



HAL
open science

Intégration proactive des métiers en conception et formalisation des connaissances spatio-temporelles associées : application à l'assemblage et à la fabrication additive couplée aux matériaux intelligents

Frédéric : Demoly

► To cite this version:

Frédéric : Demoly. Intégration proactive des métiers en conception et formalisation des connaissances spatio-temporelles associées : application à l'assemblage et à la fabrication additive couplée aux matériaux intelligents. Mécanique [physics.med-ph]. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. tel-02087665

HAL Id: tel-02087665

<https://theses.hal.science/tel-02087665>

Submitted on 2 Apr 2019

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 à Diriger des Recherches

Spécialité : Mécanique

Intégration proactive des métiers en conception et formalisation des connaissances spatio-temporelles associées : application à l'assemblage et à la fabrication additive couplée aux matériaux intelligents

présentée et soutenue publiquement le 26/03/2019

par

Frédéric DEMOLY

Maître de Conférences

Docteur et Ingénieur en Mécanique (UTBM)

devant le jury composé de :

<i>Président :</i>	Prof. Dimitris KIRITSIS	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
<i>Rapporteurs :</i>	Prof. Alain BERNARD	Ecole Centrale de Nantes
	Prof. Daniel BRISSAUD	Institut National Polytechnique de Grenoble
	Prof. Lionel ROUCOULES	Art et Métiers ParisTech Aix-en-Provence
<i>Examineurs :</i>	Prof. Alain DEREUX	Université de Bourgogne
	Prof. Benoît EYNARD	Université de Technologie de Compiègne
	Prof. Sebti FOUFOU	Université de Bourgogne - NYU Abu Dhabi
	Prof. Samir LAMOURI	Art et Métiers ParisTech Paris
<i>Dir. de Recherche :</i>	Prof. Samuel GOMES	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Ce document a été réalisé conformément aux exigences de l'article 4 de l'arrêté du 23 novembre 1988 relatif à la procédure de candidature au diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches paru au Journal Officiel du 29 novembre 1988.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord les membres de mon jury d'Habilitation à Diriger des Recherches pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir évaluer mes travaux de recherche.

Ma reconnaissance va en premier lieu vers Monsieur Alain BERNARD, Professeur des Universités à l'Ecole Centrale de Nantes, Monsieur Daniel BRISSAUD, Professeur des Universités à Grenoble INP et Monsieur Lionel ROUCOULES, Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech Aix-en-Provence, pour avoir accepté de rapporter mes travaux.

J'exprime ma gratitude envers Monsieur Dimitris KIRITSIS, Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pour avoir présidé la soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches et pour ces conseils précieux tout au long de ma carrière.

Je remercie vivement les examinateurs Monsieur Alain DEREUX, Professeur des Universités et Directeur du Laboratoire ICB, pour sa confiance dans mon projet de recherche, Monsieur Sebti FOUFOU, Professeur des Universités à l'Université de Bourgogne et New York University Abu Dhabi, pour son travail d'évaluation et ses échanges scientifiques, Monsieur Samir LAMOURI, Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech Paris, pour sa confiance à mon égard, et Monsieur Benoît EYNARD, Enseignant-Chercheur à l'Université de Technologie de Compiègne pour son coaching paternel qui m'a permis d'appréhender les différents obstacles que l'on peut retrouver sur le parcours du métier de l'enseignant-chercheur.

J'adresse toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche, Monsieur Samuel GOMES, Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour son côté paternel, pour ses conseils scientifiques et sa confiance absolue en mon égard.

Je remercie chaleureusement l'ensemble du personnel du laboratoire ICB, et plus particulièrement le département COMM, pour m'avoir accueilli et fourni un environnement adéquat pour réaliser mes travaux de recherche.

Je remercie l'ensemble du personnel du département Génie Mécanique et Conception pour leur soutien à mes activités d'enseignement très régulièrement couplées aux divers travaux de recherche.

Je tiens également à remercier mes anciens doctorants, à savoir Elise, Bertrand et Germain. Une pensée paternelle va vers les doctorants que j'encadre actuellement dont Bingcong, Saoussen, Thibaut, Lucas et Monzer.

Enfin j'adresse une pensée toute particulière à ma famille, plus particulièrement à ma femme Aline, et à mes deux enfants Maxence et Hugo, à qui je dédie ce travail.

À Hugo, Maxence et Aline.

« La connaissance et les activités rationnelles constituent certainement la majeure partie de la recherche scientifique, mais non pas le tout. La part rationnelle de la recherche serait, de fait, vaine si elle n'était pas complétée par l'intuition, qui donne aux scientifiques de nouveaux aperçus et les rend créatifs. Ces aperçus sont soudains et, d'une manière caractéristique, surviennent non pas lorsqu'on est assis à une table de travail, à résoudre des équations, mais lorsqu'on se détend dans son bain, durant une promenade en forêt, sur la plage, etc. Durant ces périodes de relaxation après une activité intellectuelle concentrée, l'intuition semble prendre la relève et peut produire l'aperçu lumineux et soudain qui procure tant de joie et de délices au chercheur. »

[Fritjof Capra, *Le Tao de la Physique*, Paris, Sand, 1975]

Table des matières

Introduction générale	xiii
Table des figures	xv
Liste des tableaux	xix
Glossaire	xxi
Partie I Notice individuelle et rapport d'activité	1
Chapitre 1 Curriculum Vitæ	5
1.1 Etat civil	5
1.2 Situation actuelle	5
1.3 Parcours et diplômes	5
1.4 Mandats	6
1.5 Distinctions	7
Chapitre 2 Activité d'enseignement	9
2.1 Interventions pédagogiques	9
2.2 Responsabilités pédagogiques	11
2.2.1 Plateforme pédagogique	11
2.2.2 Unités de Valeur	12
2.2.3 Filière de spécialisation	12
2.3 Suivi pédagogique en entreprise	12
Chapitre 3 Activité de recherche	13
3.1 Rappel de la base scientifique de nos travaux	13
3.2 Introduction à notre projet scientifique	14
3.2.1 Conception proactive pour l'X (OP ₁)	15
3.2.2 Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée (OP ₂)	16
3.2.3 Formalisation et représentation des connaissances produit-process (OP ₃)	17
3.3 Bilan des publications scientifiques	18
3.4 Projets de recherche : participation et montage	19

3.5	Encadrements scientifiques	22
3.5.1	Encadrement de Master	22
3.5.2	Encadrement de Thèses	22
Chapitre 4 Rayonnement		27
4.1	Participation à des Groupes de Travail	27
4.2	Animation scientifique	27
4.3	Professeurs invités et collaborations internationales	28
4.4	Facteurs d'impact	29
Chapitre 5 Responsabilités collectives et administratives		31
5.1	Affiliation dans des sociétés savantes	31
5.2	Membre dans des comités de sélection MCF	31
5.3	Expertise dans des instances internationales et nationales	31
5.4	Appartenance à des comités éditoriaux internationaux	33
5.5	Membre de jury intermédiaire de thèse	33
5.6	Organisation d'évènements scientifiques	33
5.7	Gestion d'une <i>special issue</i> dans une revue internationale	34
5.8	Responsabilités administratives	35
Chapitre 6 Liste des publications scientifiques		37
6.1	Revue internationale à comité de lecture	37
6.2	Chapitres d'ouvrage international à comité de lecture	39
6.3	Conférences internationales à comité de lecture	39
6.4	Colloques nationaux à comité de lecture	41
Partie II Synthèse des travaux et projet de recherche		43
Chapitre 7 Contexte de recherche et positionnement scientifique		47
7.1	Enjeux industriels	47
7.2	Description générale de l'axe scientifique	48
7.3	Incubation de la thématique scientifique au cours du temps	50
Chapitre 8 Conception proactive pour l'X (OP₁)		55
8.1	La question d'intégration en conception	55
8.2	Cadre méthodologique DFX	56
8.2.1	Proactivité : de la nécessité de s'inspirer de la philosophie	56
8.2.2	Augmentation du contexte de conception par les prédictions	57
8.2.3	Incubateur de conception	58
8.3	Conception orientée assemblage	59
8.3.1	DAMON - Contexte augmenté et orienté assemblage	60
8.3.2	Requête et instanciation des connaissances	61

8.3.3	Implémentation et cas d'études	62
8.4	Conception orientée fabrication additive d'assemblage	67
8.4.1	Opportunités générées par la FA	67
8.4.2	Méthode PRIAM	68
8.4.3	Dérivation de l'architecture produit initiale	68
8.4.4	Définition du contexte de FA	70
8.4.5	Minimisation de l'architecture produit	70
8.4.6	Emergence de la géométrie des composants	72
8.4.7	Implémentation et cas d'études	72
8.5	Conception proactive pour l'impression 4D	76
8.5.1	Vers des produits transformables et adaptés à leur environnement	76
8.5.2	Matériaux fonctionnels/intelligents	77
8.5.3	Modélisation multi-matériaux à base de voxels	78
8.5.4	Sélection et distribution des matériaux intelligents	81
8.5.5	Développement d'un add-on dans Grasshopper : VoxSmart	82
8.5.6	Développement d'une machine dédiée : TITAN γ	83
8.6	Bilan de l'OP ₁	84
Chapitre 9 Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée (OP₂)		87
9.1	Enjeux hérités de la conception proactive pour l'X	87
9.2	Incubateur de conception en contexte PLM	88
9.3	Modélisation géométrique descendante d'espaces de conception	90
9.3.1	Description générale de l'approche SKL-ACD2	90
9.3.2	Héritage de l'approche SKL-ACD	91
9.3.3	Des squelettes d'interface aux volumes-enveloppes	93
9.3.4	Cas d'étude et implémentation	95
9.4	Chaîne PLM réconciliée	97
9.4.1	Référentiel de départ : le modèle multi-vues MUVOA	97
9.4.2	Spectre des nomenclatures du couple produit-process	99
9.4.3	Gestion des flux d'informations techniques	100
9.4.4	Développement d'une application <i>hub</i> : Pegasus	102
9.5	Bilan de l'OP ₂	105
Chapitre 10 Formalisation et représentation des connaissances produit-process (OP₃)		107
10.1	Vers une conception éternaliste de l'espace-temps	107
10.2	Théorie basée sur la méréotopologie spatio-temporelle	108
10.2.1	Base de la méréotopologie spatio-temporelle	108
10.2.2	Description générale de JANUS	110
10.2.3	Représentation qualitative de l'espace et du temps	112
10.2.4	Description spatio-temporelle	114
10.3	Développement de l'ontologie modulaire : PRONOIA 2	118

10.3.1	Approche ontologique ascendante : PRONOIA	119
10.3.2	Approche ontologique ascendante : PRONOIA 2	122
10.4	Bilan de l'OP ₃	130
Chapitre 11 Projet de recherche		131
11.1	Synthèse des opérations de recherche	131
11.2	La voie des systèmes transformables par impression 4D	132
11.3	Structuration de la thématique scientifique	134
Bibliographie		139

Introduction générale

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) vise à décrire, à un instant donné, l'ensemble de mes efforts scientifiques allant de ma naissance en tant que *chercheur*, puis *enseignant-chercheur* et enfin *enseignant-chercheur-encadrant*. Cet enchaînement de rôles, au cours de ces huit dernières années (2010 – 2019), m'a permis d'appréhender pleinement les caractéristiques clés de l'enseignant-chercheur d'aujourd'hui dans les contextes scientifique et industriel mondialisés [Leresche et al., 2009]. En effet, les systèmes de recherche et d'enseignement supérieur, que ce soit au niveau national voire international, soulèvent actuellement des défis sociétaux à couvrir afin de préparer l'activité industrielle de demain. Il devient impératif que l'enseignant-chercheur puisse inscrire ses activités dans ce sens.

Je m'attacherai donc à ces rôles successivement occupés afin de décrire la vision que j'ai construite et portée. Actuellement, l'enseignant-chercheur s'inscrit dans un système coordonné lui demandant d'être capable de fournir des résultats scientifiques à transférer dans l'enseignement supérieur et à valoriser dans l'industrie (voir Figure 1). Ceci ne peut se faire qu'à travers la recherche de financement (nous parlerons notamment d'ingénierie financière) et le montage de projets de recherche et de transfert, agrégeant à la fois chercheurs, institutions et industriels [Filos, 2017]. Nous soulignerons dans ce mémoire les actions de collaboration entre chercheurs, de recherche de financement, de participation à la vie des institutions, de valorisation de la recherche au sein des entreprises, de l'encadrement des doctorants et de transmission/enseignement auprès des étudiants.

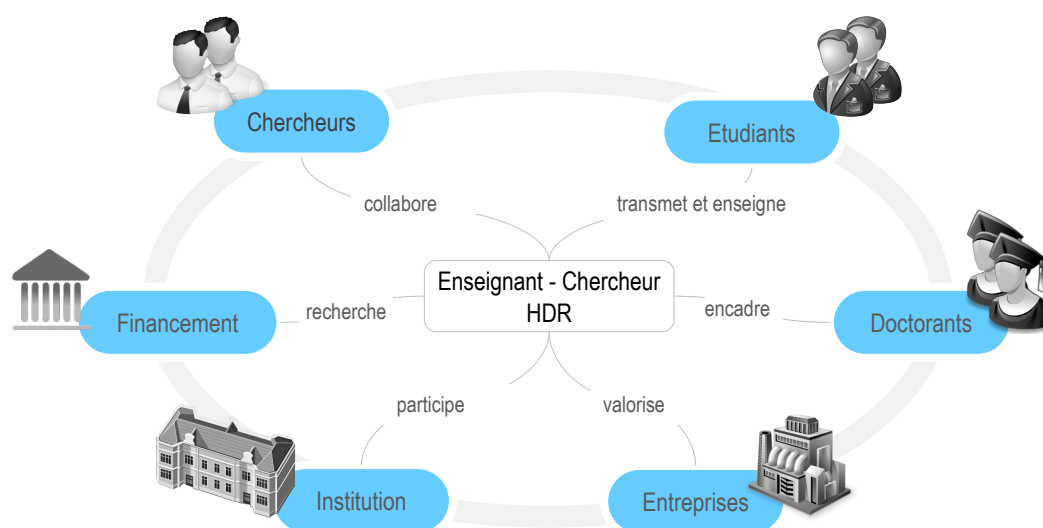


FIGURE 1 – L'enseignant-chercheur au sein du système scientifique actuel.

Ce mémoire, en tant que travail de maturité, apporte par conséquent une synthèse de mes activités associées à mes différents rôles occupés au sein du laboratoire LICP (Laboratoire des outils Informatiques pour la Conception et la Production) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en tant que postdocteur, puis du laboratoire IRTES-M3M (Institut de Recherche sur les Transport, l'Énergie et les So-

ciétés - Mécatronique, Méthodes, Modèles et Métiers), équipe INCIS (Ingénierie Numérique avancée pour la Conception Intégrée de Systèmes mécaniques) et du département d'enseignement Génie Mécanique et Conception (GMC) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) – mon *alma mater* – et plus récemment au sein du laboratoire ICB UMR CNRS 6303 (Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne), département COMM (Conception Optimisation Modélisation Mécanique) en tant que Maître de Conférences. L'ensemble de ce travail s'est effectué sous la direction de Samuel GOMES, Professeur des Universités, Directeur du département GMC et Responsable du département COMM de l'ICB à l'UTBM.

Le présent mémoire est structuré en **deux parties**.

La **première partie**, intitulée « Notice individuelle et rapport d'activité », présente ma notice individuelle décrivant mon curriculum vitæ, mes activités d'enseignement et de recherche, mes activités d'encadrement, mes publications scientifiques, mes relations industrielles et universitaires ainsi que mes activités administratives et d'animation de la recherche. Cette partie sera donc structurée en six chapitres.

La **seconde partie**, intitulée « Synthèse des travaux et projet de recherche », présente une synthèse de mes activités de recherche, portant sur la *conception proactive pour l'X*, la *modélisation géométrique avancée* et la *formalisation/représentation des connaissances produit-process*. Six chapitres constitueront cette partie afin de décrire :

- mon domaine de recherche et mon positionnement scientifique au sein de la communauté internationale, la communauté nationale et du laboratoire ICB ;
 - les efforts menés à travers différentes opérations de recherche cohérentes entre elles, allant d'une logique nationale (e.g. financement, spécialisation des régions, etc.) à supranationale (e.g. programmes-cadre, etc.) ;
 - mon projet de recherche d'avenir à dix ans s'intégrant dans une logique locale, nationale et internationale.
-

Table des figures

1	L'enseignant-chercheur au sein du système scientifique actuel.	xiii
3.1	Base scientifique issue des travaux de doctorat (UTBM) et de post-doc (EPFL).	14
3.2	Paradigme de l'ingénierie proactive [Demoly <i>et al.</i> , 2013c].	16
3.3	Emergence d'espaces de conception par une approche descendante de modélisation géométrique.	17
3.4	Associations entre les objets de l'espace et du temps via les relations spatiotemporelles [Gruhier <i>et al.</i> , 2017].	18
3.5	Répartition temporelle de la production scientifique.	19
3.6	Articulation des projets HERMES et PAN intégrant les problématiques de représentation des connaissances produit-process et de modélisation générative autour de l'impression 4D.	21
3.7	Répartition temporelle des encadrements de thèse depuis 2012.	25
3.8	Répartition des thèses au sein des opérations de recherche.	25
7.1	Aggrégation des opérations de recherche sur la base des travaux de thèse et de postdoc.	49
7.2	Déploiement des opérations de recherche au niveau de la région Bourgogne Franche-Comté.	52
7.3	Déploiement des opérations de recherche au niveau national (exorégional).	53
7.4	Déploiement des opérations de recherche sur le plan international.	53
8.1	Base philosophique choisie pour notre vision de la conception proactive pour l'X.	56
8.2	Scénarios de réutilisation des connaissances [Marconnet, 2017].	57
8.3	Cadre méthodologique de conception proactive pour l'X.	59
8.4	Cadre méthodologique DAMON.	60
8.5	Contexte augmenté et situations de conception assurant l'émergence du modèle géométrique.	61
8.6	Raisonnements autour des connaissances déclaratives et procédurales.	62
8.7	Raisonnement via les connaissances conditionnelles.	63
8.8	Elaboration des informations conceptuelles (nomenclature initiale dotée de de la liste des composants et des liaisons cinématiques) associées à la pince de désincarcération.	64
8.9	Génération des séquences d'assemblage admissibles et des opérations d'assemblage via l'application Pegasus.	64
8.10	Définition du contexte augmenté, requête de connaissances et instanciation en CAO.	65
8.11	Génération de trois solutions de conception en fonction de scénarios d'assemblage différents [Marconnet, 2017].	66
8.12	Distribution des connaissances instanciées via les situations de conception [Marconnet, 2017].	66
8.13	Logigramme décrivant partiellement la méthode PRIAM [Sossou <i>et al.</i> , 2018].	69
8.14	Processus de consolidation des composants encastrés [Sossou <i>et al.</i> , 2018].	71
8.15	Etapas permettant l'émergence de la géométrie [Sossou <i>et al.</i> , 2018].	72
8.16	Relations composant-à-composant avec leur surfaces fonctionnelles correspondantes.	73
8.17	Interfaces de Pegasus pour la définition (a) des relations cinématiques ainsi que (b) des surfaces fonctionnelles.	74
8.18	Etapas permettant l'émergence de la géométrie en environnement CAO.	74

8.19	Conception générative à base de structures en treillis d'une poignée appartenant à un serre-joint.	75
8.20	(a) Pré-traitement sous Cura et (b) impression en FDM sur imprimante Anet 8.	75
8.21	Séquence de programmation thermo-mécanique de PMFs [Jian <i>et al.</i> , 2018].	77
8.22	Classification des matériaux intelligents [Sossou, 2019].	78
8.23	(a) Modèle voxelisé et (b) vue explosée d'un voxel avec ses voxels adjacents [Sossou <i>et al.</i> , 2018].	79
8.24	Principes de la modélisation à base de voxels [Sossou <i>et al.</i> , 2019b].	80
8.25	Exemple de distributions d'un matériau actif (#1 en rouge) au sein d'un matériau inerte (#0 en bleu) [Sossou <i>et al.</i> , 2019b].	81
8.26	Interface de VoxSmart sous Grasshopper [Sossou <i>et al.</i> , 2019b].	82
8.27	Modélisation et simulation d'une valve sous VoxSmart [Sossou <i>et al.</i> , 2019].	82
8.28	(a) Distributions originale et calculée à l'état initial et (b) visualisation des comportements associés issus de VoxSmart au sein de Rhinoceros [Sossou <i>et al.</i> , 2019b].	83
8.29	Génération du programme au format G-code sous l'environnement Grasshopper et dépôt de PMF en résine via notre machine prototype combinant DIW et photopolymérisation, TITAN γ	84
8.30	Synoptique des contributions scientifiques issues de l'OP ₁	85
9.1	Schéma général de l'incubateur de conception en contexte PLM [Gruhier <i>et al.</i> , 2017]	89
9.2	Logigramme de l'approche SKL-ACD2.	91
9.3	Approche SKL-ACD : du graphe des liaisons aux squelettes d'assemblage.	92
9.4	(a) Graphe des squelettes d'interface et (b) représentation géométrique associée.	94
9.5	(a) Graphe des surfaces fonctionnelles et (b) représentation géométrique associée.	94
9.6	(a) Allocation de volumes-enveloppes et (b) modélisation solide des composants.	95
9.7	(a) Graphe des squelettes d'assemblage et d'interface et (b) représentation géométrique associée pour l'étude de l'étai.	96
9.8	Interfaces de l'application Pegasus CAD Assistant montrant la définition des squelettes (a) d'assemblage et (b) d'interface.	96
9.9	Diagramme de classe UML du modèle MUVOA [Demoly <i>et al.</i> , 2010].	98
9.10	Introduction de la BOR comme structure de réconciliation entre les nomenclatures des systèmes PDM, MPM et CAO [Gruhier <i>et al.</i> , 2017].	99
9.11	Cartographie des vues au sein des trois domaines et des flux d'informations associés [Gruhier <i>et al.</i> , 2017].	101
9.12	Interface de Pegasus dédiée à la définition des relations composant-composant.	102
9.13	Architecture MVVM de Pegasus [Demoly <i>et al.</i> , 2013a].	103
9.14	Intégration de Pegasus CAD Assistant et du gestionnaire d'ontologie.	104
9.15	Synoptique des contributions scientifiques issues de l'OP ₂	105
10.1	Représentation des primitives méréotopologiques spatiales [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	109
10.2	Théorie JANUS – Couche sémantique et logique en conception proactive pour l'assemblage.110	
10.3	Représentation géométrique des squelettes d'assemblage k (a) et d'interface f (b) [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	112
10.4	Cartographie des évolutions en conception [Gruhier <i>et al.</i> , 2016].	115
10.5	Représentation de la primitive CylindricalOP au sein d'un graphe spatio-temporel [Gruhier <i>et al.</i> , 2016].	118
10.6	Modèle ontologique PRONOIA représenté sous Protégé [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	119
10.7	Vue en coupe du cas d'étude [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	121
10.8	Réseau des instances de l'ontologie PRONOIA [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	122
10.9	Ontologie PRONOIA2 modulaire basée sur JANUS [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	122
10.10	Ontologie modulaire PRONOIA [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	124
10.11	Modèle d'application de l'ontologie de domaine [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	125
10.12	Description spatio-temporelle des relations durant l'assemblage des composants du produit [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	127

10.13	Evolution des relations composant-composant représentées géométriquement à l'aide de l'outil CAO CATIA V5 [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	128
10.14	Ontologie d'application associée au cas d'étude [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	129
10.15	Synoptique des contributions scientifiques issues de l'OP ₃	130
11.1	Synoptique des contributions scientifiques.	132
11.2	Evolution des types de produit et des enjeux industriels et scientifiques associés.	133
11.3	« Cycle du Hype » sur l'évolution des technologies émergentes [Gartner, 2018].	134
11.4	Articulation des projets ISITE BFC HERMES et Région BFC PAN.	135
11.5	Portée du projet ANR JCJC LYRA.	136

Liste des tableaux

2.1	Récapitulatif des enseignements dispensés à l’UTBM.	9
2.2	Aspect mis en avant par la filière CDP vis-à-vis des 3 autres filières du département GMC.	12
3.1	Récapitulatif des publications scientifiques ;	19
3.2	Récapitulatif des projets financés entre 2009 et 2019.	20
4.1	Indicateurs de « performances » scientifiques (Mars 2019).	29
5.1	Evènements scientifiques organisés entre 2009 et 2016.	34
7.1	Macro-positionnement des mes différentes opérations de recherche.	50
7.2	Synthèse du développement opérationnel de mes OPs à différentes échelles.	52
8.1	Liaisons cinématiques et technologiques réalisées par FA.	68
8.2	Minimisation de l’architecture via les niveaux de consolidation de composants	70
9.1	Définitions des entités géométriques développées dans l’approche SKL-ACD2.	90
9.2	Définition des squelettes d’assemblage basées sur les relations cinématiques [Demoly <i>et al.</i> , 2011c].	92
9.3	Définition des éléments géométriques des espaces de conception en fonction des liaisons cinématiques.	93
9.4	Liste des relations utilisées dans l’approche combinée PROMA-MERCURY	98
9.5	Lien entre les domaines, vues, acteurs métier et objets techniques	100
10.1	Opérateurs fondamentaux de la méréotopologie [Smith, 1996 ; Demoly <i>et al.</i> , 2012]	109
10.2	Description des primitives méréotopologiques spatiales [Demoly <i>et al.</i> , 2012]	109
10.3	Description des primitives méréotopologiques temporelles [Gruhier <i>et al.</i> , 2016].	111
10.4	Descriptions méréotopologiques associées aux liaisons cinématiques [Demoly <i>et al.</i> , 2012]	113
10.5	Types d’assemblage basés sur trois pièces [Demoly <i>et al.</i> , 2011].	113
10.6	Description méréotopologique des primitives de changement en conception [Gruhier <i>et al.</i> , 2016].	116
10.7	Description méréotopologique des primitives des MIP liaisons cinématiques [Gruhier <i>et al.</i> , 2016].	117
10.8	Légende pour la définition du graphe spatio-temporel [Gruhier <i>et al.</i> , 2016].	118
10.9	Extrait des règles DL implémentées dans PRONOIA [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	120
10.10	Extrait des règles SWRL implémentées dans PRONOIA [Demoly <i>et al.</i> , 2012].	121
10.11	Règles DL implémentées dans PRONOIA2 [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	126
10.12	Règles DL implémentées dans PRONOIA2 (bis) [Gruhier <i>et al.</i> , 2015].	126

Glossaire

ACSP	Atelier Coopératif de Suivi de Projet
AOD	Assembly Oriented Design
AMF	Alliages à Mémoire de Forme
ASDA	Assembly Sequence Definition Algorithm
ASP	Assembly Sequence Planning
BOP	Bill of Processes
BOR	Bill of Relations
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CAPP	Computer-Aided Assembly Process Planning
DAMON	Design context AugMentatiON framework
DFA	Design for Assembly
DFAM	Design for Additive Manufacturing
DFX	Design For X
DDL	Degré De Liberté
DIW	Direct Ink Write
DL	Description Logic
eBOM	engineering Bill Of Materials
FDM	Fused Deposition Modeling
FGM	Functionnally Graded Material
JANUS	Joined AwareNess and Understanding in assembly-oriented deSign with mereotopology
mBOM	manufacturing Bill Of Materials
MERCURY	a ManagEment appRoaCh of prodUct and process Relationships in assembly and design phases
MPM	Manufacturing Process Management
MUVOA	MUltiple Viewpoints Oriented Assembly
MVVM	Model View ViewModel
OWL	Web Ontology Language
PDM	Product Data Management
Pegasus	Product design Engineering based on Generative Assembly SeqUenceS planning
PLM	Product Lifecycle Management
PMF	Polymère à Mémoire de Forme
POC	Proof-of-Concept
PRIAM	PRoactive design for Additive Manufacturing
PROMA	PROduct relationships Management Approach
PRONOIA	PROduct relatioNships description based On mereotopologIcAl theory
SKL-ACD	SKeLeton-based Assembly Context Definition
SLA	Stéréolithographie
STM	Spatio-Temporal Mereotopology
SWRL	Semantic Web Rule Language
UML	Unified Modeling Language

Première partie

Notice individuelle et rapport
d'activité

Contenu de la Partie

Chapitre 1 Curriculum Vitæ	5
1.1 Etat civil	5
1.2 Situation actuelle	5
1.3 Parcours et diplômes	5
1.4 Mandats	6
1.5 Distinctions	7
Chapitre 2 Activité d'enseignement	9
2.1 Interventions pédagogiques	9
2.2 Responsabilités pédagogiques	11
2.3 Suivi pédagogique en entreprise	12
Chapitre 3 Activité de recherche	13
3.1 Rappel de la base scientifique de nos travaux	13
3.2 Introduction à notre projet scientifique	14
3.3 Bilan des publications scientifiques	18
3.4 Projets de recherche : participation et montage	19
3.5 Encadrements scientifiques	22
Chapitre 4 Rayonnement	27
4.1 Participation à des Groupes de Travail	27
4.2 Animation scientifique	27
4.3 Professeurs invités et collaborations internationales	28
4.4 Facteurs d'impact	29
Chapitre 5 Responsabilités collectives et administratives	31
5.1 Affiliation dans des sociétés savantes	31
5.2 Membre dans des comités de sélection MCF	31
5.3 Expertise dans des instances internationales et nationales	31
5.4 Appartenance à des comités éditoriaux internationaux	33
5.5 Membre de jury intermédiaire de thèse	33
5.6 Organisation d'événements scientifiques	33
5.7 Gestion d'une <i>special issue</i> dans une revue internationale	34
5.8 Responsabilités administratives	35
Chapitre 6 Liste des publications scientifiques	37
6.1 Revues internationales à comité de lecture	37
6.2 Chapitres d'ouvrage international à comité de lecture	39
6.3 Conférences internationales à comité de lecture	39
6.4 Colloques nationaux à comité de lecture	41

Chapitre 1

Curriculum Vitæ

« *Nous aurons le destin que nous aurons mérité.* » [Albert Einstein]

Ce chapitre décrit les différents aspects de mon profil personnel, notamment mon état civil, ma situation actuelle, mes formations et diplômes obtenus. Il a pour unique objectif de refléter mes activités conduites au cours des dix dernières années.

