xia H. (2009). A semantic mapping system based on e-commerce logistics ontology. *In Software Engineering, 2009. WCSE'09. WRI World Congress* 2:133-136.
- Noël, F., Roucoules, L. (2008). The ppo design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21(2):139-145.

- Nonaka I., Takeuchi H. (1995). *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford university press.
- Norris M. (2012) *Business Value from Simulation Data Management-a Decade of Production Experience*. Rapport technique NAFEMS.
- 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.
- Oestersötebier F., Just V., Trächtler A., Bauer F., Dziwok S. (2012). Model-based design of mechatronic systems by means of semantic web ontologies and reusable solution elements. *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Nantes, France.
- Otero-Cerdeira L., Rodríguez-Martínez F. J., & Gómez-Rodríguez A. (2015). Ontology matching: A literature review. *Expert Systems with Applications* 42(2) :949-971.
- Pahl G., Beitz W. (1984). Engineering design, *The design council*: 221-226. Springer.
- 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.
- Paviot T., Cheutet V., Lamouri S. (2011). A plcs framework for pdm / erp interoperability. *International Journal of Product Lifecycle Management* 5(2/3/4):295-313.
- Pawlak Z., Sowinski R. (1994). Rough set approach to multi-attribute decision analysis. *European Journal of Operational Research*, 72(3):443–459.
- Pearl J. (2000). *Causality : Models, Reasoning and Inference*. Cambridge University Press.
- Pearl J. (2014). *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan-Kaufmann.
- Perry N. (2007). *Industrialisation des connaissances : approche d'intégration pour une utilisation optimale en ingénierie (cas de l'évaluation économique)*, Habilitation à Diriger des Recherches, Ecole Centrale de Nantes.
- Piaget J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*.
- Powers D.M.W. (2011). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *Journal of Machine Learning Technologies* 2(1):37–63.
- Pratt M.J. (2005). ISO 10303, the STEP standard for product data exchange, and its PLM capabilities. *International Journal of Product Lifecycle Management* 1(1):86-94.
- Quinlan J.R. (1996). Improved use of continuous attributes in C4.5. *Journal of artificial intelligence research* 4:77–90.

- Rachuri S., Subrahmanian E., Bouras A., Fenves S., Foufou S., Sriram R. (2008). Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management : Role of standards. *Computer-Aided Design* 40(7):789-800.
- Rahmani K., Thomson V. (2012). Ontology based interface design and control methodology for collaborative product development. *Computer-Aided Design* 44(5):432-444.
- Rakotomalala R. (2005). Arbres de Décision. *La Revue de Modulad* 33:163-187.
- Rao L., Reichgelt H., Osei-Bryson K.-M. (2014). A Methodology for Developing High Quality Ontologies for Knowledge Management. *Knowledge Management for Development*: 121-143.
- Rico, M., Caliusco M. L., Chiotti O., Galli M. R. (2014). OntoQualitas: A Framework for Ontology Quality Assessment in Information Interchanges between Heterogeneous Systems. *Computers in Industry* 65 (9): 1291-1300.
- Robin V., Rose B., Girard P. (2007). Modelling collaborative knowledge to support engineering design project manager. *Computers in Industry*, 58(2):188-198.
- Rong W., Vanan G. T., Phillips M. (2016). The internet of things (IoT) and transformation of the smart factory. In *Electronics Symposium (IES)* :399-402.
- Rose B. (2015). *Contribution à la performance industrielle par la capitalisation des connaissances dans les phases amont du cycle de vie produit*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Strasbourg.
- Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* 48(3) :567-572.
- Roy S.S., Pratihar D.K. (2013). Adaptive neuro-fuzzy expert systems for predicting specific energy consumption and energy stability margin in crab walking of six-legged robots. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 24(3):467-482.
- Sahin S., Tolun M.R., Hassanpour R. (2012). Hybrid expert systems: A survey of current approaches and applications. *Expert Systems with Applications* 39(4):4609-4617.
- Sakthivel N.R., Sugumaran V., Babudevasenapati S. (2010). Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree. *Expert Systems with Applications* 37(6) :4040-4049.
- Sanya I. O., Shehab E. M. (2014). A Framework for Developing Engineering Design Ontologies within the Aerospace Industry. *International Journal of Production Research* 53 (8): 2383-2409
- Sarrafzadeh M., Martin B., Hazeri A. (2006). LIS professionals and knowledge management: some recent perspectives. *Library Management* 27(9):621-635.
- Schwaber K., Beedle M. (2001). *Agile Software Development With Scrum*. Prentice-Hall PTR.
- Schwarz G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics* 6(2):461-464.