1.1 Etat civil

Nom : DEMOLY
Prénoms : Frédéric, Patrick, Marcel
Nationalité : Française
Date et lieu de naissance : 26 avril 1983 (35 ans) à Montbéliard (25)
Situation familiale : Marié, 2 enfants



1.2 Situation actuelle

Maître de Conférences depuis le 1^{er} septembre 2011, CN échelon 5, section CNU 60.
Responsable de la Filière d'enseignement CDP¹ au sein du département GMC depuis 2012.
Directeur-Adjoint du Pôle S.mart (anciennement AIP-Priméca) Franche-Comté depuis 2014.
Co-Animateur du GT IngéFutur (anciennement IS3C²) du GDR MACS³ (CNRS) depuis 2014.

1.3 Parcours et diplômes

1^{er} Septembre 2012 Maître de Conférences titulaire (échelon 5) à l'UTBM, ICB UMR 6303, Département Génie Mécanique et Conception (GMC).
2011 – 2012 Maître de Conférences stagiaire à l'UTBM, Laboratoire IRTES-M3M, Département GMC.

1. Conception et Développement de Produits.
2. Groupe de Travail sur l'Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie produit.
3. Groupe de Recherche Modélisation Analyse et Conduite de Systèmes dynamiques.

- 26 Janvier 2011 Obtention de 2 Qualifications dans les sections 60 (Mécanique, Génie Mécanique et Génie Civil) et 61 (Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal) du CNU.
- 2010 – 2011 Etudes post-doctorales à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire des outils Informatiques pour la Conception et la Production (LICP), Directeurs : Paul XIROUCHAKIS et Dimitris KIRITSIS.
- 16 Juillet 2010 Obtention d'une Thèse de Doctorat de l'UTBM, Laboratoire M3M, spécialité Mécanique. Titre : « *Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage* ».
- Jury de thèse :
- Prof. Michel TOLLENAERE, *Président*, INPG, section 61 ;
 - Prof. Alain BERNARD, *Rapporteur*, École Centrale de Nantes, section 60 ;
 - Prof. Luc MATHIEU, *Rapporteur*, IUT Cachan, Université Paris-Sud XI, section 60 ;
 - Prof. Louis RIVEST, *Examineur*, École de Technologie Supérieure de Montréal, Canada ;
 - Dr. Xiu-Tian YAN, *Examineur*, University of Strathclyde, Ecosse ;
 - M. Hugo FALGARONE, *Examineur*, EADS, Innovation Works ;
 - Dr. Benoît EYNARD, HDR, *Co-directeur de thèse*, Université de Technologie de Compiègne, sections 60/61 ;
 - Prof. Samuel GOMES, *Directeur de thèse*, UTBM, section 60.
- 2007 – 2010 Doctorant au laboratoire M3M de l'UTBM.
Financement : Allocation de Recherche de la Région Franche-Comté.
- 2004 – 2007 Obtention du Diplôme d'Ingénieur en Génie Mécanique et Conception de l'UTBM.
- 2002 – 2004 Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles – CPGE,
Math Spé : Physique Technologie (PT), Math Sup : Physique Technologie
Science de l'Ingénieur (PTSI), Lycée Raoul Follereau, Belfort.
- 2002 Obtention du Baccalauréat Scientifique – Science de l'Ingénieur, Lycée Viette à Montbéliard.

1.4 Mandats

- 2016 – 2020 Membre élu au Conseil Scientifique de l'UTBM.
- 2012 – 2016 Membre élu au Conseil d'Administration de l'UTBM.
- 2014 – 2018 Membre élu au Bureau de Département GMC de l'UTBM.
- 2013 – 2017 Membre élu au Conseil du Laboratoire IRTES-M3M.
- 2017 – 2021 Membre élu au Conseil Scientifique du Laboratoire ICB de l'UBFC.
- 2014 – 2022 Membre nommé au Conseil de Gestion S.mart de Franche-Comté.

2017 – 2021 Membre nommé au Conseil du Laboratoire ICB.

1.5 Distinctions

Titulaire d'une Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR) sur la période 2017-2021.

Titulaire d'une Prime d'Excellence Scientifique (PES) sur la période 2013-2017.

Top 10% Best Reviewed Papers à la conférence internationale ICED 2017, Vancouver, BC, Canada.

Second Best Paper Award à la conférence internationale PLM 2012, Montréal, Canada.

Best Presentation Award à la conférence internationale APMS 2014, Ajaccio, France.

Chapitre 2

Activité d'enseignement

« C'est le rôle essentiel du professeur d'éveiller la joie de travailler et de connaître. » [Albert Einstein]

2.1 Interventions pédagogiques

Mes interventions pédagogiques ont débuté en 2007 en tant qu'*Allocataire de Recherche* à l'UTBM. Mon poste était alors rattaché à deux départements d'enseignement : le département Génie Mécanique et Conception (GMC, site de Sévenans) et le département Ergonomie Design et Ingénierie Mécanique (EDIM, site de Montbéliard). De 2007 à 2010, j'ai donc contribué ponctuellement au développement de nouvelles unités de valeur (UVs) au sein du département EDIM et au soutien d'UVs existantes au sein du département GMC. Au cours de mes *Etudes Post-doctorales* à l'EPFL, j'ai également contribué dans des enseignements relatifs à la conception pour la fabrication.

Tableau 2.1 – Récapitulatif des enseignements dispensés à l'UTBM.

UV	Resp.	Intitulé	CM	TD	TP	ETD
Formation de spécialisation GMC (Filière - Niveau Master)						
CP51	☒	PLM and design for X	16	84	120	120
CP58		Lean product development		20	24	44
Formation par apprentissage CoMET GMC						
CP70	☒	Conception Assistée par Ordinateur	10	10	16	41
CP72	☒	Collaborative engineering and PLM	16	10	10	60
Formation Continue						
Maths		Mathématiques		30		30

Actuellement, ma fonction de *Maître de Conférences* me permet d'accompagner au mieux en enseignements les élèves-ingénieurs UTBM, au niveau des bases branches (niveau Licence) et au niveau des filières (niveau Master). Confronté, par conséquent, à des étudiants de différents niveaux (i.e. troisième, quatrième et cinquième années du cycle d'ingénieur), pour lesquels la conception de systèmes mécaniques occupe une place importante dans leur formation d'ingénieur, j'ai dû adapter mes interventions en y apportant un degré de progression aussi bien technique que scientifique. Ceci m'a permis de percevoir et de comprendre différents besoins pédagogiques, pour lesquels j'ai pu mettre en œuvre des approches et des stratégies pédagogiques d'enseignement et d'apprentissage appropriées [Torney & Hardebolle, 2017]. Cette expérience en enseignement peut être résumée par le Tableau 2.1, dans lequel j'ai classé le volume

de mes interventions pédagogiques par type de formation, UV enseignée, ainsi que les Cours Magistraux (CM), les Travaux Dirigés (TD) et les Travaux Pratiques (TP) homogénéisés en Equivalent TD (ETD).

Au total, mon service d'enseignement s'étend sur deux semestres universitaires (Automne et Printemps) au sein du département GMC et de la formation continue, représentant ainsi un volume d'enseignement à hauteur de 288 ETDs en présentiel, et satisfaisant intégralement mon service statutaire.

De manière plus détaillée, j'adresse ci-après un descriptif des UVs enseignées au sein du département GMC de l'UTBM.

PLM and Design for 'X' (CP51) : cette UV, dispensée en Anglais et dont je suis le responsable depuis 2012, a pour objectif de sensibiliser les élèves-ingénieurs aux principes de gestion d'informations techniques du couple produit-process dans un contexte d'ingénierie collaborative, afin d'acquérir les bases d'une démarche PLM et de conception pour l'X (Design for X). Les méthodologies de gestion avancée de la maquette numérique (CATIA V5 et V6), de conception à base d'algorithmes génératifs (Rhino/Grasshopper), de gestion des données techniques du produit (ACSP, Notixia PDM-MPM et ENOVIA V6), de gestion de configuration, de gestion des modifications, ainsi que la gestion de gammes métier (fabrication et assemblage notamment) sont adressées et implémentées dans les outils associés.

Lean product development (CP58) : l'objectif de cette UV (également réalisée en Anglais) est de sensibiliser les élèves-ingénieurs à la gestion des connaissances en conception, de connaître les bases permettant d'acquérir et de modéliser les connaissances sur une organisation et ses métiers, et d'acquérir dans un contexte plus large les méthodes et outils d'ingénierie à base de connaissances (KBE). Un travail sur la représentation des connaissances (réseaux sémantiques), des processus métiers, et le raisonnement associé, est adressé dans ce module. De plus, une initiation aux outils de KBE (Kadviser) et au développement d'application métier liant systèmes experts à propagation de contraintes et CAO avancée est abordée.

Conception Assistée par Ordinateur (CP70) : l'objectif de cette UV, dont je suis le responsable dans le cadre de la formation par apprentissage CoMET⁴, est de sensibiliser les apprentis-ingénieurs aux méthodes de modélisation dans les systèmes avancés en CAO. Les apprentis sont donc initiés à différentes représentations des modèles en CAO, mais également à la géométrie et la topologie des modèles. La prise en compte de règles métiers pour la définition de modèles intelligents est abordée. Les connaissances acquises sont mises à l'épreuve dans le cadre de projet, où les étudiants devront modéliser des systèmes mécaniques.

Collaborative engineering and PLM (CP72) : Cette UV rapporte les mêmes objectifs que l'UV CP51 mais adaptée à des interventions plus denses dédiées à des apprentis-ingénieurs.

Mathématiques (Cycle préparatoire FONTANET de l'UTC⁵) : Cette matière aborde les programmes de remise à niveau en mathématiques, sur lesquels mes interventions s'effectuent au niveau des chapitres suivants : matrices et déterminants, intégrales curvilignes (théorèmes de Green-Riemann), les intégrales triples, les intégrales de surface (théorèmes intégraux).

4. Conception Mécanique pour l'Energie et les Transports.

5. Université de Technologie de Compiègne.

Face aux besoins industriels en perpétuelle évolution, je participe actuellement au montage d'une nouvelle UV sur l'intégration de la fabrication additive en conception. Celle-ci aura pour objectif de transférer directement nos résultats de recherche auprès des élèves-ingénieurs.

Design and modelling for additive manufacturing (CP55) : cette UV, dispensée en Anglais, a pour objectif de sensibiliser les élèves-ingénieurs aux libertés étendues apportées par les technologies de la fabrication additive mais également aux connaissances et contraintes métier à prendre en compte en conception. Pour ce faire, ce module apportera des outils pour l'aide à la décision, la conception et la modélisation géométrique et l'optimisation multi-physique composant ainsi une chaîne numérique intégrée. Une ouverture vers l'impression 4D sera abordée.

2.2 Responsabilités pédagogiques

Depuis 2011, j'ai été, de manière générale, impliqué dans le montage d'un système d'enseignement qui se veut cohérent et efficace par rapport aux contraintes industrielles d'aujourd'hui tout en intégrant les derniers résultats de recherche publiés dans le domaine. C'est donc à différents niveaux d'enseignement que mes efforts ont été portés, notamment au niveau de la spécialisation et de la formation par apprentissage par l'introduction d'une plateforme pédagogique transversale.

2.2.1 Plateforme pédagogique

A partir du semestre d'automne 2011, j'ai pu m'investir en tant que responsable de la plateforme pédagogique « *Plateforme d'ingénierie collaborative* », où un budget pratiquement constant (à hauteur de 20k€/an) m'est affecté. Il s'agit notamment d'organiser les achats matériels informatiques, de logiciels et les formations associées afin de permettre aux UVs d'être en adéquation avec les attentes industrielles. Plus particulièrement, ce budget nous a permis d'acquérir les outils suivants :

- Notixia eShop⁶ : système MPM (Manufacturing Process Management) permettant de gérer l'ensemble des données associées aux gammes métiers (assemblage, fabrication, production, etc.) ;
- 3D PartFinder⁷ : outil de recherche de similarités géométriques pour la conception routinière de composants sous CATIA V5 par exemple ;
- Audros⁸ : système PDM (Product Data Management) qui vise à gérer l'ensemble des données techniques associées à la définition du produit ;
- PLM V6 for Academia (R2013X)⁹ : suite d'outils incluant PLM Discover, CATIA Design Master et ENOVIA Master, afin de préparer le département GMC au passage à la plateforme V6. Cet achat s'est effectué conjointement avec l'UTC et l'Université de Technologie de Troyes (UTT) via le réseau AIP-Priméca. Plus récemment, j'ai mis en place une équipe pilote pour migrer les divers sites de l'UTBM vers la plateforme 3DEXPERIENCE ;
- DFMPPro¹⁰ : outil d'évaluation et de reconception tenant compte des contraintes issues des différents procédés de fabrication et d'assemblage. L'outil est commercialisé par Geometric DFX ;
- Rhinoceros + Grasshopper¹¹ : outil de modélisation géométrique associé à un éditeur de modélisation algorithmique.

Ce renforcement de la chaîne numérique est accompagné de la rénovation d'une salle informatique, afin de la transformer en plateforme d'ingénierie collaborative orientée fabrication (i.e. type FabLab). Une partie du budget a été donc consacrée à l'achat de vidéoprojecteurs, d'écrans de projection, de mobilier, etc. Une aide a pu également être allouée par le pôle S.mart (anciennement AIP-Priméca) pour l'achat de stations de travail et de machines de fabrication additive thermoplastiques.

6. <http://www.witlaken.com/fr/industriel/>

7. <http://www.3dpartfinder.com>

8. <http://www.audros.fr/en/>

9. <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/3dexperience/>

10. <http://dfmpro.geometricglobal.com>

11. <http://www.grasshopper3d.com>

2.2.2 Unités de Valeur

Au cours du semestre de Printemps 2012, j'ai participé à la réforme en profondeur de l'UV CP51, afin d'y intégrer plusieurs résultats de mes activités de recherche dans le domaine couvert. Cette réforme, qui est décrite en détail dans les sections ci-après, a débuté en 2012 et a demandé un investissement complémentaire au cours des trois dernières années. C'est dans ce contexte que le directeur du département a décidé de me nommer Responsable de l'UV CP51 à partir de Septembre 2012. A l'heure actuelle, mes responsabilités s'étendent également à d'autres UVs telles que CP70 et CP72 (voir le Tableau 2.1).

2.2.3 Filière de spécialisation

Ensuite s'est enchaînée ma nomination en tant que responsable de la filière « *Conception et Développement de Produit – CDP* », suite à l'avis favorable du Bureau de Département GMC, a été officialisée en Juillet 2012. Cette mission consiste à participer de manière active et constructive aux différentes réformes du département GMC. L'objectif principal de ma mission est le renforcement scientifique et technique des profils étudiants inscrits dans la filière par la considération du produit dans son cycle de vie (voir Tableau 2.2). Ceci permet aux étudiants de non seulement maîtriser les méthodes de conception et développement des produits, mais également d'assurer la robustesse de leur conception par la prise en compte de contraintes métier (e.g. fabrication, assemblage, désassemblage, recyclage, etc.). Ainsi, il s'agit de renforcer les profils scientifiques et techniques des étudiants tout en maintenant constant le nombre d'étudiants dans la filière. Cette responsabilité m'a également permis d'ajuster et d'équilibrer les différentes UVs, afin d'adapter les profils étudiants vis-à-vis des attentes industrielles actuelles. Cet effort a contribué à un réel rayonnement et attractivité de la filière CDP comme l'illustre le Tableau 2.2 ci-dessous.

Tableau 2.2 – Aspect mis en avant par la filière CDP vis-à-vis des 3 autres filières du département GMC.

Filière		Aspect concerné du produit	Effectif moyen
Acronyme	Nom		
CSM	Conception de Systèmes Métroniques	Couplage mécanique et électro-nique	25
SMART	Sciences des Matériaux Appliqués aux Projets Technologiques	Comportement mécanique des matériaux	20
MOST	Modélisation et Optimisation de Systèmes Thermomécanique	Simulation du comportement mécanique	40
CDP	Conception et Développement de Produits	Intégration des métiers en conception	110

2.3 Suivi pédagogique en entreprise

Ma mission a également consisté à faire du suivi d'étudiants en stage technicien supérieur (ST41), projet de fin d'études (ST51) et projets en alternance (ST71, ST81 et ST91), allant de la visite en entreprise, en stage ou en apprentissage, aux conseils techniques sur leurs activités au sein de l'entreprise. Je supervise ainsi, chaque année, environ 8 étudiants répartis entre les semestres d'automne et de printemps.

Chapitre 3

Activité de recherche

« Un arbre d'une grande circonférence est né d'une racine aussi déliée qu'un cheveux. » [Lao-Tseu]

3.1 Rappel de la base scientifique de nos travaux

Entre 2007 et 2010, ma thèse s'est inscrite dans les domaines de la conception intégrée et de la gestion d'informations techniques, plus particulièrement centrée sur le produit et sa séquence d'assemblage [Demoly, 2010]. Nos travaux ont consisté tout d'abord à la mise en place d'un modèle multi-vues, baptisé MUlti-Vues Orienté Assemblage (MUVOA) [Demoly et al., 2010], visant à cartographier les données-informations-connaissances dans les domaines du produit et du processus d'assemblage pour la définition, la propagation et la traçabilité des informations du couple produit-process (cf. ① de la Figure 3.1). Un ensemble de vues interdépendantes (i.e. fonctionnelle, comportementale, structurelle, géométrique, technologique et contextuelle) a donc été défini en fonction des profils (i.e. rôle, préoccupation, termes métier, processus métier, etc.) des acteurs métier impliqués dans les problématiques de conception orientée assemblage, à savoir l'architecte produit, le gammiste, le concepteur et l'expert process.

Sur la base de ce modèle, un cadre méthodologique, appelé Proactive ASsembly Oriented DEsign (PASODE), a été proposé [Demoly et al., 2011a], ceci afin de définir une séquence d'assemblage réalisable durant les phases préliminaires du processus de développement, et de l'exploiter pour définir un contexte d'assemblage à base de squelettes dans la vue géométrique produit. De ce fait, le cadre méthodologique PASODE regroupe trois approches, telles que :

- l'approche basée sur l'algorithme ASDA (Assembly Sequence Definition Algorithm) [Demoly et al., 2010b, 2011b] et dédiée à la définition et la planification de séquences d'assemblage en phases préliminaires du processus de développement des produits (cf. ② de la Figure 3.1) ;
- l'approche appelée SKL-ACD (SKeLeton-based Assembly Context Definition) [Demoly et al., 2011c] et portée sur la définition d'un contexte d'assemblage à base de squelettes géométriques (cf. ③ de la Figure 3.1) ;
- l'approche dénommée PROMA (Product Relationships Management Approach) [Demoly et al., 2012] et consacrée à la gestion des relations du produit à différents niveaux d'abstraction en contexte PLM (cf. ④ de la Figure 3.1).

Le modèle MUVOA ainsi que le cadre méthodologique PASODE ont été mis en œuvre dans un outil informatique appelé Pegasus¹² [Demoly et al., 2013], situé à l'interface des systèmes PLM (Product Lifecycle Management) associés à la gestion des informations techniques du couple produit-process, tels que les systèmes PDM (Product Data Management), MPM (Manufacturing Process Management) et CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Parmi les cas d'applications industrielles, nous avons collaboré avec

12. Product dEsign enGineering based on Assembly SeqUences Planning.

l'entreprise FAURECIA Exhaust Systems, l'entreprise EADS (European Aeronautics Defense and Space company) Innovation Works et l'entreprise MABI.

Ces premiers travaux de recherche ont permis d'établir une base scientifique qui a pu être consolidée et enrichie lors de mes études postdoctorales à l'EPFL entre 2010 et 2011. En effet, la vision, portée par le laboratoire LICP (appelé maintenant ICT for Sustainable Manufacturing Group – ICT4M¹³) sur les technologies sémantiques appliquées à la conception et l'industrialisation des systèmes [Matsokis & Kiritsis, 2010; Kiritsis, 2013], m'a été d'une aide précieuse afin d'élaborer une formalisation logique et sémantique des objets techniques en conception intégrée de systèmes mécaniques. Plus précisément, une approche ainsi qu'une implémentation ontologique – baptisée PRONOIA¹⁴ (PROduct relatiONships description based On mereotopologicAl theor) [Demoly *et al.*, 2012] – ont été proposées dans le but d'apporter une description mathématique des relations d'assemblage du produit basée sur la méréotopologie [Leśniewski, 1982], théorie de description logique de premier ordre couplant méréologie et topologie (cf. ⑤ de la Figure 3.1). Le méréologie ici représente des axiomes formels qui traitent des relations de la partie et du tout [Smith, 1996].

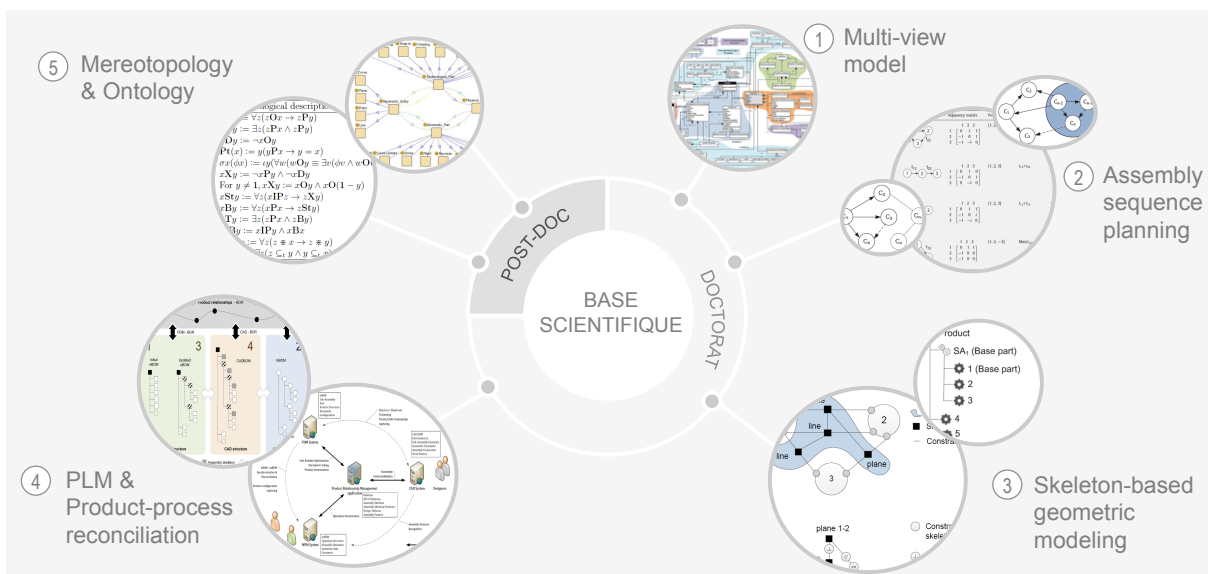


FIGURE 3.1 – Base scientifique issue des travaux de doctorat (UTBM) et de post-doc (EPFL).

3.2 Introduction à notre projet scientifique

Le présent projet de recherche s'inscrit, d'une manière générale, en accord avec cette base scientifique et également dans le périmètre scientifique du département COMM du laboratoire ICB, qui vise notamment à *promouvoir l'ingénierie à base de connaissances métier afin d'améliorer la productivité en conception collaborative de systèmes mécaniques*. C'est dans ce contexte que je participe, de manière active, au développement d'un des axes de recherche du département, intitulé :

« Intégration proactive des métiers en conception et formalisation/représentation des connaissances spatio-temporelles associées »

L'intérêt, porté par cette thématique de recherche, est d'obtenir des gains en compréhension, sensibilisation et efficacité en conception par la prise en compte de la dynamique spatio-temporelle inhérente à la

13. <https://ict4sm.epfl.ch>

14. PRONOIA était une nymphe Okaenid du mont Parnassos à Phokis (Grèce centrale). Elle était la femme du Titan Prométhée et la déesse de la prévoyance.

définition conjointe du couple produit-process. Pour ce faire, nos efforts de recherche s'articulent autour de trois opérations de recherche (OPs), que nous pouvons décliner de la manière suivante :

- OP₁ Conception proactive pour l'X** – Opération visant à considérer la définition de gammes métier (fabrication additive et assemblage notamment) lors de la phase de conception préliminaire, afin d'injecter judicieusement les connaissances métier jusqu'en phase de conception détaillée, sensibilisant ainsi les ingénieurs-concepteurs aux métiers dits « critiques » situés en aval.
- OP₂ Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée** – Opération visant à définir, de manière avancée et descendante, des espaces de conception à différents niveaux d'abstraction (i.e. squelettes, surfaces fonctionnelles, volume-enveloppes, etc.) en environnement CAO (Conception Assistée par Ordinateur), et à réconcilier les informations produit-process au sein des systèmes PLM comme support aux activités des architectes produit-process et concepteurs ;
- OP₃ Formalisation et représentation des connaissances spatio-temporelles produit-process** – Opération visant à décrire qualitativement, d'un point de vue logique et sémantique, l'évolution spatio-temporelle des objets de conception au cours de leur élaboration mais également à travers leurs processus situés en aval.

Les sous-sections ci-après introduisent les différentes opérations de recherche associées à notre thématique de recherche.

3.2.1 Conception proactive pour l'X (OP₁)

Le contexte ultra-compétitif actuel, dans les domaines de l'industrie, soulève des problématiques d'exploitation efficace et de préservation pérenne du patrimoine intellectuel des services et des acteurs métier impliqués dans les entreprises concernées. Les phases identifiées comme stratégiques et critiques pour garantir un produit bien équilibré – c'est-à-dire, un produit prenant en compte, de manière uniforme, l'ensemble des contraintes de son cycle de vie pour un coût et un cycle optimum – sont les phases de conception et de définition de gammes métier, intrinsèquement liées.

La phase de conception nécessite de pouvoir prendre en considération l'ensemble des contraintes et connaissances issues des phases du cycle de vie des produits. Cependant, la prise en compte d'un nombre important de règles métier augmente la complexité de l'activité des architectes/concepteurs. Une voie émergente permet de considérer ce problème d'une autre manière. Dans un contexte global d'ingénierie « intégrée » [Tichkiewitch, 1994 ; Prasad, 1996 ; Lu *et al.*, 2007], et non plus « séquentielle », nous parlerons plus spécifiquement d'ingénierie « proactive » [Barnes *et al.*, 2004 ; Roucoules, 2007] pour aborder la nécessité d'introduire des contextes métier [Motschnig-Pitrik, 2000 ; Gero and Smith, 2009] durant la phase de conception des produits [Demoly *et al.*, 2013b]. En effet, intégrer les métiers en conception, tout en étant proactif, revient à générer au plus tôt des informations pertinentes pour les acteurs telles que les gammes métier (que ce soit de fabrication, d'assemblage, etc.), qui une fois exploitées, permettront d'apporter un contexte « orienté métier » aux architectes/concepteurs (voir Figure 3.2). En ce sens, des travaux de recherche antérieurs (voir Section 3.1) ont permis de démontrer qu'il était possible de générer et de définir une séquence d'assemblage avant la définition de toute géométrie du produit pour des systèmes mécaniques, que ce soit dans les domaines de l'industrie des biens d'équipement, de l'automobile et de l'aéronautique [Demoly, 2010].

Actuellement, l'enjeu scientifique ne se focalise pas uniquement sur la définition de la seule gamme d'assemblage mais demande désormais d'intégrer également la définition de gammes de fabrication, de maintenance, de transport, de gamme sélective de désassemblage, etc., et ceci de manière harmonieuse et cohérente. Pour ce faire, un effort important devra être consenti pour capitaliser, centraliser, et réconcilier les contraintes et règles métier, mais également les accorder en fonction de compromis établis d'un point de vue stratégique. Les efforts menés dans le cadre de cette opération de recherche se focalisent sur les métiers de l'assemblage, de la fabrication additive ainsi que de leur hybridation (au sens fabrication d'assemblages *in situ*) [Su *et al.*, 2013], afin d'embrasser les problématiques émergentes de l'impression 4D (i.e. technologie associant fabrication additive et matériaux intelligents) [Kuang *et al.*, 2018].

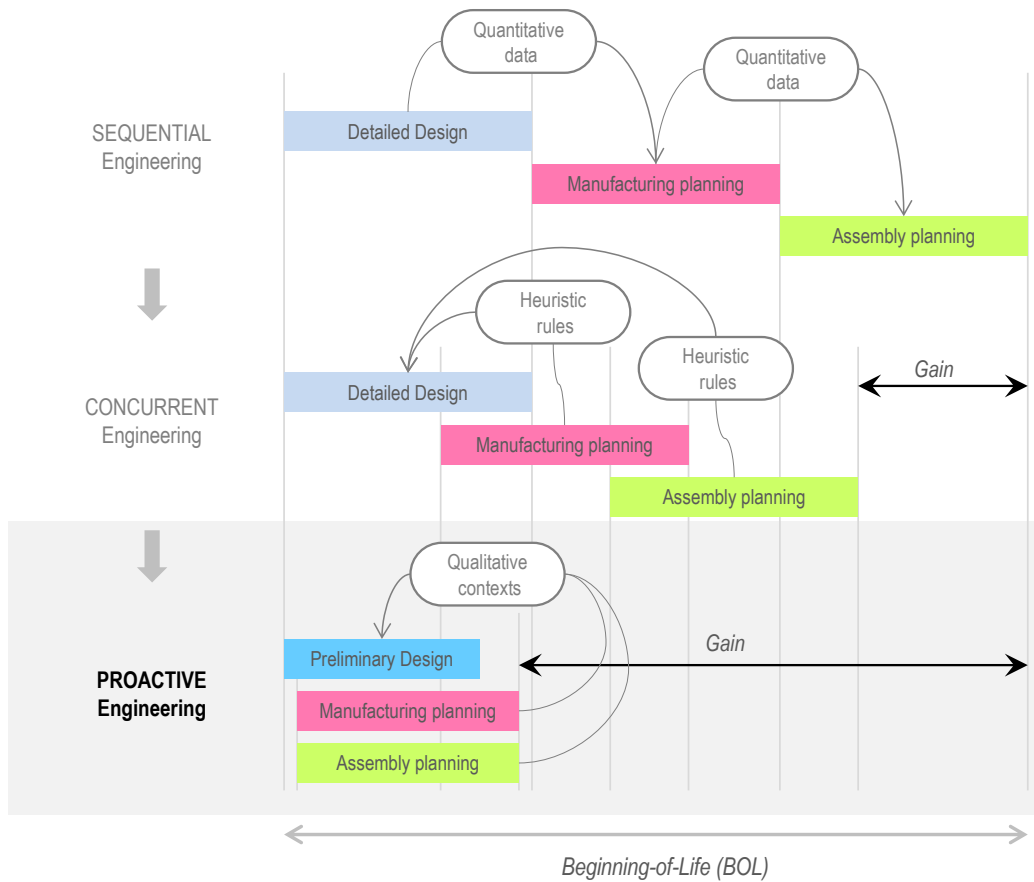


FIGURE 3.2 – Paradigme de l'ingénierie proactive [Demoly *et al.*, 2013c].

L'émergence des technologies de fabrication additive nous oblige à revisiter les méthodes de conception largement acceptées par la communauté, où le besoin de simplification (i.e. structuro-fonctionnelle) et de squeletisation géométrique (i.e. vue géométrique) du produit se retrouve en parfaite adéquation avec les contraintes du métier de l'assemblage. Nous démontrons donc qu'une approche réconciliée de conception pour la fabrication additive et l'assemblage présente une avancée prometteuse pour la communauté scientifique. Cette opération a également permis de considérer un métier émergent, l'impression 4D (ou plus communément appelée *4D printing*) [Ge *et al.*, 2013]. Ce dernier introduit une nouvelle dimension aux métiers abordés précédemment, i.e. la dynamique spatio-temporelle régie par les matériaux intelligents (ou fonctionnels/actifs), permettant par conséquent aux produits fabriqués et assemblés de pouvoir s'adapter, se déployer voire de se transformer durant leur phase d'usage en fonction d'un stimulus externe (e.g. changement de température, humidité, luminosité, etc.) [Tibbits, 2014]. La conception proactive pour l'impression 4D requiert de pouvoir travailler sur différentes dimensions (i.e. spatiale, temporelle et spatio-temporelle). Il sera donc opportun et nécessaire de développer un nouveau formalisme permettant de décrire les évolutions géométriques du produit au cours du temps et d'assurer son implémentation au sein de la chaîne numérique intégrée.

3.2.2 Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée (OP₂)

Les problématiques d'intégration des métiers en conception au plus tôt demandent de pouvoir définir des structures d'informations adaptées pour accueillir les contraintes et connaissances métiers, mais également des approches de gestion assurant une certaine articulation et orchestration des flux informationnels au niveau de la chaîne numérique intégrée (PLM). Cette nécessité de concevoir des produits bien équilibrés,

c'est-à-dire vis-à-vis des phases constituant leur cycle de vie, requiert des efforts dès le début de la phase de conception préliminaire. Cette phase, précédant la phase de conception détaillée, devient effectivement critique dès lors que les nomenclatures product-process peuvent être simplifiées, adaptées voire réconciliées par les architectes études et industrialisation. Cette opération de recherche va donc introduire, en premier lieu, le concept d' « incubateur en conception » – construit via un raisonnement analogique des processus naturels (e.g. incubation de l'œuf¹⁵) – afin d'apporter et enrichir une structure géométrique en CAO suivant le métier à intégrer et le degré d'avancement du/des concepteur(s). Nous démontrons que cette démarche de construction descendante de la géométrie (voir Figure 3.3), sur la base d'une nomenclature réconciliée, convient tout particulièrement aux métiers de l'assemblage et de la fabrication additive.

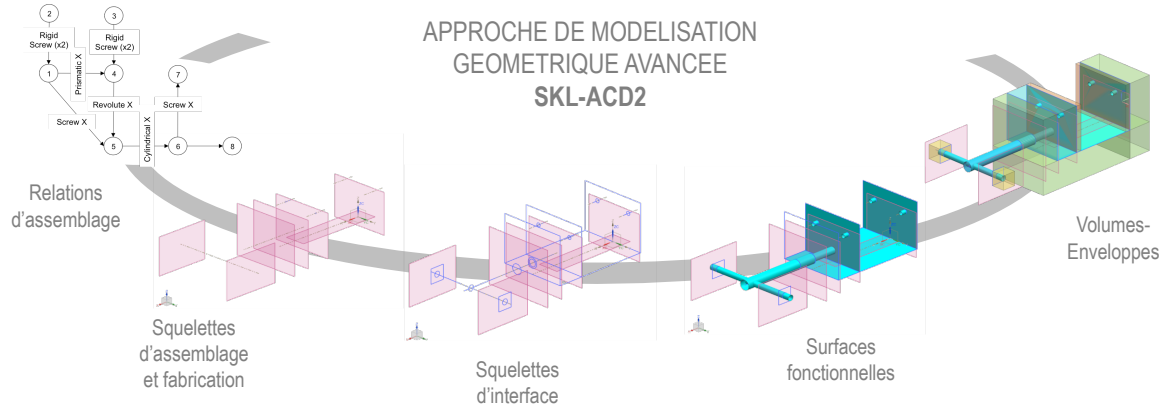


FIGURE 3.3 – Emergence d'espaces de conception par une approche descendante de modélisation géométrique.

Cette assistance structurée, visant à faire émerger la géométrie du produit, s'accompagne naturellement de mécanismes de gestion d'informations techniques adaptés. D'un point de vue système et outil, le découpage traditionnel de la chaîne numérique – qui inclut notamment la CAO et les systèmes PDM/MPM pour ne citer qu'eux – a mis en évidence des besoins en applications de type « carrefour », « passerelle » et « tableau de bord » [Demoly *et al.*, 2013a]. Ce type d'application assure effectivement une continuité dans l'enchaînement et l'intégration des phases du cycle de vie des produits, mais reste cependant limité à des interfaces ponctuelles. Une piste émergente et considérée au sein de cette opération de recherche consiste à spécifier un système de type « carrefour » (ou plus communément appelé « hub »), afin d'améliorer la fluidité des flux d'informations produit-process par une orchestration centralisée et couplée à un travail sur les associativités entre objets techniques (particulièrement les objets spatiaux, spatiotemporels et temporeux) tels qu'abordés ci-après.

3.2.3 Formalisation et représentation des connaissances produit-process (OP₃)

La gestion des informations du produit et de ses gammes métier met en évidence le besoin d'une fondation logique et sémantique, afin de promouvoir la gestion harmonieuse par les systèmes PDM/MPM et la définition géométrique par les outils CAO au sein du processus de développement des produits. Afin de satisfaire ces exigences associées au cycle de vie du produit, la problématique scientifique traitée dans le cadre de cette opération de recherche vise à proposer une nouvelle approche de formalisation et d'exploitation des informations techniques et des connaissances du couple produit-process basée sur la méréotopologie spatio-temporelle [Smith, 1996 ; Sider, 2001]. Pour surmonter les difficultés rencontrées dans l'ingénierie du cycle de vie des produits – tels que les problèmes de complexité combinatoire, de raisonnement, de définition et d'évaluation – les chercheurs se sont inspirés, au cours des dernières décennies,

15. Période pendant laquelle l'embryon se développe jusqu'à l'éclosion par l'apport de chaleur au juste nécessaire de la poule.

des phénomènes naturels, des théories mathématiques, des questions philosophiques, des sciences cognitives, des techniques utilisées en médecine et en biologie, etc. Une approche similaire est envisagée dans laquelle l'objectif scientifique est de représenter les informations relationnelles du produit sous format mathématique (logique formelle) couplée à de la sémantique. Ici, la méréologie et son extension incluant la topologie, la méréotopologie, en tant que théories mathématiques et philosophiques, seront considérées. De manière plus précise, la méréologie peut être considérée comme une collection de systèmes formels et axiomatiques qui traitent des relations de la partie et du tout (i.e *part-whole theory*) [Leśniewski, 1982]. La méréologie est à la fois une application de la logique des prédicats et une branche de l'ontologie, en particulier de l'ontologie formelle. La prise en compte de la topologie des frontières et des relations permettent d'aboutir à la méréotopologie, incluant prédicats, théorèmes et axiomes [Asher & Vieu, 1995].

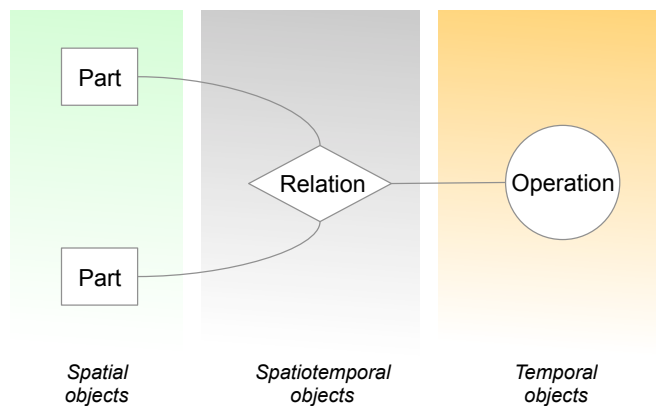


FIGURE 3.4 – Associations entre les objets de l'espace et du temps via les relations spatiotemporelles [Gruhier *et al.*, 2017].

Cette opération de recherche consiste donc à enrichir l'approche PRONOIA [Demoly *et al.*, 2012], née d'une collaboration avec l'EPFL, avec l'apport d'une description formelle réalisée dans la dimension spatio-temporelle. Celle-ci peut s'implémenter via l'élaboration d'une ontologie (formelle) spatio-temporelle du produit, afin de maîtriser la description du produit et de son évolution temporelle d'un point de vue conception et métier (fabrication additive et assemblage notamment). Cette implémentation ontologique est basée sur les langages OWL-DL (Web Ontology Language – Description Logic) et SWRL (Semantic Web Rule Language). Ces efforts auront pour impact la définition logique du produit selon différentes dimensions (i.e. spatiale, temporelle et spatio-temporelle) via l'utilisation de primitives méréotopologiques, et comme conséquence une évolution des méthodologies de modélisation géométrique, considérée actuellement comme statique d'un point de vue temporel (nourrissant par conséquent les réflexions au sein des opérations de recherche OP_1 et OP_2).

3.3 Bilan des publications scientifiques

Les différentes contributions – couvrant théorie, modèles et approches – proposées dans le cadre de ces trois opérations de recherche, ont été publiées dans des revues internationales, chapitres d'ouvrage international, conférences internationales et colloques nationaux avec comité de lecture. Le Tableau 3.1 synthétise le nombre de publications par opération de recherche, leur état (publiée et soumise) et la période (avant/après thèse) pour chacune de ces catégories.

Au total, **61** publications scientifiques ont été produites, dont 51 internationales et 25 en tant que premier auteur. Parmi les 24 revues internationales comptabilisées, il est important de préciser que **23** concernent des revues de **rang A**, référencées dans **ISI Web of Science** et/ou **Scopus**. La Figure 3.7 présente la répartition temporelle de mes publications. La liste complète et détaillée de mes publications scientifiques est présentée au Chapitre 6 de cette partie.

Tableau 3.1 – Récapitulatif des publications scientifiques ;

	Revue Internationales	Chapitres d'ouvrage	Conférences Internationales	Colloques Nationaux
OP ₁	9	2	10	7
OP ₂	8	1	6	1
OP ₃	7	1	7	2
Publiée	17	4	23	7
Soumise	7	0	0	3
2007 - 2010	3	1	2	4
2011 - 2017	21	3	21	6
Total	24	4	23	10

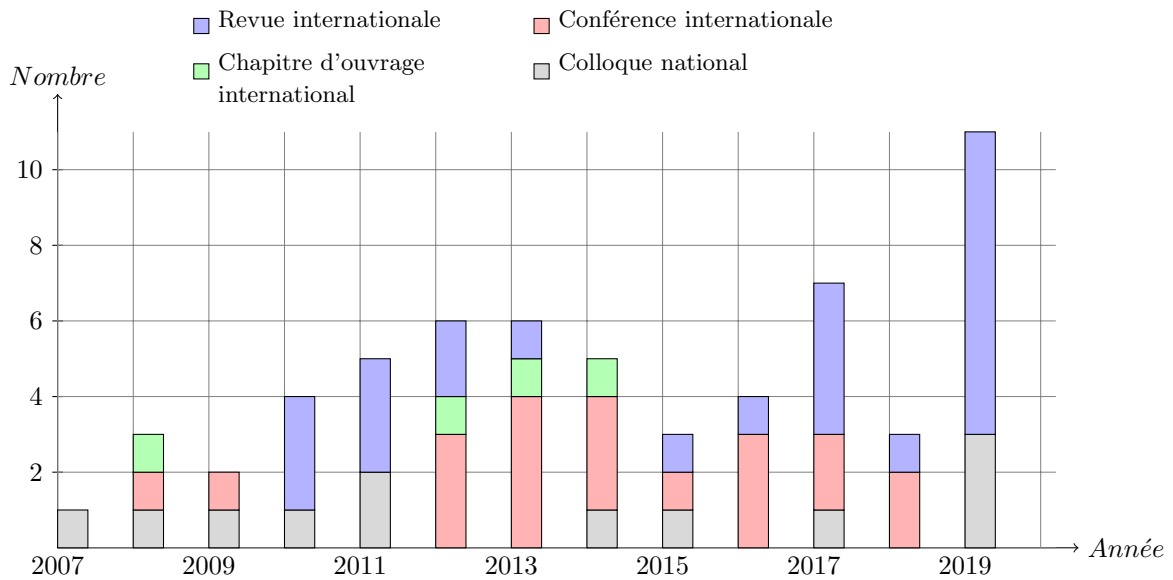


FIGURE 3.5 – Répartition temporelle de la production scientifique.

3.4 Projets de recherche : participation et montage

En tant qu'Allocataire de Recherche à l'UTBM (2007 à 2010), j'ai été impliqué dans le montage de contrats industriels avec des PME locales et des grands groupes sur des projets de conception mécanique, ainsi que dans la gestion de la partie technique d'un projet de recherche et de transfert de technologie **CoDeKF**¹⁶ (2007–2009), labellisé par le Pôle de Compétitivité Véhicule du Futur (VdF). J'étais alors impliqué dans la spécification fonctionnelle et technique d'un système PLM couplé à une base de connaissances et un moteur d'inférences à propagation de contraintes. Sur cette base, deux autres projets ont pu être réalisés, **INGéPROD** (Ingénierie Numérique Hautement Productive Produit-Process) labellisé par le Pôle VdF et FUI **ADN** (Alliance des Données Numériques). Entre 2010 et 2011, durant mes études post-doctorales, j'ai été impliqué dans un projet européen FP7 FoF ICT¹⁷ **PLANTCockpit**¹⁸, dont le montant s'élevait à 12,7 M€, en tant que responsable technique pour l'EPFL, et responsable d'un Work Package. Mon implication à l'EPFL portait également dans l'écriture de nouvelles propositions de


16. Collaborative Design and Knowledge Factory – <http://www.codekf.org>

17. Seventh Framework Programme – Factory of the Future – Information and Communication Technologies.

18. Production Logistics and Sustainability Cockpit – <http://www.plantcockpit.eu>

projets européens dans le programme cadre 7 (FP7), principalement dans les appels à projet FoF ICT¹⁹ et NMP²⁰ pour l'année 2011. Parmi les propositions ayant abouti à un financement de la part de la commission européenne, nous pouvons citer le projet **LinkedDesign**²¹ (2011-2015).

Tableau 3.2 – Récapitulatif des projets financés entre 2009 et 2019.

Champs	Nom	Type	Année	Rôle	Financement
Thèse	AREVA	Contrat industriel	2009	Resp. Scientifique	60 k€
	CodeKF	Projet Pôle VdF	2007-2010	Resp. technique	730 k€
Postdoc	PLANTCockpit	FP7-FoF-ICT	2010-2014	Resp. WP	480 k€
	LinkedDesign	FP7-FoF-ICT	2011-2015	Montage	492 k€
OP ₁	MABI	Contrat industriel	2010	Resp. Scientifique	20 k€
	VELUX	Contrat industriel	2014	Porteur	3 k€
	CAPSA Container	Contrat industriel	2019	Porteur	3 k€
	PRIAM	S.mart	2018	Porteur	40 k€
OP ₁₋₂	PAN	Région BFC	2018-2021	Porteur	253 k€
	MS-INNOV	Contrat CIFRE	2019	Encadrant	60 k€
OP ₂	GE Energy Products	Contrat industriel	2013	Porteur	3,5 k€
	GE Energy Products	Contrat CIFRE	2013	Encadrant	60 k€
	INGÉPROD	Projet Pôle VdF	2010-2013	Resp. scientifique	133,3 k€
	ASSYSTEM	Contrat industriel	2016	Porteur	7,2 k€
	Avions Mauboussin	Contrat industriel	2017	Porteur	15 k€
OP ₃	ADN	Projet FUI	2010-2013	Resp. scientifique	136,6 k€
	ACCELINN	Contrat CIFRE	2014	Encadrant	60 k€
	HERMES	ISITE BFC 	2018-2021	Porteur	150 k€

Entre 2009 et 2018, une part importante de mon activité a donc été dédiée au montage et à la réalisation de projets de recherche et de transfert de technologie, que ce soit au niveau régional (projets labellisés Pôle VdF²², contrats industriels, I-SITE²³ Investissements d'Avenir, région BFC et réseau S.mart), au niveau national (projets FUI²⁴ et ANR²⁵) voire européen (programmes FP7 et Horizon 2020). Parmi les projets retenus au cours de ces neuf dernières années, tels que listés dans le Tableau 3.2, nous pouvons mettre en évidence trois projets ayant récemment reçu un financement par le réseau S.mart Franche-Comté, la région BFC ainsi que le projet I-SITE BFC, et inscrivant une certaine dynamique et une ouverture autour des mes trois opérations de recherche. Ce dernier relève d'un projet d'universités et d'établissements qui valorisent des atouts scientifiques thématiques plus concentrés, distinctifs, reconnus sur le plan international, et qui en font un levier d'entraînement et un point d'appui de leur stratégie de développement et de partenariat avec le monde économique.

Le projet **HERMES**²⁶ – labellisé PIA²⁷ dans le cadre de l'I-SITE BFC 2018 (Grant No. ANR-15-IDEX-03) – vise à adopter une problématique émergente, favorisée par les capacités uniques des techniques de fabrication additive, que porte le concept plus largement appelé « Impression 4D » (ou 4D printing). Ceci concerne plus particulièrement le processus par lequel sont imprimés les assemblages et les pièces

19. Factory of the Future – Information and Communication Technologies.

20. Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and new Production Technologies.

21. Linked Knowledge in Manufacturing, Engineering and Design for Next-Generation Production

22. <http://www.vehiculedefutur.com>

23. <http://www.ubfc.fr/projet-i-site/>

24. Fonds Unique Interministériel

25. Agence Nationale de la Recherche

26. spatiotemporal semantics and logical knowledge description of mechanical objects in the era of 4D printing and programmable Matter for next-generation of CAD systems

27. Projet d'Investissement d'Avenir

intégrant des matériaux intelligents, i.e. des matériaux capables de réagir aux changements de paramètres dans leur environnement d'utilisation. Cette nouvelle manière de penser et de fabriquer demeure assez vierge au regard des travaux de recherche existants sur les modèles et méthodes permettant de conduire les concepteurs de l'idée jusqu'à la réalisation de systèmes intelligents. HERMES vise donc à introduire un cadre méthodologique pour la conception de solutions couplant matériaux intelligents et technologies de fabrication additive. Il esquisse les principaux efforts scientifiques à mener, afin que les concepteurs soient suffisamment autonomes pour développer ces systèmes émergents. Pour ce faire, ce projet a pour objectifs d'élaborer (i) une théorie fondamentale suffisamment adaptée pour couvrir la description sémantique et logique des connaissances de phénomènes dynamiques suivant différentes échelles (i.e. territoire/bâtiment, assemblage mécanique, matériel, etc.), (ii) une ontologie modulaire pour le raisonnement sémantique et logique, sur laquelle (iii) les mécanismes de raisonnement géométrique seront développés, afin de générer des modèles CAO dynamiques prêts pour l'impression 4D. Ces objectifs présentent donc un effort stratégique d'un point de vue logique, sémantique ainsi que procédural, et devront être atteints grâce à une collaboration originale reliant les domaines de la mécanique, de l'ingénierie des matériaux, de l'informatique et de la géomatique. L'objectif ultime de HERMES est d'étendre les capacités actuelles des systèmes de CAO aux possibilités offertes d'impression 4D et l'augmentation des capacités de raisonnement embarqués dans les systèmes et la matière.

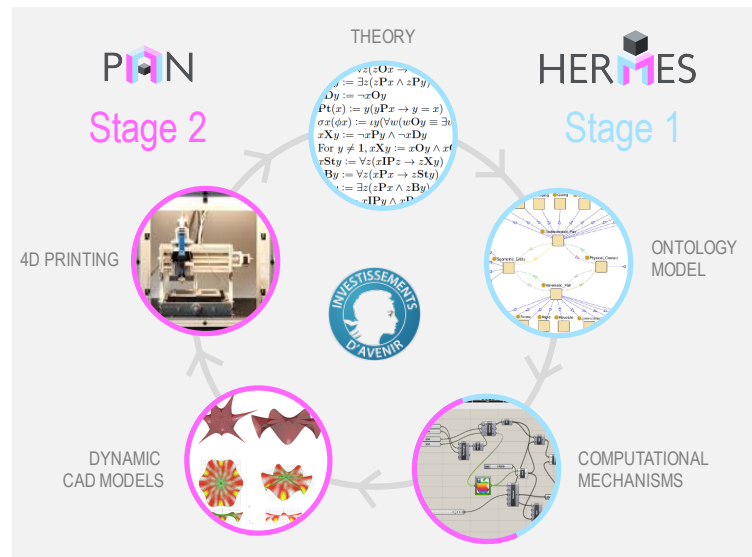


FIGURE 3.6 – Articulation des projets HERMES et PAN intégrant les problématiques de représentation des connaissances produit-process et de modélisation générative autour de l'impression 4D.

De manière complémentaire, le projet **PAN**²⁸ porte sur le développement de méthodes de conception proactive et de représentation géométrique basée sur des algorithmes génératifs et itératifs de systèmes transformables et actifs réalisées via les technologies de fabrication additive. PAN tend à exploiter l'apport des matériaux avancés tels que les matériaux intelligents et la matière programmable via leur caractère réactif aux stimuli externes au cours de la phase de conception et de simulation, et mis en œuvre via les procédés innovants de fabrication additive (également qualifiée de « 4D printing »). Dans le contexte actuel de rapprochement des régions (COMUE), le projet PAN s'inscrit intégralement dans le domaine d'excellence n°1 du projet ISITE BFC et apporte une articulation vis-à-vis du projet HERMES. Porté par le laboratoires ICB en collaboration avec le laboratoire Le2i (Laboratoire Electronique, Informatique et Image), PAN vise à construire et renforcer, comme son projet parent HERMES, les thématiques de la plateforme « processus » TITAN (compuTatIonal iTelligence in design and mANufacturing). La

²⁸. ConcePtion proActive et représentation géométrique de structures transformables et actives réalisées par impressioN 4D

plateforme TITAN, qui occupe une place importante dans le projet HCERES²⁹ de l'ICB, a pour but de développer des modèles, méthodes et outils afin d'assurer une chaîne numérique cohérente entre les phases de conception, modélisation, fabrication et caractérisation.

Couplé au projet PAN, le présent projet PRIAM³⁰ a pour objectif d'acquérir une imprimante afin de couvrir le domaine du « 4D Printing ». Cette imprimante permet non seulement de choisir des couleurs désirées pour les matériaux, mais elle donne également une liberté sur leurs propriétés. La technologie de cette imprimante introduit le concept de matériau numérique (i.e. digital material) qui est l'équivalent matériau d'une information (i.e. au sens informatique) générée par des bits : à partir de la combinaison de jusqu'à 3 matériaux de bases (parmi 22), plus de 1000 matériaux numériques peuvent être générés ou programmés dans le but de réaliser des propriétés spécifiques. Des équipes de recherche, principalement installées à Massachusetts Institute of Technology (MIT), Georgia Institute of Technology, Singapore University of Technology and Design (SUTD) et Nanyang Technological University (NTU) et travaillant sur la l'impression 4D, ont également adopté cette équipement pour fabriquer des « objets vivants ».