- Scutari M. (2010). Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package. *Journal of Statistical Software* 35(3):1–22.
- Shahin M.A. (2014). State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 33-44.
- Shannon C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal* 27:379–423.
- Shariatzadeh N., Lundholm T., Lindberg L., Sivard G. (2016). Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things. *Procedia CIRP* 50:512-517.
- Shu-Hsien Liao (2005). Expert system methodologies and application - a decade review from 1995 to 2004. *Expert Systems with Applications* 28(1):93-103.
- Shvaiko P., Euzenat J. (2013). Ontology matching: state of the art and future challenges. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering* 25(1) :158-176.
- Simons G. L. (1985). *Introducing artificial intelligence*.
- Simon H.A. (1957). *Models of Man, Social and Rational: Mathematical Essays on Rational Human Behavior in a Social Setting*. John Wiley and Sons.
- Simon H. A. (1969). *The science of the artificial*. MIT Press.
- Sohlenius G. (1992). Concurrent Engineering. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 41(2):645–655.
- Soldatova L.N., King R.D. (2006). An ontology of scientific experiments. *Journal of The Royal Society Interface* 3(11):795-803.
- Spirtes P., Glymour C., Scheines R. (1993). *Causation, prediction, and search*. MIT press.
- Suárez-Figueroa M. C., Gómez-Pérez A., Fernández-López M. (2012). The NeOn methodology for ontology engineering. *Ontology engineering in a networked world* : 9-34.
- Subba Rao A.V., Pratihari D.K. (2007). Fuzzy logic-based expert system to predict the results of finite element analysis. *Knowledge-Based Systems* 20(1) :37–50.
- Sugumaran V., Ramachandran K.I. (2011). Effect of number of features on classification of roller bearing faults using SVM and PSVM. *Expert Systems with Applications*, 38(4) :4088–4096.
- Suh N. P. (1988). Basic concepts in design for producibility. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 37(2):559-567.
- 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.

- Sun H., Fan W., Shen W., Xiao T. (2013). Ontology fusion in high-level-architecture-based collaborative engineering environments. *IEEE transactions on systems, man and cybernetics : systems* 43(1) : 2-13.
- Sunil V. B., Pande S. S. (2009). Automatic recognition of machining features using artificial neural networks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 41(9–10) :932–947.
- Sure Y., Staab S., Studer R. (2004). On-to-knowledge methodology (OTKM). *Handbook on ontologies* : 117-132.
- Szejka, A.L., Canciglieri Junior, O. (2017). The Application of Reference Ontologies for Semantic Interoperability in an Integrated Product Development Process in Smart Factories. *Procedia Manufacturing* 11:1375-1384.
- Tasdemir S., Saritas I., Ciniviz M., Allahverdi N. (2011). Artificial neural network and fuzzy expert system comparison for prediction of performance and emission parameters on a gasoline engine. *Expert Systems with Applications* 38(11):13912–13923.
- Tempich C., Pinto H. S., Sure Y., Staab S. (2005). An argumentation ontology for distributed, loosely-controlled and evolving engineering processes of ontologies (DILIGENT). *European Semantic Web Conference* : 241-256.
- 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):360-389.
- Tichkiewitch S. (1994). De la C.F.A.O. à la conception intégrée. *Revue internationale de C.F.A.O. et d'infographie*, 9(5) :609–621.
- Tichkiewitch S. (1996). Specification on integrated design methodology using a multi-view product model. *ESDA Proceedings of the 1996 ASME System Design and Analysis Conference* 80:101-108.
- 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.
- Trappey A. J. C., Trappey C.V., Chiang T.A., Huang Y.H. (2013). Ontology-based Neural Network for Patent Knowledge Management in Design Collaboration. *International Journal of Production Research* 51 (7): 1992–2005.
- Urrea C., Henríquez G., Jamett M. (2015). Development of an expert system to select materials for the main structure of a transfer crane designed for disabled people. *Expert Systems with Applications* 42(1):691–697.
- Valiant L.G. (2003). Three Problems in Computer Science. *Journal of the ACM* 50(1):96–99.
- 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.