3.5 Encadrements scientifiques

3.5.1 Encadrement de Master

Au cours de mes études post-doctorales à l'EPFL, j'ai encadré un Master (programme ERASMUS) avec Dimitris KIRITSIS. Ce mémoire de Master intitulé « *Asset optimization and predictive maintenance in discrete manufacturing industry* » a été réalisé par Joaquim PUIG RAMÍREZ entre Février et Juillet 2011, et a fait l'objet d'une conférence internationale [44].

3.5.2 Encadrement de Thèses

Depuis 2012, j'ai pu bénéficier de trois bourses Ministère, trois thèses en convention CIFRE³¹, une bourse de thèse CSC³² au niveau des réseaux UT-INSA ainsi qu'une bourse de thèse dans la cadre d'un financement PIA. Une description synthétique de chaque thèse est fournie ci-après.

Elise GRUHIER

Spécialité : Mécanique

Thèse au sein du laboratoire IRTES-M3M. Bourse Ministère.

Directeur de thèse : Samuel GOMES, Co-Directeur : Saïd ABOUDI, Encadrant : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%).

Titre : « *Spatiotemporal description and modeling of mechanical product and its assembly sequence based on mereotopology : Theory, model and approach* »

Début : 10 octobre 2012 – Soutenue le 04 décembre 2015 (mention Très Honorable).

Qualifications obtenues en sections 60 et 61.

Situation actuelle : Maître de Conférences à Arts et Métiers ParisTech, Bordeaux.

JURY

<i>Président</i> :	Prof. Michel TOLLENAERE	INP Grenoble
<i>Rapporteurs</i> :	Prof. Alain BERNARD	Ecole Centrale de Nantes
	Prof. Philippe VERON	Arts et Métiers ParisTech
<i>Examineurs</i> :	Prof. Imre HORVATH	Delft University of Technology
	Dr. Kyoung-yun KIM	Wayne State University

Publications associées :

3 revues internationales [13-15], 3 conférences internationales [32,38,39] et 1 colloque national [56].

29. Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur.

30. conception PROactive pour la fabrication Additive à base de Matériaux intelligents

31. Conventions Industrielles de Formation par la REcherche.

32. China Scholarship Council

Bertrand MARCONNET

Spécialité : Mécanique

Thèse sur la base d'une convention CIFRE au sein de l'entreprise ACCELINN.

Directeur de thèse : Samuel GOMES, Co-Encadrants : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%) et Davy MONTICOLO.Titre : « *Contexte augmenté basé sur les prédictions pour une réutilisation efficace des connaissances métier en conception* »

Début : 25 novembre 2013 – Soutenue le 24 novembre 2017.

Situation actuelle : Ingénieur R&D chez VALEO

JURY

<i>Président</i> :	Prof. Dimitris KIRITSIS	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
<i>Rapporteurs</i> :	Prof. Lionel ROUCOULES	Arts et Métiers ParisTech - Aix-en-Provence
	Prof. Nicolas PERRY	Arts et Métiers ParisTech - Bordeaux

Publications associées :

2 revues internationales [5,11], 3 conférences internationales [33,36,37] et 1 colloque national [57].

Germain SOSSOU

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur.

Thèse au sein du laboratoire ICB. Bourse Ministère.

Directeur de thèse : Samuel GOMES, Co-Directeur : Ghislain MONTAVON, Encadrant : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%).Titre : « *A holistic approach to design for 4D printing* »

Début : 04 Septembre 2015 – Soutenue le 12 février 2019.

JURY

<i>Président</i> :	Prof. Jean-Claude ANDRE	Université de Lorraine
<i>Rapporteurs</i> :	Prof. Alain BERNARD	Ecole Centrale de Nantes
	Prof. Daniel BRISSAUD	Institut National Polytechnique de Grenoble
Examineurs :	Prof. Jerry H. QI	Georgia Institute of Technology

Publications associées :

4 revues internationales [3,4,7,9], 3 conférences internationales [30,31,35] et 3 colloques nationaux [52,54,55].

Bingcong JIAN

Spécialité : Mécanique

Thèse au sein du laboratoire ICB. Bourse China Scholarship Council (CSC - UT/INSA) ^a.Directeur de thèse : Samuel GOMES, Encadrant : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 50%) et Yicha ZHANG.Titre : « *Model, method and tool for the design of deployable structures using additive manufacturing and smart materials* »

Début : Octobre 2017 – Soutenance prévue en 2020.

Publications associées :

1 conférence internationale [29] et 1 colloque national [54].

^a. Financée pour une durée de 42 mois.

Thibaut CADIOU

Spécialité : Mécanique

Thèse sur la base d'une convention CIFRE au sein de l'entreprise SEGULA Technologies.

Directeur de thèse : Samuel GOMES, Co-Encadrants : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%) et Yicha ZHANG.Titre : « *Processus de fabrication additive ultra-rapide pour des pièces de grande taille, à base de technologies hybrides alliant robotique multi-axes, FDM et LDM pour des applications dans le domaine de l'automobile* »

Début : Mars 2018 – Soutenance prévue en 2021.

Saoussen DIMASSI

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur.

Thèse au sein du laboratoire ICB. Bourse ISITE PIA.

Directeur de thèse : Samuel GOMES, Co-Encadrants : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%) et Christophe CRUZ.Titre : « *Theory, model and approaches to the design of smart products/systems by using 4D printing technology and programmable materials* »

Début : Novembre 2018 – Soutenance prévue en Novembre 2021.

Al Khalil MONZER

Spécialité : Mécanique.

Thèse au sein du laboratoire ICB. Bourse Ministère.

Directeur de thèse : Sébastien ROTH, Co-Encadrants : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%) et Nadhir LEBEAL.Titre : « *Conception générative et optimisation paramétrique/topologique de structures cellulaires bio-inspirées par fabrication additive* »

Début : Septembre 2018 – Soutenance prévue en 2021.

Publication associée :

1 colloque national [53].

Lucas JIMENEZ

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur.

Thèse sur la base d'une convention CIFRE au sein de l'entreprise MS-INNOV.

Directeur de thèse : Samuel GOMES, Co-Encadrants : Frédéric DEMOLY (à hauteur de 40%) et Sihao DENG.Titre : « *Intelligence artificielle et aide à la décision conversationnelle pour la conception hautement productive et à base de connaissances du couple produit-process – Application à la conception mécanique et à la programmation robotique pour l'industrie automobile 4.0* »

Début : Octobre 2018 – Soutenance prévue en 2021.

Parmi les encadrements, deux thèses ont été soutenues et six autres sont en cours. L'ensemble des doctorants sont inscrits à l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (SPIM)³³ de l'UBFC.

33. <http://ed-spim.univ-fcomte.fr>

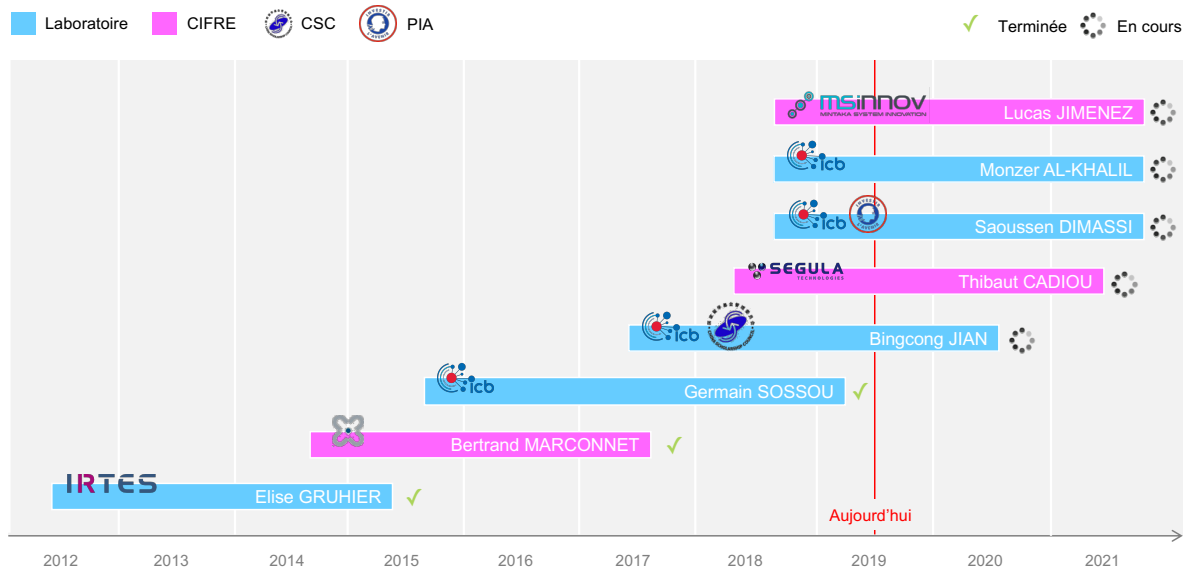


FIGURE 3.7 – Répartition temporelle des encadrements de thèse depuis 2012.

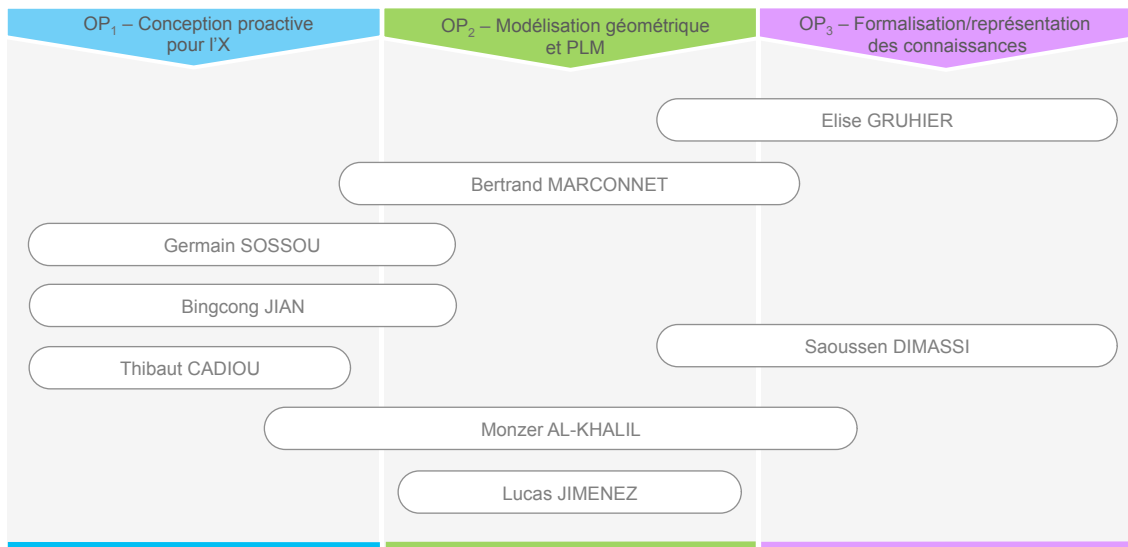


FIGURE 3.8 – Répartition des thèses au sein des opérations de recherche.

En résumé, la répartition temporelle de ces encadrements, présentée sur la Figure 3.7, montre une certaine dynamique amorcée par les travaux de thèse de Elise GRUHIER, Bertrand MARCONNET et Germain SOSSOU. De manière complémentaire, la Figure 3.8 illustre le recouvrement des thèses sur mes trois opérations de recherche. Cette répartition équilibrée est le résultat d'une volonté de construire un système cohérent vis-à-vis du niveau de maturité des réflexions scientifiques conduites depuis 2010.

Chapitre 4

Rayonnement

« Notre influence grandit au moment où un rêve futur se transforme en une action présente. »
[Steve Chandler]

4.1 Participation à des Groupes de Travail

Mon domaine de recherche, porté sur la conception intégrée du couple produit-process et la gestion d'informations techniques, m'a permis de rejoindre deux Groupes de Travail (GT) au sein du GDR MACS³⁴, que sont les GT IS3C³⁵ et C2EI³⁶, pour lesquels des communications orales régulières ont été réalisées. A ceci peut s'ajouter **10 communications écrites et orales** effectuées au sein des réseaux CONFERE³⁷ et AIP-Priméca³⁸ entre 2007 et 2019.

4.2 Animation scientifique

Mon implication au sein du GT IS3C m'a permis d'être nommé au cours de l'année 2011 en tant que co-animateur avec Jérôme PAILHES de Arts et Métiers ParisTech (Bordeaux) sur la période (2015-2016), puis avec Florent LAROCHE de l'Ecole Centrale de Nantes actuellement. Cette mission consiste à organiser la vie de la communauté au sein des différentes journées STP (Sciences et Techniques de Production) du GDR MACS ainsi que les journées doctorales associées. Ceci peut par exemple se traduire sous la forme de séminaires, de sessions spéciales dans des conférences internationales (e.g. session Virtual Product Development, International Conference on Computers & Industrial Engineering CIE45), de présentations de jeunes chercheurs voire des projets scientifiques portés par la communauté.

Plus récemment et conformément aux évolutions des domaines couverts pour le prochain plan quadriennal du GDR MACS, nous avons en premier lieu apporté des changements au niveau du nom du GT, celui-ci s'appellera désormais **IngéFutur** (forme contractée de « Ingénierie pour l'industrie responsable du futur : modèles, méthodes et outils »). Ce nouveau chapeau a pour objectif de clarifier le positionnement du GT vis-à-vis des autres (ex : C2EI, Easy-DIM, etc.) et de traiter les domaines de la conception intégrée et du PLM dans le contexte de l'usine du futur. Ceci demande par conséquent de développer des nouvelles connaissances pour des applications sur des systèmes cyber-physiques, anthropotechniques voire durables. En résumé, IngeFutur aura pour objectifs (i) d'être un support à l'ingénierie pour les

34. Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques.

35. Ingénierie des systèmes de conception et conduite du cycle de vie produit.

36. Modélisation et pilotage des systèmes de connaissances et de compétences dans les entreprises industrielles.

37. Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits

38. Atelier Inter-Etablissement de Productique et Pôle de Ressources Informatiques pour la MECAnique – <http://www.aip-primeca.net/>

métiers de la conception, de (ii) prendre en compte les besoins clients, des produits et des procédés, et de (iii) fournir un PSS (Product-Service System) innovant et intégré pour la société de demain.

4.3 Professeurs invités et collaborations internationales

Afin de dynamiser cet axe scientifique au sein du laboratoire ICB et améliorer son rayonnement à l'international, mon implication a permis d'inviter quatre chercheurs internationaux dans les domaines de la conception-fabrication mécanique, du PLM, de la représentation des connaissances métier pour la conception et de l'impression 4D, à savoir Prof. Roland MARANZANA, Prof. Dimitris KIRITSIS, Prof. Kyoung-Yun KIM et Prof. H. Jerry QI. Les principaux objectifs et impacts sont présentés ci-après.

Prof. Roland MARANZANA (Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, CANADA)

Les objectifs de cette coopération scientifique sont tout d'abord la consolidation de la problématique de recherche commune s'inscrivant dans mes opérations OP_1 et OP_3 et portant sur la description des intentions de conception pour des assemblages mécaniques en CAO. Pour ce faire, une piste émergente porte sur la description logique et sémantique d'informations structuro-fonctionnelles et relationnelles au sein d'un modèle géométrique de produit, afin de les situer vis-à-vis de leur réalisation (i.e. fabrication/assemblage). Ceci peut se traduire par l'exploitation de la méreotopologie spatiotemporelle et sa description formelle de premier ordre entre les différentes entités en ingénierie du couple produit-process. Cette théorie appliquée aux modèles CAO pourra faire émerger une ontologie de formes de manière à reconnaître et réutiliser des assemblages mécaniques et les structures associées.

Prof. Dimitris KIRITSIS (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, SUISSE)

Les objectifs visés de cette collaboration ont été le montage de plusieurs propositions de recherche majeures pour des appels à projets européens FP7 NMP Factory of The Future (propositions mHUB et EMPROS notamment) puis récemment H2020 (ULYSSES et EL-PASO) ainsi que la co-écriture de publications scientifiques dans des conférences et journaux internationaux dans le cadre de mes opérations OP_2 et OP_3 .

Publications associées :

4 revues internationales [16-19], 1 chapitre d'ouvrage international [25] et 4 conférences internationales [44,46,48,49].

Prof. Kyoung-yun KIM (Wayne State University, MI, USA)

Cette collaboration étroite, installée depuis 2013 et s'inscrivant dans mes OP_2 et OP_3 , a pour objectif de construire une théorie mathématique émergente basée sur la méreotopologie spatio-temporelle ainsi qu'une ontologie formelle pour l'ingénierie du couple produit-process en contexte PLM. Cette collaboration a permis de soumettre un projet de Laboratoire International Associé (LIA) – dans le cadre des appels à projets de collaboration au sein du CNRS – entre nos deux structures afin de converger les efforts scientifiques sur deux axes de recherche communs, dont la (i) *visualization of 4D printing* et (ii) *data-driven ontological smart material-based product design decision support*.

Publications associées :

5 revues internationales [2,6,8,12,14] et 2 conférences internationales [34,39].

1 numéro spécial³⁹ au sein de *Journal of Engineering Design* (IF : 1.459, ISI Web of Science) en coordination avec Prof. Imre HORVATH (Delft University of Technology, Pays-Bas).

39. Voir Chapitre 5, Section 5.7.

Prof. Jerry H. QI (Georgia Institute of Technology, GA, USA)

Cette collaboration, s'inscrivant dans mon OP₁ et également dans un axe majeur de mes perspectives de recherche, a pour objectif de couvrir une problématique scientifique commune portant sur l'ingénierie générative et l'intelligence computationnelle pour l'impression 4D. Ce type de collaboration s'appuiera sur ce qui est actuellement développé au sein du Laboratory for Mechanics of Soft Materials and 3D Printing dans lequel Prof. QI anime une activité soutenue autour de l'impression 3D de matériaux actifs (e.g. polymères à mémoire de forme, polymères photo-actifs, élastomères à cristaux liquides, etc.), afin de proposer des techniques innovantes d'impression 4D pour couvrir les enjeux de l'impression multi-matériau (Inkjet 3D printing, DLP 3D printing, Direct Ink Write et FDM). Les efforts attendus concernent plus particulièrement trois directions déjà amorcées, à savoir (i) un cadre de modélisation préliminaire basé sur les voxels permettant de simuler le comportement de matériaux intelligents puis (ii) une approche inverse du calcul de la distribution d'un matériau via des algorithmes d'apprentissage automatique.

Publications associées :

3 revues internationales soumises [1,3,4].

4.4 Facteurs d'impact

Sur la base de ces différents travaux de recherche et des publications associées, plusieurs indicateurs issus de base de données sont précisés, afin de mesurer l'impact sur la communauté des travaux de recherche proposés (Tableau 5.1). Parmi les bases de citations les plus utilisées et les plus pertinentes, nous pouvons lister ResearchGate⁴⁰, Google Scholar⁴¹, Researcher ID⁴², Scopus⁴³ et ISI Web of Science⁴⁴. Ces critères sont bien évidemment donnés à titre indicatif, et ont uniquement pour objectif de mesurer les impacts de notre production scientifique entre 2008 et 2019. L'ensemble de ces bases sont connectées à mon identifiant digital ORCID ID : 0000-0002-5825-6573.

Tableau 4.1 – Indicateurs de « performances » scientifiques (Mars 2019).

Base	Facteur h	Nb de citations	ID
ResearchGate	11	392	Frederic_Demoly
Google Scholar	11	487	/
ResearcherID	6	162	S-9448-2017
Scopus	9	302	36124790200
Web of Science (WoS)	7	189	/

40. https://www.researchgate.net/profile/Frederic_Demoly

41. <https://scholar.google.fr/citations?user=QJg2uw0AAAAJ&hl=fr>

42. <http://www.researcherid.com/rid/S-9448-2017>

43. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36124790200>

44. <http://www.webofknowledge.com/>

Chapitre 5

Responsabilités collectives et administratives

« Créer, non posséder ; œuvrer, non retenir ; accroître, non dominer. » [Lao-Tseu]

5.1 Affiliation dans des sociétés savantes

Membre affilié à la Design Society⁴⁵ depuis Août 2009.

Membre affilié à IFIP⁴⁶ WG 5.1 “Global product development for the whole life-cycle” depuis 2013.

Membre affilié à IFIP WG 5.7 “Advances in Production Management Systems” depuis 2013.

Membre invité à l’AFIS⁴⁷ depuis 2018.

5.2 Membre dans des comités de sélection MCF

2014 Membre extérieur du comité de sélection sur le poste 0303 MCF 60/61, Département Génie des Systèmes Mécaniques, Roberval UMR CNRS 7337, UTC.

2017 Membre interne du comité de sélection sur le poste 4404 MCF 60/61, Département GMC/EDIM, ICB UMR 6303 CNRS, UTBM.

2018 Membre extérieur du comité de sélection sur le poste 0697 MCF 60, G-SCOP, Institut National Polytechnique de Grenoble.

2018 Membre extérieur du comité de sélection sur le poste 4184 MCF 60/61, I2M UMR CNRS 5295, Arts et Métiers ParisTech ENSAM Bordeaux.

5.3 Expertise dans des instances internationales et nationales

Depuis Septembre 2010, je contribue à la vérification, amélioration et diffusion de travaux scientifiques en tant que « *relecteur* » pour les revues internationales suivantes :

— Computers in Industry (COMIND⁴⁸) [Web of Science](#) ;

45. <http://www.designsociety.org>

46. International Federation for Information Processing

47. Association Française d’Ingénierie Système

48. <http://www.journals.elsevier.com/computers-in-industry>

- Computer-Aided Design (CAD⁴⁹) Web of Science ;
- Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (RCIM⁵⁰) Web of Science ;
- Advanced Engineering Informatics (ADVEI⁵¹) Web of Science ;
- Journal of Engineering Design (JED⁵²) Web of Science ;
- Concurrent Engineering : Research and Applications (CERA⁵³) Web of Science ;
- Proceedings of the iMechE, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science Web of Science ;
- Computers & Industrial Engineering (CAIE) Web of Science ;
- International Journal of Production Research (IJPR) Web of Science ;
- Additive Manufacturing (ADDMA⁵⁴);
- Journal of Intelligent Manufacturing (JIM) Web of Science ;
- Production Planning & Control Web of Science ;
- Co-Design ISI Web of Science ;
- CIRP-Journal of Manufacturing Science and Technology (CIRP-JMST) Web of Science ;
- International Journal of Distributed Sensor Networks (DSN) Web of Science ;
- IEEE Access⁵⁵ Scopus ;
- Sadhana⁵⁶ - Academy Proceedings in Engineering Sciences Web of Science ;
- National Academy Science Letters (SCLE) Web of Science ;
- Mathematical Problems in Engineering ;
- Journal of Machinery Manufacturing and Automation ;
- International Journal of Product Development (IJPD) Scopus ;
- International Journal of Product Lifecycle Management (IJPLM⁵⁷) Scopus ;
- International Journal Of Design and Innovation Research (IJODIR⁵⁸).

Je suis également « *relecteur* » pour les conférences internationales suivantes : ASME International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE) depuis 2011, Tools and Method for Competitive Engineering (TMCE) depuis 2012, International Conference on Product Lifecycle Management (PLM) depuis 2011, Advances in Production Management Systems (APMS) depuis 2014, ASME Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA) depuis 2012 et le Colloque des Science de l'Innovation et de la Conception (CONFERE) depuis 2012.

Expert actif au sein de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR)

Depuis 2013, j'ai été nommé en tant qu' « *expert* » auprès de l'ANR, afin d'évaluer des projets de recherche soumis, notamment dans le cadre des appels à projets génériques sur les thématiques *Modèles Numériques* (2013), *Renouveau Industriel* (2015 et 2016) et *Usine du futur : Homme, organisation, technologies* (2018). En 2018, j'ai également été mandaté comme « *expert scientifique* » dans le cadre de l'appel à projets de

49. www.elsevier.com/locate/cad

50. www.elsevier.com/locate/rcim

51. www.journals.elsevier.com/advanced-engineering-informatics

52. www.tandf.co.uk/journals/tf/09544828.html

53. <http://cer.sagepub.com/>

54. <https://www.journals.elsevier.com/additive-manufacturing>

55. <http://ieeaccess.ieee.org>

56. <https://www.springer.com/engineering/journal/12046>

57. www.inderscience.com/ijplm

58. www.ijodir.org

l'ERA-NET CHIST-ERA⁵⁹ ainsi que du LabCom V3 (Laboratoires Communs organismes de recherche publics - PME/ETI).

5.4 Appartenance à des comités éditoriaux internationaux

Membre du comité éditorial de *Journal of Integrated Design and Process Science* depuis 2017 Web of Science.
 Membre du comité éditorial de *Mathematical Problems in Engineering* depuis 2015.
 Membre du comité éditorial de *Journal of Machinery Manufacturing and Automation* depuis 2014.
 Membre du comité scientifique de la conférence internationale CIRP Design depuis 2017.
 Membre du comité scientifique de la conférence internationale APMS depuis 2013.
 Membre du comité scientifique de la conférence internationale PLM depuis 2012.
 Membre du comité scientifique de la conférence nationale CFM depuis 2018.
 Membre du comité scientifique du colloque CONFERE depuis 2012.
 Membre du comité scientifique du colloque AIP-Priméca de La Plagne depuis 2015.

5.5 Membre de jury intermédiaire de thèse

- 2014 Evalueur dans un jury intermédiaire de la thèse de Monsieur Thongchai CHINKATHAM s'intitulant « *Contribution à la formalisation des liens Invention - Optimisation en Conception Inventive* ». Cette mission a été réalisée conjointement avec Prof. Denis CAVALUCCI (Université de Strasbourg) et Prof. Gaetano CASCINI (Politecnico di Milano).
- 2017 Evalueur dans un jury intermédiaire de la thèse de Monsieur Anthony GEROMIN s'intitulant « *Synthèse des connaissances métiers pour l'émergence du modèle géométrique : Application à la conception d'arbre de transmission de puissance mécanique* ». Cette mission a été réalisée conjointement avec Prof. Jérôme PAILHES (Art et Métiers ParisTech, Bordeaux) et Prof. Lionel ROUCOULES (Art et Métiers ParisTech, Aix-en-Provence).
- 2017 Evalueur dans un jury intermédiaire de la thèse de Monsieur Paul STIEF s'intitulant « *Conception des systèmes de production reconfigurables par analyse des processus de fabrication* ». Cette mission a été réalisée conjointement avec Prof. Luc MATHIEU (Université Paris Sud XI), Prof. Jean-Yves DANTAN, Dr. Alain ETIENNE et Dr. Ali SIADAT (Arts et Métier ParisTech, Metz).

5.6 Organisation d'évènements scientifiques

Entre 2009 et 2017, j'ai été impliqué dans l'organisation de plusieurs événements scientifiques au niveau national et international. Le workshop international CoDeKF'09⁶⁰ a été organisé les 17-18 novembre 2009 à Montbéliard, visant à confronter les résultats du projet CoDeKF aux divers travaux de recherche existants à l'international. La conférence internationale APMS⁶¹ 2014 a été organisée conjointement avec d'autres universités françaises, j'ai donc été associé à l'équipe communication de cet événement. Le colloque AIP-Priméca La Plagne 2015 a été, quant à lui, majoritairement organisé par les membres du conseil de gestion de l'AIP-Priméca Franche-Comté dont je fais partie; j'ai donc pu intervenir au niveau de l'organisation scientifique. Plus récemment, j'ai organisé le workshop international PALM⁶² 2015 en tant que « *Workshop Chair* ». Le Tableau 5.1 ci-dessous récapitule ces événements ainsi que les communautés scientifiques associées.

59. Recherche Européenne Coordonnée sur les Défis à Long-terme dans les sciences et technologies de l'information et de la communication.

60. <http://acsp2.utbm.fr/codekf/>

61. Advances in Production Management Systems

62. Product and Asset Lifecycle Management, <https://palm2015.sciencesconf.org>

Tableau 5.1 – Evènements scientifiques organisés entre 2009 et 2016.

Nom	Type	Année	Lieu	Communauté associée
CoDeKF	Workshop international	2009	Montbéliard	IS3C & C2EI & AIP-Priméca
APMS	Conférence internationale	2014	Ajaccio	IFIP WG.5.7
La Plagne	Colloque AIP-Priméca	2015	La Plagne	AIP-Priméca
PALM	Workshop International	2015	Montbéliard	IFIP WG.5.7 & ISC3 & AMEST

Depuis 2012, j'ai été co-responsable de sessions spéciales dans des conférences internationales associées à mon domaine de recherche. Les conférences, les sessions et leur portée sont décrites ci-dessous :

- PLM12⁶³, Session spéciale portant sur « *Increasing awareness and understanding of information and knowledge flows in PLM* » organisée en collaboration avec Prof. Dimitris KIRITSIS (EPFL, Suisse).
- ESDA 2012⁶⁴, Session spéciale portant sur « *PLM & Integration of Manufacturing Information* » organisée en collaboration avec Prof. Benoît EYNARD (UTC).
- ESDA 2012, Session spéciale portant sur « *Information Management & Lifecycle Engineering* » organisée en collaboration avec Prof. Benoît EYNARD (UTC).
- APMS 2014, Session spéciale portant sur « *Lean System Design* » organisée en collaboration avec Dr. Elise VAREILLES (ENSTIMAC).
- APMS 2015, Session spéciale portant sur « *Ontologies in industry* » organisée en collaboration avec Prof. Stanislaw STRZELCZAK (Warsaw University of Technology, Pologne).
- TMCE 2016, Chairman d'une session portant sur « *Application of generative models* » en collaboration avec Prof. Imre HORVATH (Delft University of Technology, Pays-Bas).
- CIRP Design 2018, Chairman d'une session portant sur le domaine du « *Design for X* ».
- CFM⁶⁵ 2019, Session spéciale portant sur « *Usine du futur : conception intégrée, métrologie et fabrication avancées* » avec Denis TEISSANDIER (Université de Bordeaux) et Mathieu RITOU (Université de Nantes).

5.7 Gestion d'une *special issue* dans une revue internationale

Depuis Septembre 2017, je co-édite, avec Prof. Imre HORVATH (Delft University of Technology, The Netherlands) and Prof. Kyoung-Yun KIM (Wayne State University, MI, USA), une *special issue* dans la revue internationale *Journal of Engineering Design* [Web of Science](#). Celle-ci s'intitule "*Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design*" et adresse plus particulièrement les problématiques existantes quant aux implémentations ontologiques support à l'ingénierie de conception en industrie. Les verrous scientifiques principaux étant focalisés sur (i) l'acceptation : la difficulté de raisonner sur la sémantique et la logique pour les non-logiciens and non-philosophes, (ii) l'orthogonalité : l'ingénierie ontologique est considérée comme une activité perpendiculaire à la conception demandant par conséquent beaucoup de temps, et (iii) l'implémentation : les problèmes d'interopérabilité entre les ontologies et les systèmes d'aide à la conception ont besoin d'être adressés pour assurer une implémentation réussie en industrie.

63. International Conference on Product Lifecycle Management 2012 – <http://www.plm-conference.org>

64. ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis – <http://www.asmeconferences.org/ESDA2012>

65. Congrès Français de Mécanique – <https://cfm2019.scienceconf.org>

5.8 Responsabilités administratives

Membre élu au Conseil Scientifique du Laboratoire ICB UMR 6303 CNRS (2016-2020).

Membre élu au Conseil du Département COMM de l'ICB (2017-2021).

Membre nommé au Conseil de Gestion AIP-Priméca Franche-Comté (2014-2018).

Membre élu au Bureau de Département GMC de l'UTBM (2014-2018).

Membre élu au Conseil du Laboratoire IRTES-M3M (2013-2016).

Membre élu au Conseil Scientifique de l'UTBM (2016-2020).

Membre élu au Conseil d'Administration de l'UTBM (2012-2016).

Chapitre 6

Liste des publications scientifiques

« C'est le temps perdu pour ta rose qui la rend si importante. » [Antoine de Saint Exupéry]

Ce chapitre vise à lister l'ensemble de ma production scientifique depuis 2007 aux niveaux des revues internationales, chapitres d'ouvrage internationaux, conférences internationales et colloques nationaux à comité de lecture.

6.1 Revues internationales à comité de lecture

- [1] Hamel C.M., Roach D.J., Long K.N., **Demoly F.**, Dunn M.L. and Qi H.J., Machine-learning based design of active composites for 4D printing. *Smart Materials and Structures*, Accepted, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [2] **Demoly F.**, Kim K.-Y. and Horvath I., Deriving models based on ontologies for supporting engineering design. *Journal of Engineering Design*, Under Review, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [3] Sossou G., **Demoly F.**, Belkebir H., H. Qi J., Montavon G. and Gomes S. Design for 4D printing : A voxel-based modeling and simulation of smart materials. *Materials & Design*, Under Review, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [4] Sossou G., **Demoly F.**, Belkebir H., H. Qi J., Montavon G. and Gomes S. Design for 4D printing : Modeling and computation of smart materials distributions. *Materials & Design*, Under Review, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [5] Marconnet B., **Demoly F.** and Gomes S. A prediction-based design context augmentation framework for efficient knowledge reuse in top-down assembly design. *Computer-Aided Design*, Under Review, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [6] **Demoly F.**, Kim K.-Y. and Horvath I., An integrated generative design framework based on geometric skeletons and functional surfaces generation, *Computer-Aided Design*, Under Review, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [7] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G., Gomes S. A proactive and computational design framework for additive manufacturing of mechanical assemblies, *Virtual and Physical Prototyping*, Under Review, 2019. [ISI Web of Science](#)
- [8] Khan M.T.H., **Demoly F.** and Kim K.-Y., A formal ontology-based framework for capturing dynamic assembly design information in heterogenous CAD systems, *Journal of Engineering Design*, Accepted, 2019. [ISI Web of Science](#)

- [9] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G. and Gomes S., An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies, *Journal of Computational Design and Engineering*, 2018, 5(1), pp. 3-18. [Scopus](#)
- [10] **Demoly F.** and Roth S., Knowledge-based parametric CAD models of configurable bio-mechanical structures using geometric skeletons, *Computers in Industry*, 2017, 92-93, pp. 104-117. [ISI Web of Science](#)
- [11] Marconnet B., **Demoly F.**, Monticolo D. and Gomes S., An assembly oriented design and optimization approach for mechatronic system engineering, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 2017, 8, NA7, 10p.
- [12] Khan M.T.H., **Demoly F.** and Kim K.-Y., Formal ontology and CAD integration with macro parametric approach, *Computer-Aided Design and Applications*, DOI : 10.1080/16864360.2017.1308078, 2017. [Scopus](#)
- [13] Gruhier E., **Demoly F.** and Gomes S., A spatiotemporal information management framework for product design and assembly process planning reconciliation, *Computers in Industry*, 2017, 90, pp. 17-41. [ISI Web of Science](#)
- [14] Gruhier E., **Demoly F.**, Kim K.-Y., Abboudi S. and Gomes S., A theoretical framework for product relationships description over space and time in integrated design, *Journal of Engineering Design*, 2016, 27(4-6), pp. 269-305. [ISI Web of Science](#)
- [15] Gruhier E., **Demoly F.**, Abboudi S. and Gomes S., A formal ontology-based spatiotemporal mereotopology for integrated product design and assembly sequence planning, *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(3), pp. 495-512. [ISI Web of Science](#)
- [16] **Demoly F.**, Dutartre O., Yan X.-T., Eynard B., Kiritsis D. and Gomes S., Product Relationships Management Enabler for Concurrent Engineering and product lifecycle management, *Computers in Industry*, 2013, 64(7), pp. 833-848. [ISI Web of Science](#)
- [17] **Demoly F.**, Matsokis A. and Kiritsis D., A mereotopological product relationship description approach for assembly oriented design, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(1), pp. 681-693. [ISI Web of Science](#)
- [18] **Demoly F.**, Yan X.-T., Eynard B., Kiritsis D. and Gomes S. Integrated product relationships management : a model to enable concurrent product design and assembly sequence planning, *Journal of Engineering Design*, 2012, 23(7), pp. 544-561. [ISI Web of Science](#)
- [19] **Demoly F.**, Toussaint L., Eynard B., Kiritsis D. and Gomes S., Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning, *Computer-Aided Design*, 2011, 43(2), pp. 1654-1673. [ISI Web of Science](#)
- [20] **Demoly F.**, Troussier N., Eynard B., Falgarone H., Fricero B. and Gomes S., Proactive assembly oriented design approach based on the deployment of functional requirements, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2011. [ISI Web of Science](#)
- [21] **Demoly F.**, Yan X.-T., Eynard B., Rivest L. and Gomes S., An Assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1), pp. 33-46. [ISI Web of Science](#)
- [22] **Demoly F.**, Monticolo D., Eynard B., Rivest L. and Gomes S., Multiple viewpoint modelling framework enabling integrated product-process design, *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 2010, 4(4), pp. 269-280. [Scopus](#)
- [23] **Demoly F.**, Eynard B., Rivest L. and Gomes S., PLM-based approach for assembly process engineering, *International Journal of Manufacturing Research*, 2010, 5(4), pp. 414-428. [Scopus](#)
- [24] Toussaint L., **Demoly F.**, Lebaal N. and Gomes S., PLM-based approach for design verification and validation using manufacturing process knowledge, *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2010, 8(1), pp. 1-7.

6.2 Chapitres d'ouvrage international à comité de lecture

- [25] **Demoly F.**, Gomes S., Eynard B., Yan X.-T. and Kiritsis D., Concurrent product design and assembly sequence planning : a comprehensive framework. *Advances in computers and information in engineering research*, 2014, Vol.1. ASME Press, Ed. John Michopoulos. New York.
- [26] **Demoly F.**, Deniaud S. and Gomes S., Towards an harmonious and integrated management approach for lifecycle planning, *Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services* : Proceedings of the APMS 2012 Conference, Advances in Production Management Systems. Eds. Emmanouilidis C., Taisch M., and Kiritsis D., IFIP AICT, Springer, 2013.
- [27] **Demoly F.**, Matsokis A., Kiritsis D. and Gomes S., Mereotopological description of product-process information and knowledge for PLM, In Rivest L., Bouras A., Louhichi B. (Eds.), *PLM : Towards Knowledge-Rich Enterprises*, Springer London, 2012.
- [28] Gomes S., **Demoly F.**, Mahdjoub M. and Sagot J.-C., Integration of Design for Assembly into a PLM environment, In Yan X.-T., Eynard B., Ion W.J. (Eds.), *Global Design to Gain a Competitive Edge – An Holistic and Collaborative Design Approach based on Computational Tools*, Springer London, ISBN 978-1-84800-238-8, 2008, pp. 117-126.

6.3 Conférences internationales à comité de lecture

- [29] Jian B., **Demoly F.**, Zhang Y. and Gomes S., A design framework of multifunctional shape memory polymer by 4D printing. ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS), 2018, September 10-12, San Antonio, TX, USA.
- [30] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G. and Gomes S., Design for 4D printing : rapidly exploring the design space around smart materials. *Procedia CIRP*, 2018, 70(1), pp. 120-125.
- [31] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G. and Gomes S., Towards a framework for 4D printing-oriented design. DS 87-5 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 5 : Design for X, Design to X, Vancouver, BC, Canada, August, 21-25, 2017.
- [32] Gruhier E., Kromer R., **Demoly F.**, Perry N. and Gomes S., Transformable product formal definition with its implementation in CAD tools. International Conference on Product Lifecycle Management, PLM 2017, July 9-12, Seville, Spain..
- [33] Marconnet B., Wetzal A., Leprince-Maillere G., **Demoly F.**, Monticolo D., and Gomes S., Optimization and design for manufacturing and assembly of mechatronic systems : Application to an innovative concept of "Follow me drone". International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Application, ASMDO 2016, June 26-30, 2016, Shenzhen, China.
- [34] Khan M.T.H., **Demoly F.** and K.-Y. Kim., Dynamic design intents capture with formal ontology and perdurants object concept. International Conference on Collaboration Technologies and Systems, CTS 2016, June 6-10, Orlando, Florida, USA.
- [35] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G. and Gomes S., Towards an approach to additive manufacturing oriented design. Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2016, Aix-en-Provence, France.
- [36] Marconnet B., **Demoly F.**, Monticolo D. and Gomes S., Towards an approach to link knowledge and prediction in product design. International Conference on Product Lifecycle Management, PLM15, 19-21 October 2015, Doha, Qatar.

-
- [37] Marconnet B., **Demoly F.** and Gomes S., A semantic HUB within the future of PLM. Tenth International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems (SITIS), 2014.
- [38] Gruhier E., **Demoly F.**, Abboudi S. and Gomes S., A spatiotemporal mereotopology-based theory for qualitative description in assembly design and sequence planning, Design computing and Cognition, DCC2014, June 23-25, 2014, London, UK.
- [39] Gruhier E., **Demoly F.**, Kim K.-Y. and Gomes S., Mereotopology and product design : State of the art and research challenges, Proceedings of TMCE 2014, May 19-23, 2014, Budapest, Hungary, ISBN 978-94-6186-177-1.
- [40] **Demoly F.**, Pels H.J. and Gomes S., Proactive engineering and PLM : Current status and research challenges, International Conference on Product Lifecycle Management, PLM13, July 6-10, 2013, Nantes, France.
- [41] Petrazoller N., **Demoly F.**, Deniaud S. and Gomes S., Towards a knowledge-intensive framework for top-down design context definition, Advances Production Management Systems, September 2013, Penn State, USA.
- [42] Chapuis Y., **Demoly F.** and Gomes S., A novel framework for technological evolution within product architecture, Advances Production Management Systems, September 2013, Penn State, USA.
- [43] Chapuis Y., **Demoly F.** and Gomes S., Towards an approach to integrate technological evolution into product design, International Conference on Engineering Design, ICED'13, Seoul, August, 2013, South Korea.
- [44] **Demoly F.** and Kiritsis D., Asset Optimization and Predictive Maintenance in Discrete Manufacturing Industry, *Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology, A-MEST'12*, 22-23 November 2012, Sevilla, Spain.
- [45] **Demoly F.**, Deniaud S. and Gomes S., Towards an harmonious and integrated management approach for lifecycle planning, *International Conference of Advances in Production Management Systems, APMS 2012*, 24-26 September 2012, Rhodes island, Greece.
- [46] **Demoly F.** and Kiritsis D., Integrated and consistent management of product-process information, Proceedings of the ASME 2012 - 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2012, July 2-4, Nantes, France.
- [47] Monticolo D., Lahoud I., Bonjour E. and **Demoly F.**, SemKnow : A multi-agent platform to manage distributed knowledge by using ontologies, *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2012, 2195(1), pp. 58-62.
- [48] **Demoly F.**, Matsokis A. and Kiritsis D., A mereotopology-based approach for integrated assembly modeling and planning, ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2011, Washington, DC, USA.
- [49] **Demoly F.**, McCarthy J., Upton C. and Kiritsis D., An integrated requirements elicitation approach for the development of data management system, International Conference of Product Lifecycle Management, 2011, Eindhoven, The Netherlands.
- [50] **Demoly F.**, Gomes S., Eynard B. and Sagot J.-C., Assembly-oriented product structure based on preliminary assembly process engineering, Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 August 2009, Stanford, San Francisco, CA, USA, Vol. 7, ISBN 9 781904 670117, pp. 161-172.
- [51] **Demoly F.**, Gomes S., Eynard B. and Sagot J.-C., Towards a Design for Assembly Approach based on SysML Paradigm and PLM Systems, 2nd CIRP International Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), 21-23 September 2008, Toronto, Canada, pp. 100-113.

6.4 Colloques nationaux à comité de lecture

- [52] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G. and Gomes S., Conception pour l'impression 4D – Modélisation à base de voxels et simulation du comportement des matériaux intelligents, 16^{ème} Colloque National S.mart, Les Karellis, 3-5 avril 2019. Under Review.
 - [53] Al Khalil M., **Demoly F.**, Lebaal N. and Roth S., Vers une approche intégrée de conception-simulation-optimisation de structures lattices, 16^{ème} Colloque National S.mart, Les Karellis, 3-5 avril 2019. Under Review.
 - [54] Jian B., Sossou G., **Demoly F.**, Zhang Y. and Gomes S., A preliminary investigation for origami-inspired reconfigurable structure design by 4D printing, 16^{ème} Colloque National S-Mart, Les Karellis, 3-5 avril 2019. Under Review.
 - [55] Sossou G., **Demoly F.**, Montavon G. and Gomes S. Vers une méthodologie de conception proactive pour la fabrication additive, 15^{ème} Colloque AIP-Priméca de La Plagne, 12-14 Avril 2017.
 - [56] Gruhier E., **Demoly F.**, Abboudi S. and Gomes S., Description qualitative du couple produit-process basée sur la mérotopologie spatio-temporelle, 14^{ème} Colloque AIP-Priméca de La Plagne, 31 Mars-2 Avril 2015.
 - [57] Marconnet B., **Demoly F.**, Monticolo D. and Gomes S., Evolution du PLM au sein de l'entreprise 3.0, 21^{ème} Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Sibenik, Croatie, 3-4 Juillet 2014.
 - [58] Robert A., **Demoly F.**, Roth S. and Gomes S., Conception et simulation multi-physique de produits modulaires, 17^{ème} Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Sousse, Tunisie, 1-2 Juillet 2010.
 - [59] **Demoly F.**, Gomes S., Eynard B. and Rivest L., Vers un modèle multi-vues orienté assemblage, 11^{ème} Colloque National AIP-Primeca de La Plagne, 22-24 avril 2009, La Plagne, France.
 - [60] **Demoly F.**, Gomes S., Eynard B. and Sagot J.-C., Towards a Design for Assembly Approach based on SysML, 15^{ème} Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Angers, 3-4 Juillet 2008.
 - [61] **Demoly F.**, Gomes S. and Sagot J.-C., Intégration du Design for Assembly dans un environnement PLM, 14^{ème} Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Paris, 6-7 Juillet 2007.
-

Deuxième partie

Synthèse des travaux et projet de
recherche

Contenu de la Partie

Chapitre 7 Contexte de recherche et positionnement scientifique	47
7.1 Enjeux industriels	47
7.2 Description générale de l'axe scientifique	48
7.3 Incubation de la thématique scientifique au cours du temps	50
Chapitre 8 Conception proactive pour l'X (OP₁)	55
8.1 La question d'intégration en conception	55
8.2 Cadre méthodologique DFX	56
8.3 Conception orientée assemblage	59
8.4 Conception orientée fabrication additive d'assemblage	67
8.5 Conception proactive pour l'impression 4D	76
8.6 Bilan de l'OP ₁	84
Chapitre 9 Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée (OP₂)	87
9.1 Enjeux hérités de la conception proactive pour l'X	87
9.2 Incubateur de conception en contexte PLM	88
9.3 Modélisation géométrique descendante d'espaces de conception	90
9.4 Chaîne PLM réconciliée	97
9.5 Bilan de l'OP ₂	105
Chapitre 10 Formalisation et représentation des connaissances produit-process (OP₃)	107
10.1 Vers une conception éternaliste de l'espace-temps	107
10.2 Théorie basée sur la méréotopologie spatio-temporelle	108
10.3 Développement de l'ontologie modulaire : PRONOIA 2	118
10.4 Bilan de l'OP ₃	130
Chapitre 11 Projet de recherche	131
11.1 Synthèse des opérations de recherche	131
11.2 La voie des systèmes transformables par impression 4D	132
11.3 Structuration de la thématique scientifique	134

Chapitre 7

Contexte de recherche et positionnement scientifique

« *Tout chemin est seulement un chemin, et il n’y a pas offense envers soi-même ou les autres à le quitter si le cœur t’en dit. . . Regarde chaque chemin séparément et délibérément. Essaie-les autant de fois qu’il te paraît nécessaire. Puis demande-toi, et à toi seul : ce chemin a-t-il un cœur ? S’il en a, le chemin est bon ; s’il n’en a pas, il n’est d’aucune utilité.* » [Carlos Castaneda]

Ce chapitre vise à présenter les contextes de recherche académique et industriel, dans lesquels j’ai positionné et développé mes activités scientifiques. Il est effectivement important de pouvoir considérer ces deux volets de la recherche, afin de contextualiser et donc comprendre les efforts réalisés depuis 10 ans.

7.1 Enjeux industriels

Au cours des ces dix dernières années, j’ai pu en effet mesurer l’importance des enjeux industriels – qu’ils soient d’ordre technologique, économique, sociétal, organisationnel voire environnemental – ainsi que la mécanique des stratégies pour le maintien et la stimulation de la compétitivité des entreprises dans le contexte de l’industrie du futur que nous vivons [Gallois *et al.*, 2012]. A ce titre, le rapport de prospective des technologies clés à l’horizon 2020, issu du Ministère de l’Industrie et édité en 2016, fait état de 47 technologies avec un regard stratégique et opérationnel pour conquérir les marchés de l’industrie de demain [Technologies clés 2020, 2016]. Sur cette base, l’Association Française de Mécanique (AFM) et le Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) ont également fait part des technologies prioritaires dans le domaine de la mécanique, pour lesquels la conception, la fabrication et les technologies du numérique sont intimement liées et occupent une place très importante [CETIM, 2015].

Dès lors, des enjeux récurrents peuvent être identifiés parmi les défis technologiques, notamment ceux portés sur l’augmentation des capacités de production, mais également sur la flexibilité en fonction du volume et de la nature de la demande dans un contexte de personnalisation de masse [Alizon *et al.*, 2009]. Ces efforts menés depuis deux décennies découlent de la volonté de concevoir et de fabriquer des produits à forte valeur ajoutée. En effet, la production industrielle actuelle est caractérisée par (i) une forte individualisation des produits via une production en grande série hautement flexible, (ii) l’intégration des clients et des partenaires au sein des processus de la chaîne de valeur et (iii) le couplage entre la production et les services à haute valeur ajoutée [Kohler & Weisz, 2015].

A ce constat vient s’adjoindre une tendance à la diversification des solutions technologiques de fabrication et d’assemblage par ajout de matière, venant compléter les procédés de fabrication conventionnels

[Bouffaron, 2014]. Cette croissance d'ordre technologique, ouvrant de nouveaux marchés tels que rapportés par [Wohlers Report, 2018], est actuellement matérialisée par la volonté d'intégrer de nouvelles fonctionnalités directement dans les matériaux et les composants pour exploiter des structures s'inspirant du vivant (i.e. organiques, bioniques, biomimétiques, etc.) [Shu *et al.*, 2011; Studart, 2016] et de considérer de nouveaux matériaux innovants, à savoir les matériaux numériques (i.e. matériaux composites aux propriétés hybrides) [Hiller & Lipson, 2009], transformables (i.e. intégrant des capacités de changement de forme, de propriétés physiques, de couleur, de texture, de luminosité, etc.) [Ishii *et al.*, 2012] et intelligents (i.e. fonction de capteur et/ou d'actionneur) [Wilson *et al.*, 2007]. D'autre part, les avancées continues au niveau des technologies de l'information et de la communication (TIC) tendent à améliorer l'efficacité, l'adaptabilité et la durabilité des systèmes de production et faciliter leur intégration avec les modèles/processus agiles [El Kadiri *et al.*, 2016]. Ces aspects d'intégration jouent un rôle prépondérant pour engendrer des systèmes intelligents dans tous les secteurs industriels [Chen *et al.*, 2009].

Dans ce contexte, nous pouvons remarquer que, pour les domaines allant de l'ingénierie à la production, la Commission Européenne – à travers notamment l'association EFFRA⁶⁶ (European Factories of the Future Research Association) et Manufuture⁶⁷ – œuvre à développer des solutions TIC pour implémenter de plus en plus d'intelligence au sein des phases de conception, d'industrialisation et de production [EFFRA, 2013]. Celles-ci, entrant dans le cadre de la vision industrielle portée par l'initiative « Industrie 4.0 », doivent impérativement couvrir les priorités en recherche et innovation suivantes :

- Augmenter les fonctionnalités des produits par l'introduction de systèmes produit-services ;
- Intellectualiser les systèmes (i.e. adaptabilité, transformabilité, durabilité, programmabilité, Internet industriel, Internet des objets) ;
- Développer la connectivité des produits physiques vis-à-vis de leurs systèmes « parents » numériques. Il est alors question de systèmes cyber-physiques mais également de jumeaux numériques qui devront s'appliquer au triptyque Produit (maquette numérique) - Procédé (usine numérique) - Matériau (matériau numérique).

Pour l'ensemble de ces enjeux industriels, couvrant les domaines ainsi appelés de l'usine numérique (Digital Factory), l'usine virtuelle (Virtual Factory) et l'usine intelligente (Smart Factory), il convient impérativement d'intervenir en amont et de proposer de manière équilibrée :

- (i) des méthodologies avancées en conception (aide à la décision, intégration/synthèse des contraintes métier, modélisation géométrique, etc.) ;
- (ii) un chaînage numérique des différents systèmes d'informations (dédiés aux « métiers ») et applications (dédiés aux « vues ») autour de la maquette numérique du produit pour assurer une bonne fluidité des échanges d'informations techniques et une bonne interopérabilité des structures de données associées parcourant le cycle de vie d'un produit (PLM) ;
- (iii) des méthodes de gestion des connaissances basées sur les technologies sémantiques et les techniques d'intelligence artificielle.

7.2 Description générale de l'axe scientifique

Au cours de ma formation universitaire, j'ai été fortement sensibilisé et attaché au domaine de la conception mécanique intégrant une orientation métier, ce qui m'a permis de m'engager sur des propositions scientifiques encourageantes. J'ai donc naturellement choisi de poursuivre mon investigation et exploration sur cette voie tout en maintenant un degré de sincérité, de cohérence et d'ouverture scientifique. Cette section vise donc à définir le périmètre de mon champ de recherche et à préciser ses déclinaisons au niveau opérationnel, avec comme point d'appui mes travaux de recherche développés et les perspectives générées dans le cadre de ma thèse de doctorat à l'UTBM et de mon postdoc à l'EPFL (voir Figure 3.1). Pour ce faire, mon projet de recherche met en exergue l'axe scientifique suivant :

66. <http://www.effra.eu>

67. <http://www.manufuture.org>

Intégration proactive des métiers en conception et formalisation des connaissances spatio-temporelles associées : application à l'assemblage et à la fabrication additive couplée aux matériaux intelligents

Cette thématique scientifique a pour ambition de couvrir plusieurs objectifs, pouvant être considérés soit indépendamment soit de manière concourante. Nous avons alors privilégié la seconde voie, afin de garantir une cohérence au niveau de nos travaux de recherche et de maintenir une cohésion dans nos interactions avec l'équipe. De 2011 à aujourd'hui, nos activités de recherche se sont consacrées à :

- Généraliser l'approche de conception proactive pour l'assemblage afin de considérer d'autres métiers ;
- Améliorer l'articulation des métiers à intégrer en phase de conception et fluidifier les échanges d'informations techniques entre systèmes d'informations et applications d'aide à la conception ;
- Développer une structure en CAO capable d'accueillir les intentions de conception et les connaissances métier au fil de l'eau pour la génération de la géométrie du produit ;
- Réconcilier les métiers par une représentation appropriée des connaissances du couple produit-process, par exemple via l'introduction d'une dimension spatio-temporelle en s'appuyant sur les phénomènes naturels et les essais philosophiques entrant dans le champs de la conception éternaliste de l'espace-temps.