- 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.
- Von Bertalanffy L. (1968). *General system theory*. New York.
- 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 simulation de systèmes aéronautiques complexes*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.
- Wang J., Zhang H. L., Su Z. Y. (2011). Manufacturing Knowledge Modeling Based on Artificial Neural Network for Intelligent CAPP. *Applied Mechanics and Materials* 127 :310–315.
- Weggeman M. (1997). *kennismanagement, inrichting es besturing vas kennisintensieve organisaties*, Scriptum.
- Wegner P. (1996). Interoperability. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28(1):285–287.
- Wuest T., Weimer D., Irgens C., Thoben K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research* 4(1):23–45.
- Yin Z., Hou J. (2016). Recent advances on SVM based fault diagnosis and process monitoring in complicated industrial processes. *Neurocomputing* 174:643–650.
- Zadeh L.A. (1978). Fuzzy Sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 1:3-28.
- Zhang X. K., Tian, T. (2010). Logistics Domain Ontology Model and Its Application. *Advanced Materials Research*, 108-111:1403-1408.

APPORTS DES ONTOLOGIES ET DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE A LA CONCEPTION DE SYSTEMES MECANIQUES

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le domaine de la conception mécanique et plus particulièrement dans celui de la conception intégrée et du PLM. Dans un contexte de croissance exponentielle des données produits disponibles, du fait de la 4^{ème} révolution industrielle, de l'IoT, du big data, le concepteur ne peut plus intégrer l'ensemble des informations utiles pour améliorer son produit. Il a besoin d'aide à la décision et du support de systèmes à base de connaissances pour l'assister dans le développement de systèmes mécaniques de plus en plus complexes. C'est dans ce cadre que nous proposons une méthode d'aide à la décision dynamique pour la conception de systèmes mécaniques.

Nos contributions se déclinent selon deux axes : d'une part, l'intégration des expertises métiers, par la capitalisation et la structuration des données produits, notamment au travers d'approches ontologiques. Et d'autre part l'exploitation de ces expertises métiers par l'utilisation de raisonnements symboliques et connexionnistes pour fournir une aide à la décision. Sur le premier axe de recherche, nous avons proposé quatre ontologies cohérentes, connectées entre elles et reposant sur le standard STEP. Sur le deuxième axe de recherche, nous proposons divers systèmes à base de connaissances, basés sur les ontologies précédemment définies, pour fournir de l'aide à la décision en utilisant des systèmes à base de règles, des systèmes de retour d'expériences et des réseaux bayésiens. Un nouveau système est actuellement en cours de développement pour venir ajouter un moteur d'inférence basé sur les machines à vecteurs de support au système de retour d'expériences, venant ainsi exploiter la complémentarité des approches symboliques et connexionnistes.

Ces différents travaux sont combinés dans un cadre plus large posant les bases de l'aide à la décision dynamique pour la conception de systèmes mécaniques, exploitant les données, les informations et les connaissances existantes sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

Mots-clefs : Closed-Loop PLM ; Systèmes à base de connaissances ; Apprentissage Automatique ; Ontologies Produit

INTRODUCING ONTOLOGIES AND MACHINE LEARNING TO THE DESIGN OF MECHANICAL SYSTEMS

Our research activities are in the field of mechanical design and more particularly in the area of integrated design and PLM. In the context of the exponential growth of available product data, due to the 4th industrial revolution, IoT, big data, the designer can no longer integrate all the information needed to improve his product. He needs decision aid and knowledge-based systems to assist him in the development of increasingly complex mechanical systems. It is in this context that we propose a decision aid system for mechanical systems design.

Our contributions are based on two axes: on the one hand, integration of mechanical expertise, capitalization and structuring of product data, in particular through ontological approaches. On the other hand, the exploitation of these expertise by the use of symbolic and connexionism reasoning to provide decision support. On the first research axis, we proposed four coherent ontologies, connected to each other and based on the STEP standard. On the second research axis, we propose various knowledge-based systems, based on the previously defined ontologies, to provide decision support using rule-based systems, case based reasoning systems and Bayesian networks. A new system is currently being developed to add an inference engine based on support vector machines to the case-based reasoning system, thus exploiting the complementarity of symbolic and connexionist approaches. These different works are combined in a broader framework laying the foundations of a dynamic design methodology to provide decision support for design using existing data, information and knowledge across the life cycle of product.

Keywords: Closed-Loop PLM; Knowledge-Based Systems; Machine Learning; Product Ontologies