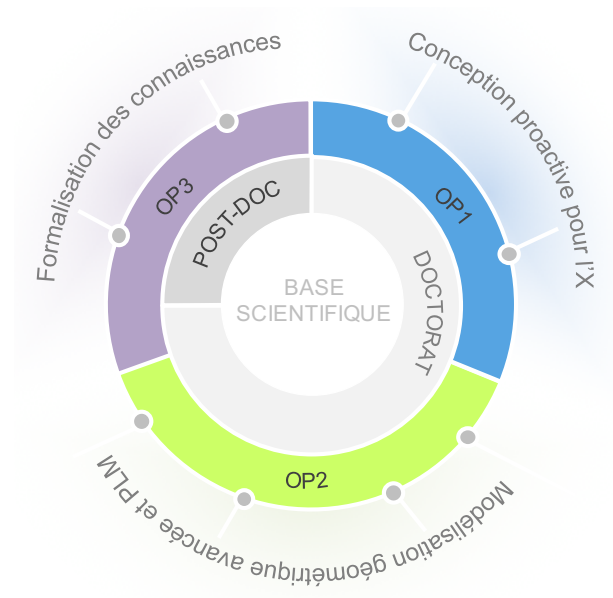


FIGURE 7.1 – Agrégation des opérations de recherche sur la base des travaux de thèse et de postdoc.

L'intérêt – porté par cette thématique de recherche – est d'intégrer et réconcilier les métiers avec la conception par la prise en compte de la dynamique spatio-temporelle inhérente à la définition conjointe du couple produit-process. Dans ce contexte et sur un plan plus opérationnel, nos investigations ont été structurées autour de trois opérations de recherche (OPs), illustrées via la Figure 7.1 et déclinées ci-après :

OP₁ Conception proactive pour l'X – Opération visant à considérer la définition de gammes métier (métiers de la fabrication additive et de l'assemblage notamment) dès la phase de conception préliminaire, afin de réutiliser judicieusement les connaissances métier jusqu'en phase de conception détaillée, sensibilisant ainsi les ingénieurs-concepteurs aux contraintes issues des métiers « critiques » situés en aval ;

→ Cette OP est présentée dans le Chapitre 8.

OP₂ Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée – Opération visant à définir, de manière avancée et descendante, des espaces de conception à différents niveaux d’abstraction (i.e. squelettes, surfaces fonctionnelles, volume-enveloppes, etc.) en environnement CAO, fluidifier les échanges d’informations techniques entre les phases de conception et les métiers à intégrer et à réconcilier les informations produit-process au sein des systèmes PLM (Product Lifecycle Management) comme support aux activités des architectes produit-process et concepteurs ;
→ *Cette OP est présentée dans le Chapitre 9.*

OP₃ Formalisation et représentation des connaissances spatio-temporelles produit-process – Opération visant à décrire qualitativement, d’un point de vue logique et sémantique, l’évolution spatio-temporelle des objets de conception au cours de leur élaboration mais également à travers leurs processus situés en aval.
→ *Cette OP est présentée dans le Chapitre 10.*

Ces trois opérations de recherche – entrant dans le périmètre des technologies prioritaires en mécanique [CETIM, 2015] – regroupent par conséquent plusieurs domaines de recherche, pour lesquelles différentes communautés scientifiques sont associées, et dans lesquelles j’ai dû clarifier mon positionnement scientifique. A ce titre, le Tableau 7.1 présente, de manière synthétique, le spectre des domaines abordés ainsi que le fort positionnement proposé dans le cadre de nos travaux de recherche.

Tableau 7.1 – Macro-positionnement des mes différentes opérations de recherche.

OP	Domaine de recherche	Positionnement (mots clés)	Communauté associée
OP ₁	Méthode de conception pour l’X Génération de gammes d’assemblage et de fabrication	Proactivité – Contexte de conception orienté métier. Représentation graphes/matrices – Raisonnement sur les relations entre composants.	Design Society – ASME – CIRP – GDR-MACS CIRP – IFIP 5.7 – GDR-MACS – S.mart
OP ₂	Conception Assistée par Ordinateur (CAO) Gestion du cycle de vie des produits (PLM)	Modélisation descendante – Entités géométriques intermédiaires. Orchestration des flux d’informations – Réconciliation produit-process – Gestion des relations entre objets techniques.	Design Society – ASME – GDR-MACS – S.mart IFIP 5.1 – GDR-MACS – S.mart
OP ₃	Description/Représentation des connaissances Philosophie analytique – Métaphysique analytique	Description qualitative – Méreotopologie spatio-temporelle – Ontologie multi-niveaux. Perdurantisme – Eternalisme.	Design Society – SDPS ⁶⁸ – IAOA ⁶⁹ – IOF ⁷⁰ APS ⁷¹ – IAOA

7.3 Incubation de la thématique scientifique au cours du temps

Entre 2011 et 2017, mes activités de recherche se sont inscrites dans un contexte de recherche dynamique et en cours de construction. L’incubation de mon axe scientifique a donc été rythmée par des décisions,

⁶⁸. Society of Design and Process Science.

⁶⁹. International Association on Ontology and its Applications.

⁷⁰. Industry Ontology Foundry.

⁷¹. American Philosophical Society.

d'ordre stratégique, prises par les structures d'enseignement et de recherche auxquelles j'ai été associées. A mon arrivée au sein du laboratoire M3M (E.A. 3318) en septembre 2011, en tant que Maître de Conférences à l'UTBM, j'ai participé à la consolidation et à l'épanouissement d'une récente équipe de recherche appelée INCIS (Ingénierie Numérique avancée pour la Conception Intégrée de Systèmes mécaniques), ce qui m'a permis de proposer ma propre thématique de recherche. Dès lors, j'ai pu poursuivre mes efforts initiés lors de mon postdoc à l'EPFL (ceci concerne plus particulièrement mon opération OP₃) mais également étendre les modèles et approches proposés dans le cadre de ma thèse à d'autres métiers (i.e. tels que proposés au sein des opérations de recherche OP₁ et OP₂).

C'est au cours de l'année suivante (année 2012) que mon laboratoire de rattachement a été intégré à un institut – appelé Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société (IRTES E.A. 7274) – regroupant ainsi quatre laboratoires de l'UTBM : LERMPS⁷², RECITS⁷³, SeT⁷⁴ et M3M. Ce rapprochement a été effectué en adéquation avec la stratégie de spécialisation intelligente des régions dans le cadre de Europe 2020 et la création des COMUE⁷⁵ [DATAR, 2012], et ceci afin de promouvoir des opérations de recherche inter-disciplinaires et trans-disciplinaires. Dans ce contexte, plusieurs domaines de spécialisation ont été recensés et retenus comme prioritaires pour les régions de Bourgogne et de Franche-Comté [CGET, 2015], devenue aujourd'hui la Grande Région Bourgogne Franche-Comté. Il s'agit en particulier des domaines suivants :

- *Matériaux et procédés avancés pour des applications sécurisées* dans le domaine « Matériaux, Mécanique, Chimie » ;
- *Usage des technologies de l'information et de la communication en réponse aux enjeux sociétaux* dans le domaine « TIC, informatique, numérique, logiciels complexes, électronique » ;
- *Véhicules communicants, conduite automatisée et services de mobilité* dans le domaine « Mobilité et Transport ».

Cette politique stratégique – concernant la distribution/catégorisation territoriale des expertises scientifiques – aura pour conséquence première le développement sur le plan régional de mes opérations OP₁ et OP₃, afin de considérer, entre autres, le métier de la fabrication additive et la représentation des connaissances métier associées. A ceci s'ajoute que l'institut IRTES a, au cours de l'année 2013, souhaité évoluer vers plus de transversalité entre ses quatre laboratoires fondateurs, en construisant plusieurs plateformes – dites « thématiques » et « processus » –, dont la plateforme ECO-CAMPUS (relative au domaine de l'énergie) basée à Belfort, la plateforme MOBILITECH (relative à la thématique transport et mobilité) basée à Montbéliard et la plateforme « processus » TITAN⁷⁶ (traitant de l'interaction mécanique-matériaux-procédés dans le contexte de l'Industrie 4.0) sur le site de Sevenans. Cette dernière plateforme – pour laquelle j'ai contribué au montage en collaboration étroite avec des collègues enseignants-chercheurs en génie mécanique, en génie industriel, en génie des matériaux et en génie des procédés de l'UTBM – offre un environnement adéquat pour l'incubation de l'ensemble de mes opérations de recherche. Pour couvrir les enjeux de l'Industrie 4.0, TITAN met en commun plusieurs briques de la chaîne de valeur, déjà existantes au sein de l'UTBM, notamment les domaines de l'ingénierie et de la modélisation numérique basées sur les connaissances métiers, la métallurgie des poudres, la fabrication additive par procédé SLM (Selective Laser Melting), l'impression 3D multi-matériaux, l'impression 4D à base de matériaux intelligents, le parachèvement des surfaces, la caractérisation, etc.

Plus récemment et suite à l'évolution du paysage de la recherche au sein de la nouvelle Grande Région Bourgogne Franche-Comté, nous avons opéré un rapprochement fort avec le laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB UMR 6303 CNRS), via la construction d'un nouveau département de recherche intitulé « Conception, Optimisation et Modélisation en Mécanique – COMM ». Officiellement intégré à ce laboratoire depuis janvier 2017, nos activités de recherche ont donc convergé vers des domaines scientifiques capables de fédérer des chercheurs au niveau de cette nouvelle région, notamment avec le laboratoire Le2i de l'Université de Bourgogne (uB) et les axes « Checksem » et « Modélisation géométrique et synthèse d'image » tel que présentés sur la Figure 7.2. Nous aborderons cet aspect plus

72. Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, les Procédés et les Surfaces.

73. Recherches et Etudes sur le Changement Industriel, Technologique et Sociétal.

74. Systèmes et Transport.

75. COMMunauté d'Universités et d'Établissements.

76. computaTional InTelligence in design and mANufacturing.

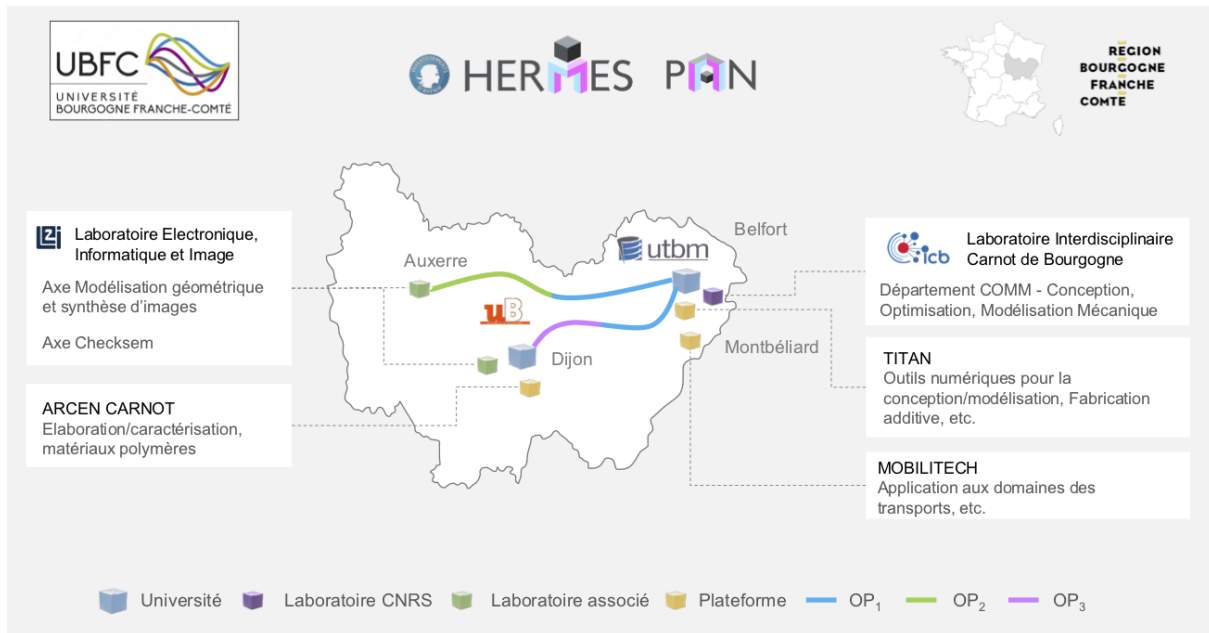


FIGURE 7.2 – Déploiement des opérations de recherche au niveau de la région Bourgogne Franche-Comté.

en détail au Chapitre 11. A une échelle nationale, la Figure 7.3 illustre les différents laboratoires associés à notre démarche, à savoir l'axe « Ingénierie Industrielle » du laboratoire Roberval de l'UTC, l'axe « Mod listion pour la simulation multiphysique et intégration des connaissances » du laboratoire Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) des Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux ainsi que l'axe « Ingénierie des connaissances » du laboratoire ERPI de l'Université de Lorraine. Quant au plan international, nos efforts se sont focalisés sur cinq universités réparties sur deux continents, dont l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal (Canada), Wayne State University (Etats-Unis), Georgia Institute of Technology (Etats-Unis), University of Strathclyde (Ecosse) et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). La Figure 7.4 montre la répartition des collaboration ainsi que leur nature en termes d'OP. Nous expliquerons l'articulation des collaborations au cours des chapitres suivants.

Tableau 7.2 – Synthèse du développement opérationnel de mes OPs   différentes échelles.

OP	Locale	Régionale	Nationale	Internationale
OP ₁	●	●	●	●
OP ₂	●	●	●	○
OP ₃	●	●	●	●

Le Tableau 7.2 ci-dessus présente une synthèse de l'état du déploiement opérationnel de mes opérations de recherche allant de l'échelle locale (i.e. laboratoire propre) jusqu'au plan international. C'est donc sur l'ensemble de ces chantiers lancés, conformément à nos objectifs scientifiques, que notre projet de recherche a pu se développer et fédérer.

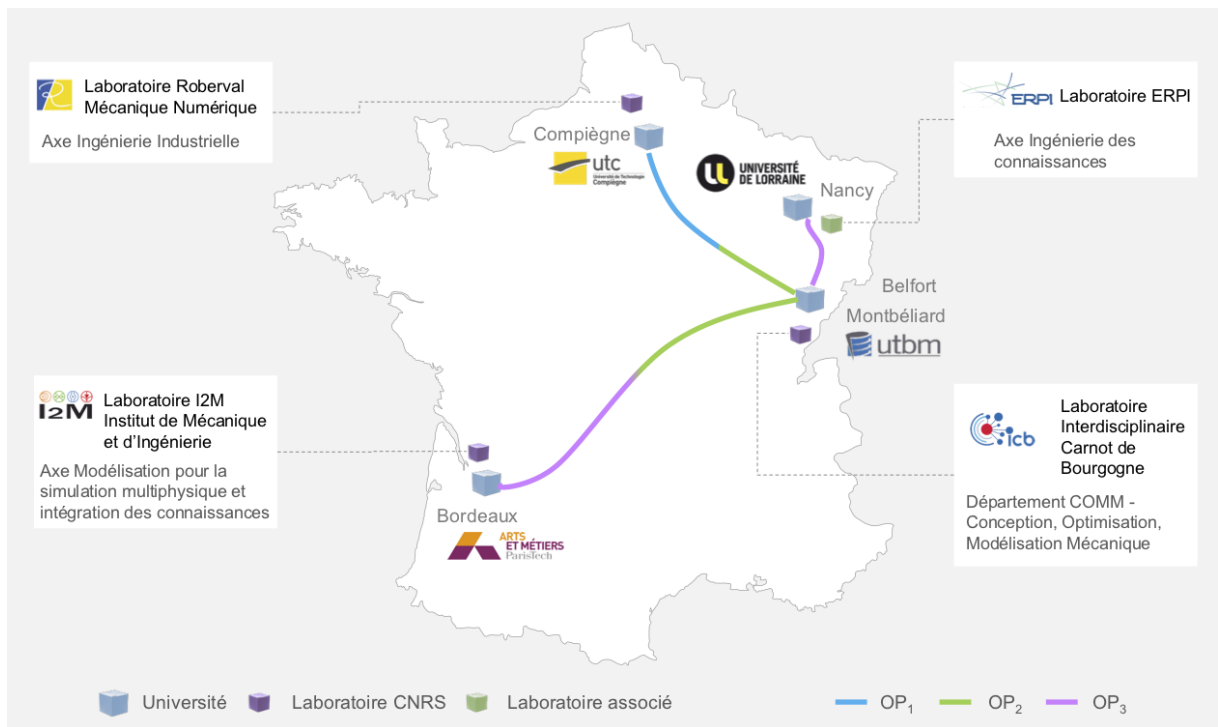


FIGURE 7.3 – Déploiement des opérations de recherche au niveau national (exorégional).

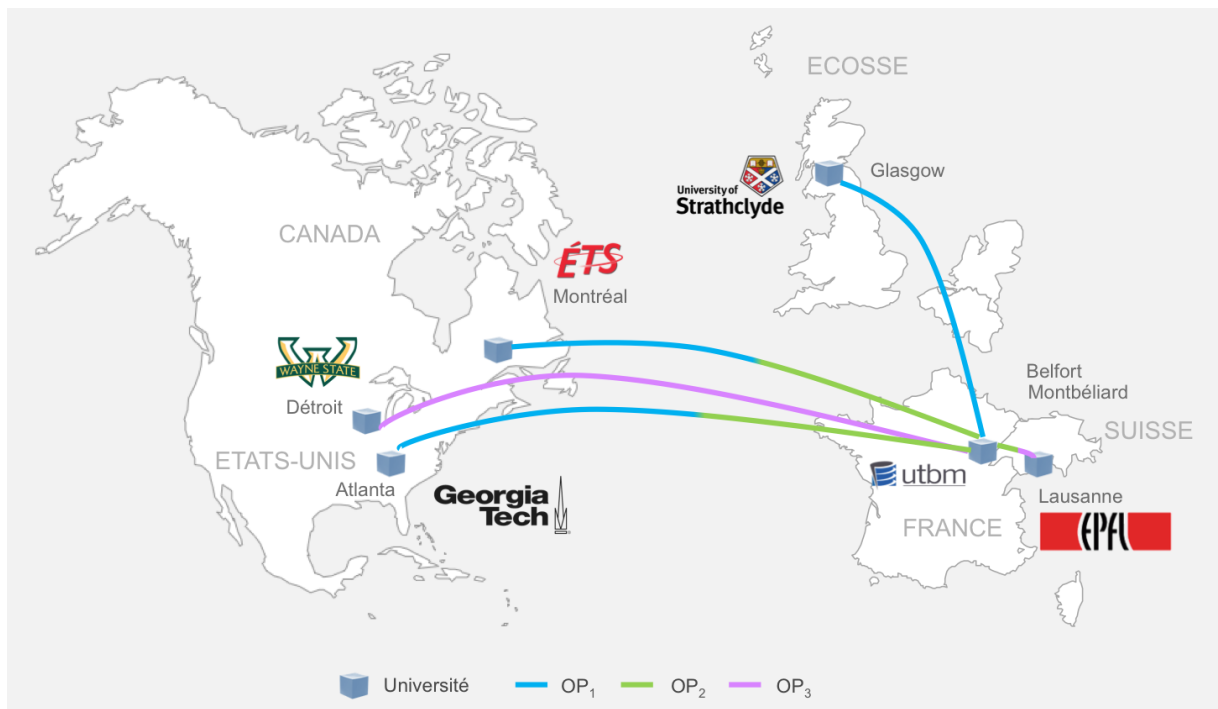


FIGURE 7.4 – Déploiement des opérations de recherche sur le plan international.

Chapitre 8

Conception proactive pour l’X (OP₁)

« *Time, is a three-fold present : the present as we experience it, past as a present memory, and a future as a present expectation (Kant). By that criterion, the world of the year 2025 has already arrived, for in the decisions we make now, in the way we design our environment and thus sketch the lines of constraints, the future is committed.* » [Dutt, 1996]

Ce chapitre vise à présenter les efforts menés au sein de l’opération de recherche traitant du domaine de la conception proactive pour l’X (OP₁).

8.1 La question d’intégration en conception

Situé à une place hautement stratégique, la phase de conception requiert la considération et l’intégration de l’ensemble des contraintes et connaissances associées aux différentes phases du cycle de vie des produits. Ceci sous-entend l’adoption de la part des architectes produit et des concepteurs d’une quantité importante de règles expertes, augmentant de ce fait la complexité de l’activité de conception [Maropoulos & Ceglarek, 2010] et la complexité algorithmique des modèles et processus métier [Kusiak & Salustri, 2007]. Au cours des trois dernières décennies, cette question a été traitée à travers plusieurs changements de paradigme, allant de l’ingénierie séquentielle à l’ingénierie concurrente [Sapuan *et al.*, 2006] et intégrée [Tichkiewitch *et al.*, 1996] (voir Figure 3.2) voire collaborative [Boujut & Laureillard, 2002; Roucoules, 2007; Lu *et al.*, 2007], facilitant ainsi l’articulation et l’intégration des métiers en phase de conception détaillée via l’assistance de systèmes expert et de moteurs d’inférences [Huang *et al.*, 1999]. Il est à noter que cette évolution a permis d’obtenir des gains potentiels, notamment via l’utilisation de règles heuristiques couplées à des données d’ingénierie quantitatives [Demoly *et al.*, 2011b].

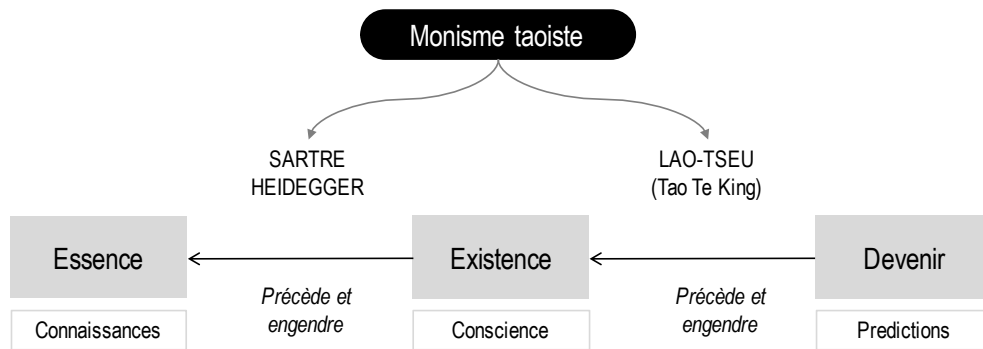
De ce fait, un ensemble de briques méthodologiques couvrant la conception pour l’X (Design for X – DFX) et la conception à X (Design to X – DTX) a vu le jour [Kuo *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 1999]. La première rassemble les nombreuses règles et contraintes métier parcourant le cycle de vie du produit à satisfaire tandis que la seconde couvre les propriétés du produit (e.g. coût, qualité, temps, etc.) à atteindre [Kimura *et al.*, 2007; Holt & Barnes, 2010]. L’intégration des métiers en conception (i.e. conception pour l’X) a suscité beaucoup d’intérêt au cours des dernières décennies au sein de la communauté. Généralement les efforts scientifiques se sont engagés à aborder un métier en particulier, que ce soit les travaux autour de la fabrication [Bralla, 1999; Brissaud & Tichkiewitch, 2000; Swift & Booker, 2003; Roucoules, 2007], du désassemblage [Knight & Curtis, 2002; Desai & Mital, 2003; Mascle & Balasoiu, 2003], du recyclage [Masanet *et al.*, 2002; Huisman *et al.*, 2003; Ardente *et al.*, 2003] et de l’assemblage [Miyakawa & Ohashi, 1986; Lucas, 1993; Boothroyd *et al.*, 2002; Barnes *et al.*, 2004].

Ce large spectre des métiers abordés a également engendré des approches différentes. Parmi les efforts, nous pouvons identifier les approches dites « réactives » car demandant une évaluation sur une géométrie définie de manière détaillée, afin d'établir un indice de performance de la solution vis-à-vis du métier confondu et/ou proposer des pistes de reconception. Dans ce cadre, l'évaluation menée peut être quantitative, qualitative voire à base de connaissances [Demoly, 2010]. De ce fait, d'autres travaux se sont focalisés sur une intégration dite « proactive », afin d'améliorer l'efficacité en conception en y apportant, le plus tôt possible, des éléments permettant de guider les concepteurs [Whitney *et al.*, 1999; Borg *et al.*, 1999; Barnes *et al.*, 2004; Skander *et al.*, 2007]. L'indépendance actuelle des différentes techniques – entrantes dans le champs du DFX – nécessite la mise en place de mécanismes d'articulation afin de faire des compromis lors de la prise de décisions et d'apporter de la fluidité au sein du processus de développement. Pour ce faire, il est donc opportun d'alimenter les ingénieurs-concepteurs avec des connaissances appropriées au bon moment, permettant par conséquent d'obtenir une « bonne » (au sens crédibilité) conception/définition géométrique du produit [Horváth, 2004].

8.2 Cadre méthodologique DFX

8.2.1 Proactivité : de la nécessité de s'inspirer de la philosophie

La proactivité peut se définir comme la sensibilisation à des événements futurs possibles permettant d'augmenter un contexte dans lequel se situe un acteur métier. Partant d'une volonté d'explorer une direction originale par la prise en compte d'événements futurs pour activer des connaissances passées dans un contexte présent, notre orientation scientifique s'est donc construite sur la base de fondements philosophiques et métaphysiques portant sur le « monisme » [Schaffer, 2009] couplé au « taoïsme » [Lao Tseu, 1842] pour devenir le « monisme taoïste ». Le monisme, comme courant philosophique, s'est construit à partir de position chamanique chinoise [Feigl, 2002; Smith, 2005]. Celle-ci exprime une attitude fondamentalement naturaliste et enseigne que tout ce qui existe constitue une unité organique où tout est dans tout, où tout interagit avec tout, où tout est cause et effet de tout, où tout est interdépendant de tout. Il désigne alors un système philosophique naturaliste qui explique le monde en dehors de toute révélation divine par un principe unique, naturel et immanent.



Le **PROCESSUS** précède et engendre la **STRUCTURE**

FIGURE 8.1 – Base philosophique choisie pour notre vision de la conception proactive pour l'X.

De ce référentiel, peuvent être associés les courants de pensée de philosophes, tels que Martin HEIDEGGER et Jean-Paul SARTRE, qui ont notamment développé des assertions pour statuer que l'existence/l'Être (la conscience) précède et engendre l'essence (la connaissance) [Heidegger, 1927; Sartre, 1946]. D'un autre côté, ce que nous pouvons interpréter de Lao Tseu en termes modernes est que « le devenir précède et engendre l'Être (ou l'existence) ». En somme, nous pouvons retenir que « le processus précède et engendre la structure » [Lao Tseu, 1842], tel que présenté sur la Figure 8.1. Cette articulation,

inspirée de la philosophie, sera développée et appliquée pour les différentes briques DFX abordées au sein de cette opération de recherche.

8.2.2 Augmentation du contexte de conception par les prédictions

Le fondement métaphysique présenté ci-dessus ouvre des perspectives intéressantes quant à améliorer l'efficacité des techniques dans le domaine du DFX. L'articulation « Essence-Existence-Devenir » permet d'introduire des associations évidentes avec le triptyque « connaissance, conscience (à travers un contexte ou une situation) et prédiction », où le contexte de conception doit avoir un rôle central [Baxter *et al.*, 2007], être formellement décrit et être capitalisé afin de jouer le rôle d'attracteur de connaissances [Hong *et al.*, 2009; Demoly *et al.*, 2013ab; Peng *et al.*, 2017]. Plusieurs travaux de recherche ont fourni une description claire des concepts de donnée, d'information et de connaissance pour le domaine de la conception [McMahon *et al.*, 2004], y compris pour distinguer les notions de contexte et de situations dans le cadre de systèmes à base de connaissances [Gero & Smith, 2009]. Le contexte de conception a, quant à lui, reçu de nombreuses définitions au cours des deux dernières décennies [Charlton & Wallace, 2000; Rehman and Yan, 2004; Shahare and Gurumoorthy, 2007], dont une le décrivant comme « un ensemble d'informations environnantes à l'objet de conception dans une dimension temporelle et spatiale permettant de comprendre la signification et la projection de son état dans un futur proche ». Cette définition est adaptée de celle proposée par [Endsley, 1995] à propos du concept de « conscience en situation ». Le contexte est ainsi considéré comme un point de repère capable d'envelopper une activité en cours et d'apporter des éléments pour son interprétation appropriée [Goffman, 1974].

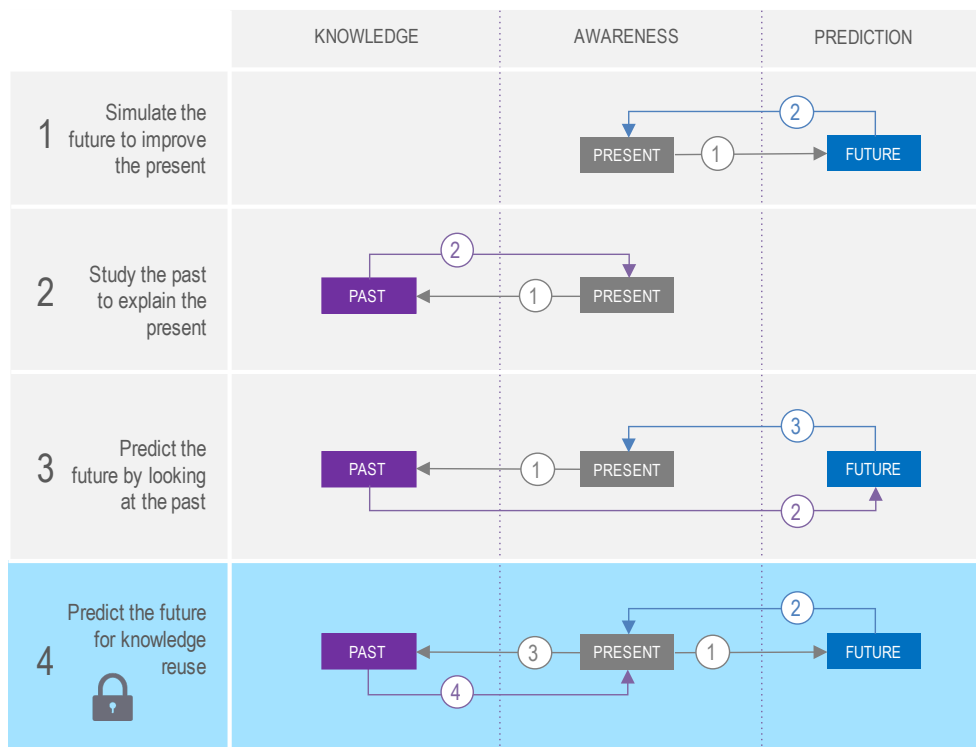


FIGURE 8.2 – Scénarios de réutilisation des connaissances [Marconnet, 2017].

Parmi les différentes conceptions temporelles existantes des systèmes physiques mises en exergue par [Pschetz & Bastian, 2017], à savoir la durée (court-terme, long-terme), la rythme (lent, rapide, etc.) et la direction (passé-présent et futurs possibles, etc.), le cadre méthodologique de conception proactive pour l'X se focalise principalement sur la « direction » dans le but de « rythmer » l'activité des architectes

produit et des concepteurs. Dès lors, la conception proactive pour l'X permet de générer des contextes futurs (via des processus métier notamment), afin d'améliorer/augmenter la sensibilité des architectes produits et des concepteurs par la structuration/articulation des intentions. Ce type d'approche va nous permettre de construire notre concept original de « contexte augmenté », car combinant des informations contextuelles issues du présent avec des informations futures décrivant un processus métier, et ceci bien avant que la phase de définition géométrique du produit ne soit réalisée. De cette manière, la compréhension des informations consolidées lors des phases de conception préliminaire et détaillée va demander une représentation et une description adaptées du contexte de conception et des intentions afin de faciliter la réutilisation des connaissances [Zamenopoulos & Alexious, 2007; Chandrasegaran *et al.*, 2013]. Ceci est abordé par l'OP₃ au sein du Chapitre 10.

A cet effet, la littérature fait état de trois scénarios visant à sensibiliser les concepteurs lors de la prise de décision et articulés via trois temporalités (passé, présent et futur). La Figure 8.2 présente ces scénarios et introduit également un quatrième qui sera ici considéré comme notre verrou scientifique [Marconnet, 2017]. Le premier scénario – appliqué par les systèmes d'aide à la décision – permet notamment d'améliorer le présent en simulant le futur. Le deuxième scénario – utilisé par les systèmes à base de connaissances – consiste à étudier les événements passés afin d'être en mesure d'expliquer le présent. Le troisième scénario – qui concerne plus particulièrement les systèmes prédictifs – étudie le passé pour prédire le futur. La présente problématique scientifique (scénario 4 de la Figure 8.2) concerne le développement de techniques DFX proactives exploitant des gammes métier futures dans le but d'augmenter le contexte de conception. Il s'agit donc de mettre en perspective les intentions des architectes produit et des concepteurs afin d'exploiter les bonnes connaissances au bon moment. Ce scénario prometteur entre dans le cadre des approches émergentes de type « connaissances/services sur demande » (knowledge/service on-demand) [Sampson *et al.*, 2002; Chen & Chen, 2014; Spitzer, 2016] couplées aux outils/applications informatiques « sensibles au contexte » (context-aware system) [Dey, 2000; Dhuieb *et al.*, 2016].

8.2.3 Incubateur de conception

La conception proactive implique de prendre en considération les connaissances associées aux phases du cycle de vie en conception, afin de favoriser l'émergence de la géométrie. Cela signifie que les concepteurs doivent pouvoir avoir accès à ces connaissances au bon moment et au bon format. Le cadre générique proposé à la Figure 8.3 présente la dynamique inhérente au souhait d'apporter une proactivité dans la prise en compte de contraintes et de connaissances métier dès les phases amont de la conception.

A travers les trois temporalités citées précédemment, ce cadre générique – considéré comme un processus d'incubation de la géométrie – se décompose en cinq étapes s'enchaînant dans un cycle continu pour accompagner l'activité de conception, allant de la phase préliminaire à la phase détaillée. Sous chaque temporalité, l'incubateur de conception fait intervenir des acteurs métier (i.e. expert métier, architecte produit, concepteur et gammiste) et des systèmes d'informations et outils logiciel pour couvrir les besoins en modélisation et en raisonnement (i.e. base de connaissances, CAO, Product Data Management – PDM, Computer Aided x Planning – CAxP et x Process Management – xPM). Ces différentes étapes peuvent être décrites de la manière suivante :

- ① **Description/interprétation du contexte de conception** – Le point de départ de l'incubateur consiste à décrire et interpréter le contexte de conception dans lequel la géométrie de la solution doit émerger. Ceci demande de prendre en compte les intentions de l'architecte produit et des concepteurs (notamment les aspects logiques et technologiques) ainsi que le niveau de contrôle (ou de situation) du modèle géométrique (en termes de squelettes, surfaces, volumes-enveloppes, etc.).
- ② **Génération de gammes métier** – Sur la base d'informations préliminaires en conception, cette étape consiste à générer des séquences ou gammes métiers associées aux différentes phases du cycle de vie, telles que l'assemblage, la fabrication, le désassemblage, etc. Elle se situe à un niveau crucial et original dans la mesure où elle va initier l'activité du gammiste très tôt et donc apporter une orientation cycle de vie en conception par l'apport de contexte métier qualitatif (voir Figure 3.2). Sur la base des intentions de conception données, un nombre conséquent de séquences/gammes admissibles (réalisables) sera généré. Le second objectif est d'apporter une aide à décision pour identifier les gammes métier conformes aux exigences de production ainsi que de sélectionner celles

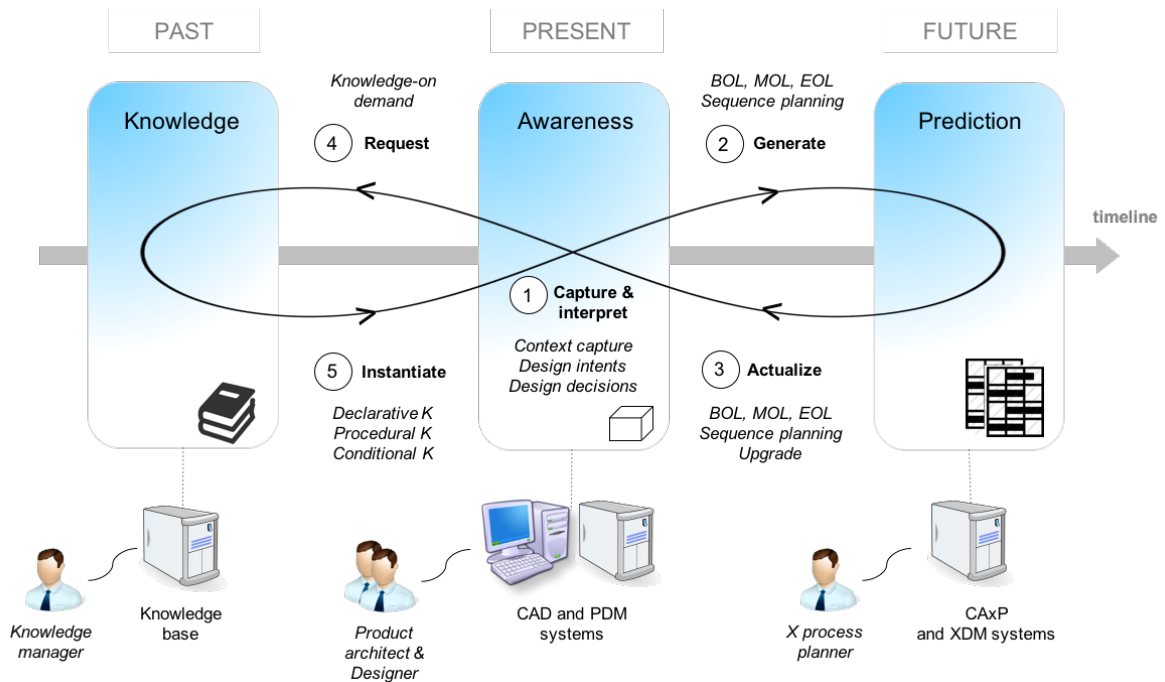


FIGURE 8.3 – Cadre méthodologique de conception proactive pour l'X.

permettant de prendre en compte les contraintes et connaissances métier de manière équilibrée.

- ③ **Augmentation du contexte de conception** – Sur la base de la gamme sélectionnée par le gameur, cette étape vise à consolider le contexte de conception initial en y apportant une orientation métier. En outre, le contexte intègre alors des intentions couplées produit-process permettant, d'une part, de structurer le produit, et d'autre part, de structurer les composants. Cet enrichissement du contexte permettra une identification plus précise des connaissances pertinentes.
- ④ **Requête de connaissances** – Cette action est nécessaire et doit demeurer active tout au long du processus de conception. A tout moment, le contexte augmenté est interprété par les intentions produit-process et les informations techniques environnantes, et fait donc l'objet de requêtes de connaissances au niveau de l'ontologie multi-niveau (globale, domaine et application). Cette étape permet également d'assurer – via des inférences logiques au sein de l'ontologie multi-niveau – que les informations identifiées, décrivant le contexte augmenté, sont bien cohérentes entre elles.
- ⑤ **Activation et instanciation des connaissances** – Enfin, l'incubateur de conception termine son cycle par le déclenchement et l'instanciation des configurations de connaissances appropriées. Ceci concerne plus particulièrement l'identification des connaissances conditionnelles pour mettre en application des connaissances déclaratives et procédurales au cours de la conception et de la phase de définition géométrique.

Ces différentes étapes seront mises en exergue dans les sections suivantes et seront également opérationnalisées au sein du Chapitre 9 et appuyées par une solide base théorique au Chapitre 10.

8.3 Conception orientée assemblage

Cette section présente l'application de notre concept d'incubateur de conception appliqué au métier de l'assemblage. Faisant cohérence aux travaux de recherche réalisés dans le cadre de ma thèse, les éléments présentés vont insister sur l'élaboration du contexte augmenté en fonction de la séquence d'assemblage sélectionnée et des diverses situations de conception. Par expérience, nous avons pu remarquer que la

conception orientée assemblage a un rôle prépondérant au niveau de la structuration du produit et déterminant quant à la réalisation de la solution [Demoly, 2010]. Il s'agit toutefois de pouvoir aller au-delà de cet aspect en y intégrant un degré d'accompagnement entre la phase de conception préliminaire et celle de la conception détaillée.

8.3.1 DAMON - Contexte augmenté et orienté assemblage

Le cadre méthodologique – baptisé DAMON (Design context AugMENTatiON framework) – est l'application de l'incubateur de conception au domaine de l'assemblage [Marconnet, 2017]. Dans ce contexte, DAMON va exploiter les cinq étapes principales de l'incubateur. L'étape initiale consiste à établir un contexte de conception à base de relations composant-à-composant (i.e. relations cinématiques décrivant la nature des contacts physiques entre les pièces) permettant de situer l'activité de l'architecte produit. A partir de ces informations préliminaires, le gammiste a la possibilité d'exploiter notre algorithme de génération de séquences d'assemblage ASDA (Assembly Sequence Definition Algorithm) afin de construire sa gamme d'assemblage intégrant des informations d'ordre technologiques (par exemple, des relations technologiques permettant de réaliser des comportements cinématiques souhaités sur lesquels sont identifiés des opérations d'assemblage) et des contraintes de précédence [Demoly *et al.*, 2011b]. Une fois ces prédictions établies, celles-ci vont être superposées au contexte de conception initial pour construire le contexte augmenté.

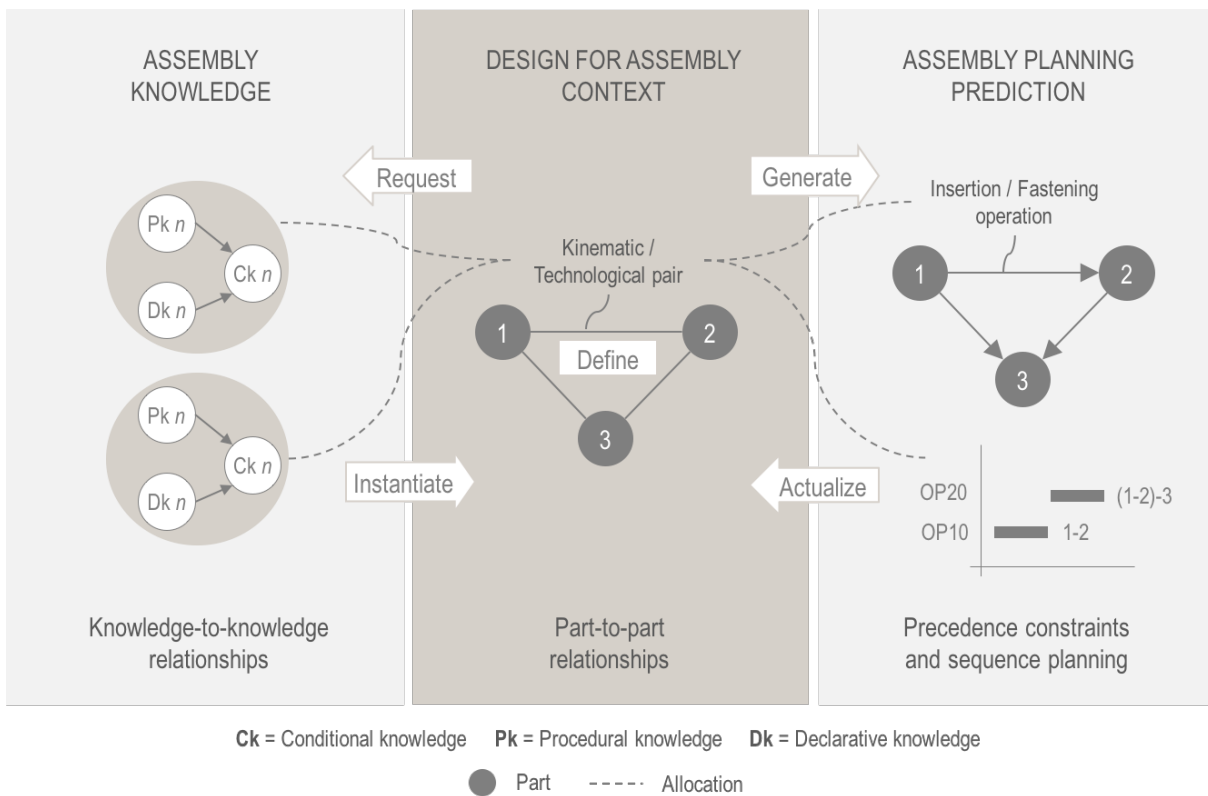


FIGURE 8.4 – Cadre méthodologique DAMON.

Dans notre cas, la contribution que nous proposons pour ce concept de « contexte augmenté » peut se présenter sous la forme d'un graphe spatio-temporal et/ou via une sémantique appropriée à coupler à la bonne situation de conception [Del Mondo, 2011; Gruhier, 2015]. Une description formelle – au niveau de la représentation spatio-temporelle – est couverte par notre OP₃ et est présentée au Chapitre 10 de ce mémoire. Le Figure 8.5 introduit les diverses situations de conception parcourant la phase de

conception préliminaire, où nous pouvons retrouver les différents niveaux de contrôle en fonction du niveau de décision prise (i.e. relation d'assemblage, squelette d'assemblage, squelette d'interface, surface fonctionnelle et volume-enveloppe). Les situations de contrôle géométrique seront détaillées au sein du prochain chapitre.

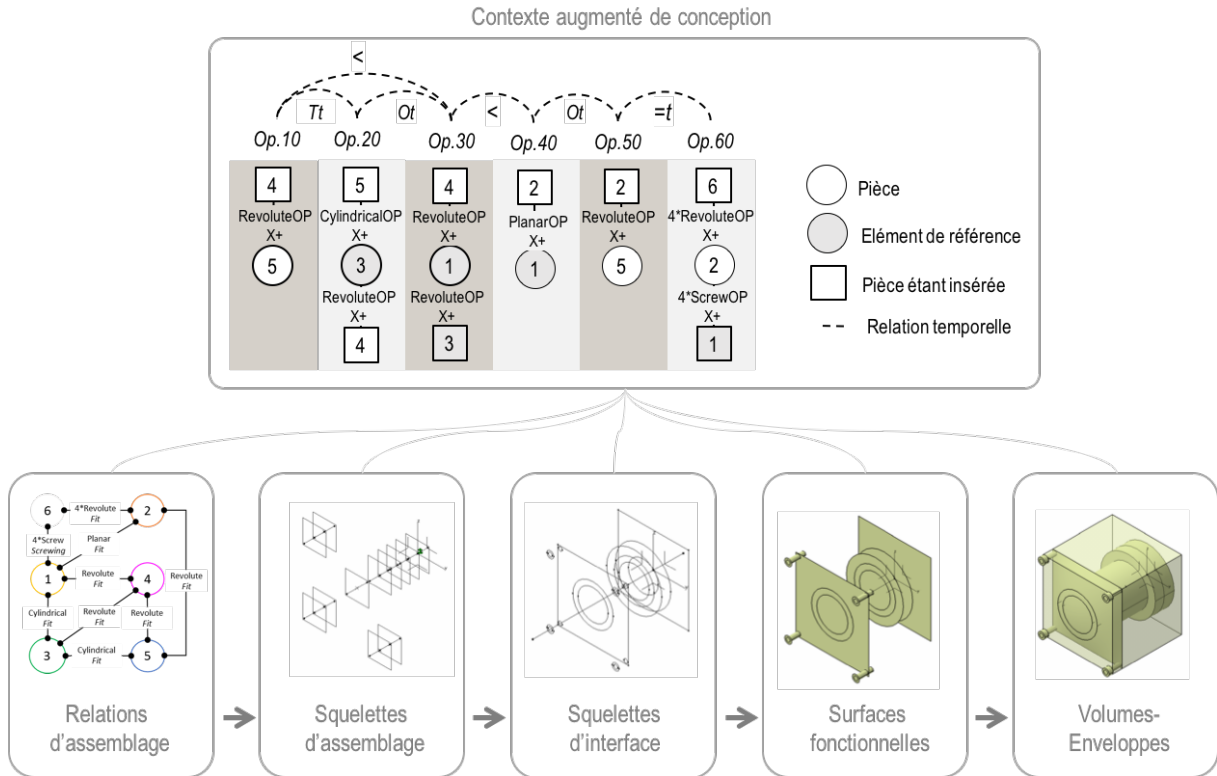


FIGURE 8.5 – Contexte augmenté et situations de conception assurant l'émergence du modèle géométrique.

En conséquence, ce contexte augmenté, représenté sous la forme d'un graphe spatio-temporel, permet de décrire un contexte technico-géométrique au cours du temps. Ce graphe est composé de régions temporelles associées aux opérations d'assemblage identifiées par le gammiste qui sont liées par des relations temporelles. Au sein de chaque région temporelle, l'état des différents composants à assembler est décrit. Nous pouvons ainsi retrouver qu'une pièce est considérée comme élément de référence ou bien qu'une pièce est en train d'être insérée. Ce graphe de contexte orienté fait donc intervenir à la fois des symboles spécifiques et de la sémantique pour comprendre ce qui est stabilisé et ce qui est en mouvement. Une description approfondie de ce graphe a été proposée dans [Gruhier, 2015 ; Gruhier *et al.*, 2016] et sera rappelé au sein du Chapitre 10.

8.3.2 Requête et instanciation des connaissances

L'identification des connaissances a été pensée via le levier du contexte augmenté couplé aux situations de conception, constituant ainsi les conditions de recherche. Ces conditions sont nécessaires afin de savoir quand et pourquoi utiliser les connaissances. Pour ce faire, nous avons recensé dans la littérature trois types de connaissances particulièrement pertinents, à savoir les connaissances déclaratives (savoir-quoi), les connaissances procédurales (savoir-comment) et les connaissances conditionnelles (savoir-où et savoir-quand) [Tardif, 1992 ; Kim & Kim, 2016]. Les connaissances déclaratives correspondent aux connaissances théoriques se rapportant à des faits, des règles, des lois ou des principes. Il s'agit de connaissances essentiellement statiques ou inertes, invariantes d'un individu à l'autre [Gagné, 1985]. Les connaissances

procédurales sont associées au comment et à la procédure de l'action. Par contre, ce sont des connaissances dynamiques qui ne peuvent se développer que dans un contexte d'action et qui sont sujettes à une marge de variabilité d'un individu à l'autre. Les connaissances conditionnelles, quant à elles, correspondent au pourquoi et au quand de l'action, en se rapportant aux conditions de l'action. Ce sont des connaissances stratégiques qui permettent de déterminer le moment et le contexte dans lequel il est approprié d'utiliser telle procédure et/ou telle connaissance déclarative. Elles sont également fondamentalement dynamiques et spécifiques à chaque individu.

Ainsi ces dernières permettent de rendre les connaissances déclaratives actives et les connaissances procédurales utilisables à bon escient. Etant donné qu'une connaissance peut être considérée comme une information au sein d'un contexte, son instantiation dépendra à la fois de la situation et du contexte [Chandrasegaran *et al.*, 2013], donc des informations (au temps « présent ») et des prédictions (temporalité « futur ») nous concernant. L'articulation que nous proposons fait intervenir les connaissances conditionnelles en tant qu'attracteurs et moyens de conjonction des connaissances déclaratives et procédurales. Structurées par des implications logiques de type « Si ... Alors ... », ces connaissances conditionnelles peuvent être exploitées pour identifier les connaissances déclaratives dans un premier temps. A ce titre, la Figure 8.6 présente la première implication activant les connaissances déclaratives (Dk). La seconde, quant à elle, permet d'inférer et d'extraire des connaissances procédurales (Pk) à partir des connaissances déclaratives préalablement identifiées, afin d'assurer l'introduction appropriée (bonnes pratiques) des connaissances déclaratives au sein du contexte augmenté tout au long de la conception.

1. RAISONNEMENT AVEC Dk



2. RAISONNEMENT AVEC Pk



FIGURE 8.6 – Raisonnements autour des connaissances déclaratives et procédurales.

Il est à noter que la capitalisation des connaissances déclaratives et procédurales est actuellement réalisée par des spécialistes sur la base de retours d'experts métier. La Figure 8.7 illustre plusieurs exemples de connaissances capitalisées pour décrire des fonctions d'assemblage. Pour chacune des fonctions (e.g. accessibilité, auto-alignement, centrage, etc.), on peut retrouver les connaissances déclaratives (Dk) et procédurales (Pk) via les connaissances conditionnelles (Ck). Par exemple, la fonction d'accessibilité (accessibility feature à la Figure 8.7) présente une connaissance qui facilite l'insertion du composant, lorsque celui-ci est entouré de parois ne permettant pas à l'opérateur de le voir ou de l'insérer (avec la main ou à l'aide d'un outil). Ainsi, le fait de considérer le contexte augmenté permet de construire une connaissance conditionnelle adaptant les connaissances inertes à ce besoin précis, entraînant par conséquent la génération d'un volume pour l'accès et la vision nécessaire à l'opérateur pour insérer le composant.

8.3.3 Implémentation et cas d'études

Les travaux de recherche – réalisés au sein de cette opération et plus particulièrement au niveau de l'intégration du métier de l'assemblage en conception – ont été outillés via des développements propres et

NOM	DESCRIPTION - ILLUSTRATION	DESCRIPTION DE LA RÈGLE DE CONCEPTION (Dk)	BONNE PRATIQUE (Pk)
Accessibility feature		<p>IF</p> <p>(OPn : y is insert in base part x : All kinematic pair positioning) temporarily precedes (OPn : z is insert in base part x : All kinematic pair positioning) with the same assembly direction</p> <p>AND</p> <p>Assembly skeleton elements: 1 line and 1 plane (perpendicular)</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (volume): Accessibility feature represented by a volume, is apply in order to ease access and vision of part</p> <p>AND</p> <p>2 relations and parameters: Width (mm) = 7mm < Width < 80mm Height (mm) = 7mm < Height < 80mm</p> <p>AND</p> <p>1 cylinder or cuboid volume ∈ plane following assembly direction</p>	<p>IF</p> <p>1 annotation on front view (volume): Accessibility feature represented by a volume, is apply in order to ease access and vision of part</p> <p>AND</p> <p>2 relations and parameters: Width (mm) = 7mm < Width < 80mm Height (mm) = 7mm < Height < 80mm</p> <p>AND</p> <p>1 cylinder or cuboid volume ∈ plane following assembly direction</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (volume):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Select line and plane 2. Generate cylinder or cuboid volume 3. Add relations and parameters Width and Height 4. Add annotations on front view 5. Compute accessibility feature
Chamfer feature		<p>IF</p> <p>OPn : y is insert in x : CylindricalOP or RevoluteOP or ScrewOP</p> <p>AND</p> <p>Volume-envelope element: 1 cylinder or cuboid</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (volume): Chamfer feature is apply in order to ease insertion of insert part</p> <p>AND</p> <p>2 relations and parameters: Diameter 1 (mm) < Diameter 2 (mm) Clearance (mm) = (Diameter 2 (mm) - Diameter 1 (mm)) / Diameter 2 (mm)</p> <p>AND</p> <p>1 chamfer feature on volume, following assembly direction</p>	<p>IF</p> <p>1 annotation on front view (volume): Chamfer feature is apply in order to ease insertion of insert part</p> <p>AND</p> <p>2 relations and parameters: Part diameter 1 (mm) < Diameter 2 (mm) Clearance (mm) = (Diameter 2 (mm) - Diameter 1 (mm)) / Diameter 2 (mm)</p> <p>AND</p> <p>1 chamfer feature on volume, following assembly direction</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (volume):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Select axial face of volume x 2. Select radial face of volume 3. Generate chamfer feature 4. Add relations and parameters Clearance, Diameter 1 and Diameter 2 5. Add annotations on front view 6. Compute chamfer feature
Self-aligning feature		<p>IF</p> <p>(OPn : y is insert in Base part x : PlanarOP) temporarily precedes (OPn : u is insert in parts x and y : CylindricalOP or RevoluteOP or ScrewOP)</p> <p>OR</p> <p>(OPn : y is insert in Base part x : PlanarOP) temporarily precedes (OPn : u is insert in part x : CylindricalOP or RevoluteOP or ScrewOP) temporarily precedes (OPn : u is insert in part y : CylindricalOP or RevoluteOP or ScrewOP)</p> <p>AND</p> <p>Assembly skeleton elements: 1 line and 1 plane (perpendicular)</p> <p>Interface skeleton element: 1 circle or rectangle ∈ Plane</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (surface): Self-aligning feature is apply in order to ease alignment of insert part</p> <p>AND</p> <p>1 circular or rectangular surface following assembly direction</p>	<p>IF</p> <p>1 annotation on front view (surface): Self-aligning feature is apply in order to ease alignment of insert part</p> <p>AND</p> <p>1 circular or rectangular surface following assembly direction</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (surface):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Select line and plane 2. Coincide circle or rectangle interface 3. Add annotations on front view 4. Generate circular or rectangular surface following assembly direction
Reorientation feature		<p>IF</p> <p>(OPn : u is insert in base part x : All kinematic pair positioning) temporarily precedes (OPn : v is insert in base part x : All kinematic pair positioning) with the same assembly direction</p> <p>OR</p> <p>(OPn : u and v is insert in base part x : All kinematic pair positioning) with the same assembly direction</p> <p>AND</p> <p>Assembly skeleton elements: 1 line or 1 plane (perpendicular) or 1 point</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (skeleton): Reorientation of base part x is apply in order to reorient parts, by following the same assembly direction with the insert parts</p> <p>AND</p> <p>1 plane (perpendicular) and 1 line constraint in the positive assembly direction of the assembly coordinate system fixture</p> <p>1 assembly coordinate system fixture</p>	<p>IF</p> <p>1 annotation on front view (skeleton): Reorientation of base part x is apply in order to reorient parts, by following the same assembly direction with the insert parts</p> <p>AND</p> <p>1 plane (perpendicular) with line constraint in the positive assembly direction of the assembly coordinate system fixture</p> <p>1 assembly coordinate system fixture</p> <p>THEN</p> <p>1 annotation on front view (skeleton):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Select line or plane (perpendicular) or point 2. Generate plane (perpendicular) and line 3. Coincide plane 4. Generate assembly coordinate system fixture 5. Coincide assembly skeleton axis system of fixture with assembly skeleton axis system 6. Add annotations on front view 7. Change orientation of assembly skeleton axis system

FIGURE 8.7 – Raisonnement via les connaissances conditionnelles.

appliqués à des cas industriels au sein de la société ACCELINN. Tenant compte du caractère confidentiel des travaux, nous avons délibérément choisi un projet d'ordre pédagogique (i.e. une pince de désincarcération), afin d'illustrer les concepts proposés. Dans ce contexte, nous nous sommes appuyés sur (i) un outil de configuration de connaissances métier, baptisé *KrossRoads* et développé dans le cadre du projet pôle de compétitivité INGÉPROD [Vernier, 2014], un outil de CAO *CATIA V5* ainsi qu'une application de type carrefour, *Pegasus*⁷⁷. Cette dernière – qui a fait l'objet de spécifications fonctionnelles et techniques lors de ma thèse – a reçu des développements complémentaires pour supporter nos diverses opérations de

77. Product design Engineering based on Generative Assembly SeqUenceS planning

recherche. Nous présenterons, de manière détaillée, l'application Pegasus lors du prochain chapitre.

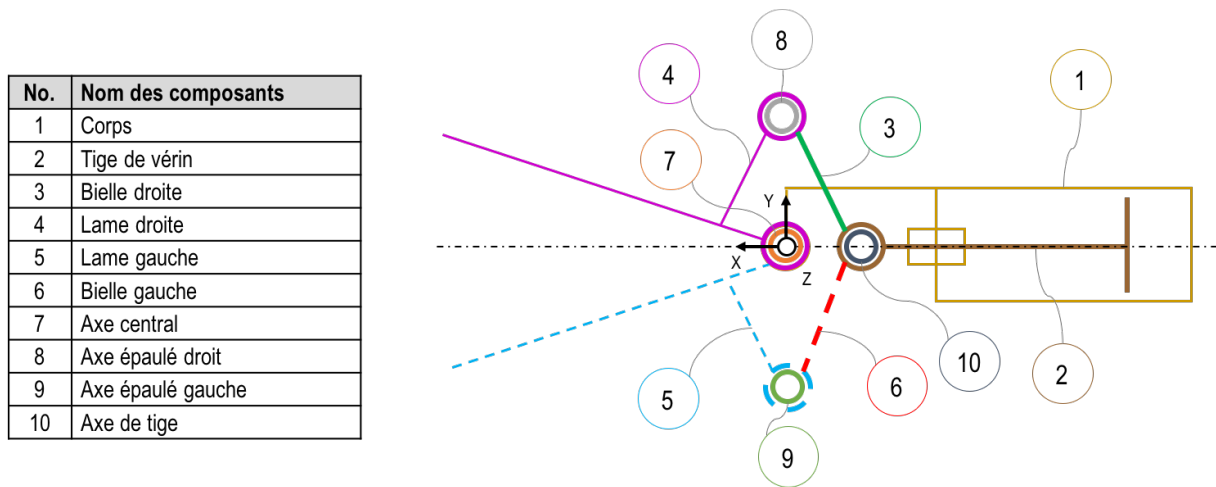


FIGURE 8.8 – Elaboration des informations conceptuelles (nomenclature initiale dotée de la liste des composants et des liaisons cinématiques) associées à la pince de désincarcération.

La Figure 8.8 présente le cas d'études d'une pièce de désincarcération utilisée par les pompiers. Nous pouvons retrouver sur cette figure l'ensemble des informations nécessaires au déclenchement de l'approche DAMON, à savoir une nomenclature initiale et un schéma cinématique du système mécanique à concevoir. Sur cette base peuvent être listées les différentes relations de contact physique entre les composants du produit (Figure 8.9). Ces relations seront donc les supports des intentions de conception et d'assemblage, et sont définies au sein de l'outil Pegasus via le graphe orienté. Une fois ce graphe réalisé, Pegasus va exploiter les algorithmes de génération de séquences d'assemblage [Demoly *et al.*, 2011a] et donner la possibilité au gammiste de choisir sa séquence, afin de déterminer les différentes opérations d'assemblage.

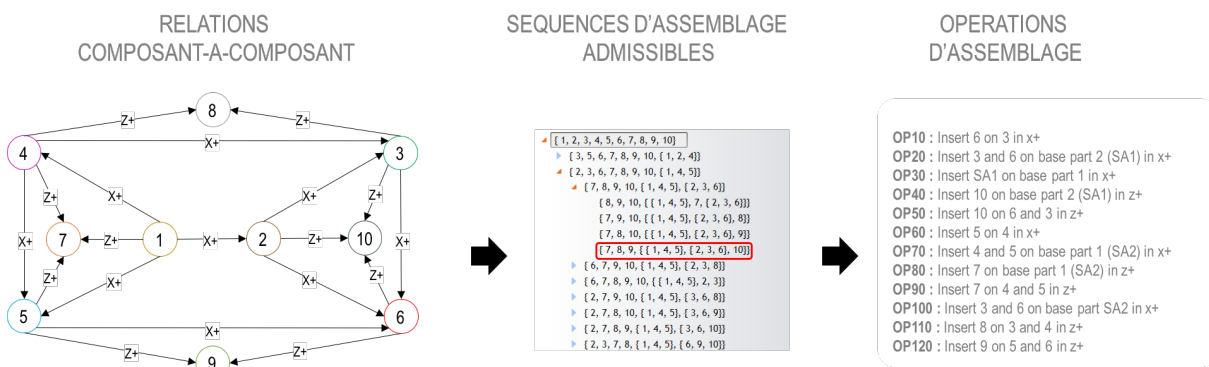


FIGURE 8.9 – Génération des séquences d'assemblage admissibles et des opérations d'assemblage via l'application Pegasus.

Sur la base des opérations d'assemblage déterminées, le contexte augmenté de conception peut alors se générer au sein de l'outil Pegasus. Celui-ci offre la possibilité à l'architecte produit et au concepteur de visualiser les informations relationnelles du produit en mouvement, c'est-à-dire sous trois dimensions, spatiale, temporelle et spatiotemporelle. Ces informations sont alors exploitées pour effectuer des requêtes de connaissances dans notre base de connaissances KrossRoads. Les connaissances déclaratives et procédurales – capitalisées dans cette base – sont alors activées et instanciées sous forme d'annotations dans

l'environnement CATIA V5 par l'utilisation de « templates » pour les injecter sur les entités géométriques développées pour les diverses situations de conception (voir Figure 8.10).

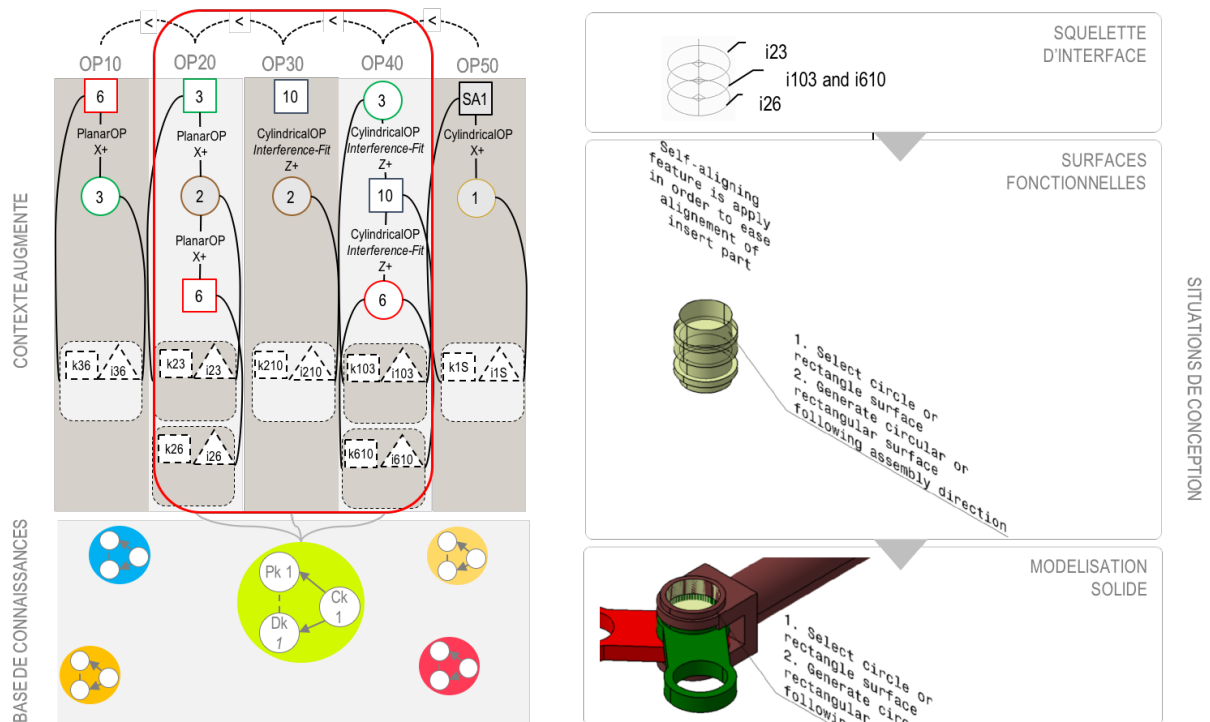


FIGURE 8.10 – Définition du contexte augmenté, requête de connaissances et instantiation en CAO.

Pour ce cas d'études, nous avons contextualisé l'activité de conception sous trois scénarios, afin d'illustrer l'impact de la prise en considération de la séquence d'assemblage au sein du contexte de conception. La Figure 8.11 présente les trois explorations avec pour critères d'évaluation les temps d'assemblage, le niveau d'efficacité DFA de [Boothroyd *et al.*, 2002] ainsi que le nombre de connaissances utilisées. Le niveau d'efficacité est un indicateur d'analyse de la conception par rapport au point de vue de l'assemblage, l'objectif étant d'obtenir un ratio de 60% afin de minimiser le nombre de composants.

Sur cette figure, le premier scénario vise à montrer la réutilisation de connaissances sans considérer la séquence d'assemblage, on se retrouve donc dans le cas d'un processus classique où les connaissances sont utilisées par lot. Pour ce cas, nous pouvons remarquer que le ratio d'efficacité en conception se situe à un niveau modeste et que le nombre de connaissances d'assemblage exploitées se voit faible. Le deuxième scénario, par contre, propose de considérer une séquence d'assemblage en particulier dès les phases amont afin de sensibiliser le concepteur aux intentions du gammiste. Il en résulte une conception plus appropriée au métier de l'assemblage (de par son niveau d'efficacité notamment) et un nombre plus important de connaissancesinstanciées. Enfin, le dernier scénario présente également une prise en compte d'une séquence d'assemblage différente avec des indicateurs d'analyse similaires au scénario 2. Par rapport à ce dernier, le fait de considérer une autre séquence va sensiblement modifier le contexte augmenté et naturellement les requêtes de connaissances, d'où une géométrie résultante différente. Ceci semble tout à fait logique puisque les connaissances sont intimement liées au contexte, et des intentions différentes mènent généralement à des solutions différentes.

A ce propos, la figure ci-dessous (Figure 8.12) présente la distribution des connaissancesinstanciées à travers les différentes situations de conception pour les trois scénarios étudiés de la Figure 8.11. Nous pouvons noter une répartition bien plus équilibrée pour les scénarios considérant la séquence d'assemblage (i.e. scénario 2 et 3) plutôt que le scénario ne considérant que les intentions de conception (i.e. scénario 1). La manière dont sont distribuées les connaissances montre que le cadre DAMON apporte plus de

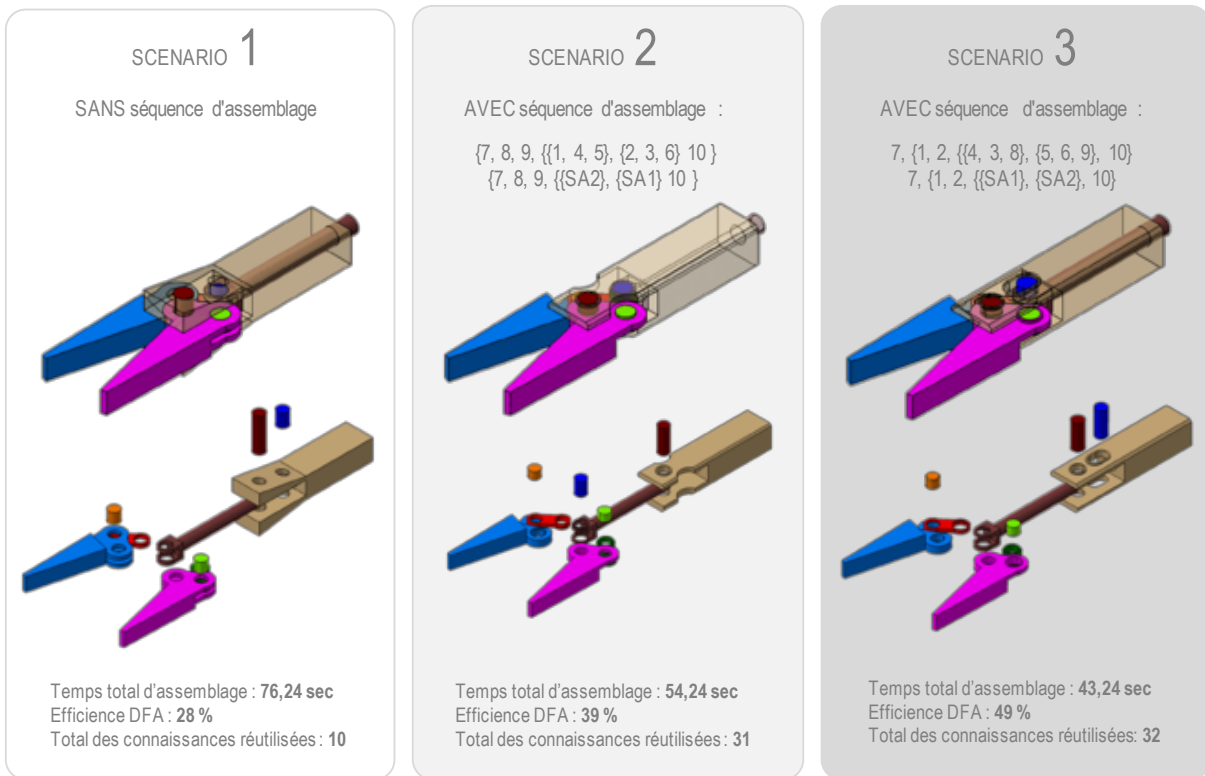


FIGURE 8.11 – Génération de trois solutions de conception en fonction de scénarios d’assemblage différents [Marconnet, 2017].

précision dans l’injection des connaissances et fournit un accompagnement tout au long de l’activité de modélisation géométrique en CAO. La structuration des entités géométriques sera abordée au sein du prochain chapitre.

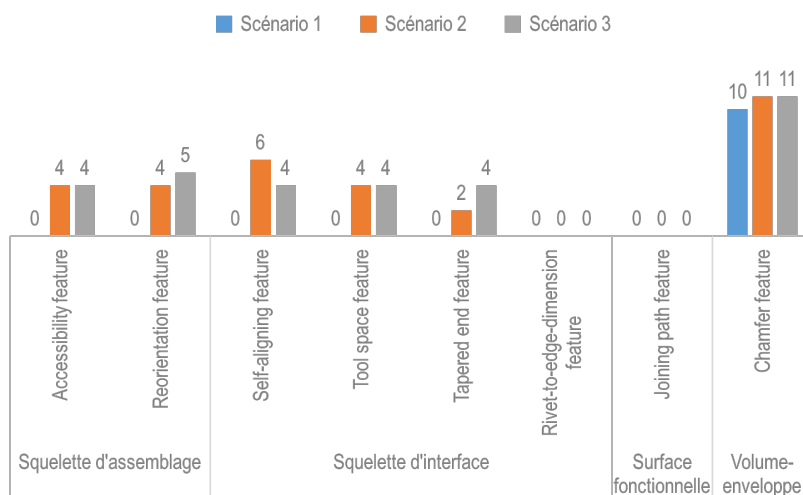


FIGURE 8.12 – Distribution des connaissances instanciées via les situations de conception [Marconnet, 2017].

8.4 Conception orientée fabrication additive d'assemblage

Brevetée initialement au début des années 80 en tant que procédé de prototypage [Hull, 1986], la fabrication additive (FA) s'est progressivement positionnée parmi les procédés de fabrication dédiés aux produits de série. Depuis lors, de nombreux procédés et techniques associées ont été développés, afin de mettre en forme un large spectre de matériaux (i.e. polymères, métaux, céramiques, biomatériaux, aliments) [Zhu *et al.*, 2016]. A ce jour, la fabrication additive, en tant que technologie de fabrication, est considérée et adoptée comme un facteur clé de la 4^{ème} révolution industrielle émergente également appelée « Industrie 4.0 » [Yao & Lin, 2016]. Ce changement de paradigme, situé au niveau de la fabrication des produits, nous amène à repenser la façon dont nous percevons et concevons les objets physiques. Alors que les procédés conventionnels (dits soustractifs) nécessitent des opérations séquentielles au niveau des pièces de forme simple puis assemblées, la fabrication couche par couche propre à la FA, quant à elle, permet de fabriquer en une seule étape des produits (à travers des pièces consolidées ou des mécanismes) aux formes et propriétés physiques complexes.

Cependant, pour que ce changement de paradigme soit complet, il convient d'entreprendre des efforts significatifs dès les premières étapes du processus de conception et de repenser les modèles, méthodes et outils actuels en conséquence. D'une manière similaire aux efforts de recherche qui ont été réalisés avec le métier de l'assemblage [Demoly *et al.*, 2011b; Marconnet, 2017], il s'agit ici d'aider les architectes produit et les concepteurs à fournir des solutions facilement fabricables et assemblables, exploitant pleinement les libertés fournies par la FA.

8.4.1 Opportunités générées par la FA

La fabrication additive nous amène à repousser les limites existantes au niveau des complexités sous-jacentes à l'ingénierie du produit (i.e. fonctionnel, structurel, géométrique, matériau, etc.) [Gibson *et al.*, 2009]. Des études et analyses doivent donc être menées au niveau de l'assemblage (point de vue fonctionnel/structurel) tandis que d'autres sont directement associées au niveau des composants (point de vue géométrique). Parmi les potentiels à exploiter, nous pouvons citer ceux pouvant réduire considérablement la complexité structurelle du produit, notamment :

- *Fabrication multi-matériau* – la capacité de fabriquer directement des composants constitués de différents matériaux, soit de manière discrète soit de manière continue, à travers un volume spatial. Nous pouvons évoquer, par exemple, les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelles (Functionally Graded Materials – FGM). Les procédés capables de réaliser ce type de distribution sont : Direct Metal Deposition (DMD) [Wilson & Shin, 2012], Laser Engineering Net Shaping (LENS) [Bandyopadhyay *et al.*, 2009] pour les métaux, et Fused Deposition Modeling (FDM) [Garland & Fadel, 2015] et PolyJet pour les polymères.
- *Liaisons cinématiques in situ* – la capacité d'imprimer des mécanismes (voir le Tableau 8.1) présentant des mouvements (de translation, rotation, etc.) au cours d'un processus d'impression (également appelé fabrication *in situ*) [Lipson *et al.*, 2004].
- *Assemblage en fabrication* – la capacité à une technique FA d'insérer/implanter un composant déjà fabriqué/assemblé (e.g. écrou, carte électronique, capteur, etc.) au sein d'un autre composant et plus particulièrement durant la fabrication de celui-ci [Kataria & Rosen, 2001].

Parmi les différentes liaisons cinématiques identifiées dans [Demoly *et al.*, 2011c], nous avons donc recensé celles pouvant faire l'objet d'une réalisation par ajout de matière et distingué les procédés et techniques associés [Sossou *et al.*, 2018]. De ce fait, le Tableau 8.1 présente les compatibilités actuelles entre les liaisons cinématiques et technologiques vis-à-vis des procédés/techniques de FA, tels que la stéréolithographie (SLA), le frittage sélectif par laser (Selective Laser Sintering – SLS), le dépôt de fil fondu FDM, la fusion sélective par laser (Selective Laser Melting – SLM) et le PolyJet. Cette classification est détaillée et justifiée par des références scientifiques dans [Sossou *et al.*, 2018].

Tableau 8.1 – Liaisons cinématiques et technologiques réalisées par FA.

Liaison	SLA	SLS	FDM	SLM	PolyJet
Pivot	●	●	●	●	●
Glissière	●	○	○	○	○
Pivot Glissant	○	○	○	●	○
Rotule	●	●	○	○	○
Engrenage	○	●	○	●	●
Cardan	●	●	○	●	●

8.4.2 Méthode PRIAM

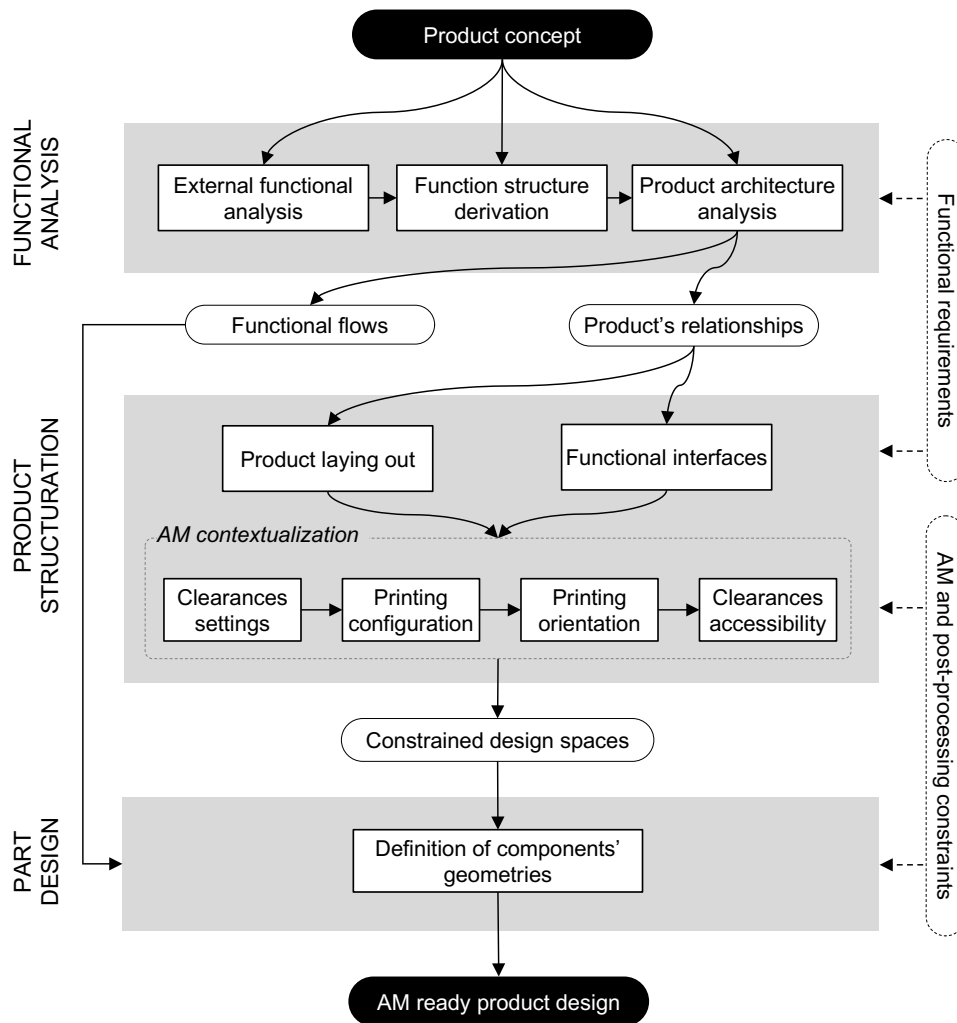
La méthode de conception proactive orientée FA – baptisée PRIAM (PRoactive design for Additive Manufacturing) – implique plusieurs parties prenantes qui travaillent généralement séparément, séquentiellement et même à distance. Leurs activités couvrent les phases de conception (i.e. conceptuelle, préliminaire, détaillée, optimisation, etc.), les opérations de pré-traitement (i.e. orientation des pièces, génération de structures de support, découpage, etc.) et les opérations de post-traitement (i.e. enlèvement de support, polissage de surface, parfois assemblage). En tant que procédé de fabrication, la question d'intégration de la fabrication additive en conception doit dépasser le traditionnel effet « over-the-wall » qui existe historiquement entre les phases de conception et de fabrication [Prasad, 1999; Boothroyd *et al.*, 2002]. Relevant du domaine du DFAM (*Design for Additive Manufacturing*), la problématique de conception pour la fabrication additive a déjà reçu beaucoup d'attention [Thompson *et al.*, 2016]. Parmi les efforts, nous pouvons distinguer :

- (i) les travaux sur les règles de conception permettant aux concepteurs de prendre en compte un ensemble de contraintes vis-à-vis d'une technique en particulier pour la phase de définition géométrique des pièces [Zimmer & Adam, 2011; Zimmer & Adam, 2014; Thomas, 2009; Kranz *et al.*, 2015; Becker *et al.*, 2005; Bin Maidin *et al.*, 2012] :
- (ii) les efforts portant sur les méthodologies de conception afin de guider les concepteurs dans des phases spécifiques [Ponche *et al.*, 2014; Kumke *et al.*, 2016], i.e. consolidation des composants [Yang *et al.*, 2015], optimisation topologique [Lin *et al.*, 2007], élaboration de structures en treillis [Gibson *et al.*, 2009], etc., généralement adressées dans le cadre de la reconception.

Afin de nous positionner d'une manière pertinente au sein de la communauté, la méthode PRIAM vise à (i) conduire la conception d'assemblage d'une manière descendante et à (ii) intégrer de manière proactive les contraintes et les connaissances associées aux procédés et techniques de la FA. La méthode accompagne donc les architectes produits et les concepteurs de la phase de conception préliminaire à la phase de conception détaillée, afin de délivrer des solutions appropriées au métier de la FA. Il convient donc au préalable de prendre en compte les opportunités offertes par la FA (voir section 8.4.1) ainsi que ses contraintes spécifiques. La nouveauté réside, entre autres, dans le fait qu'un plan de fabrication (qui peut inclure plus d'un procédé FA, et éventuellement des opérations d'assemblage) peut être défini très en amont durant la phase de conception préliminaire [Sossou *et al.*, 2018]. La raison de cette orientation étant que les contraintes de fabrication varient en fonction du procédé utilisé, en conséquence plus on dispose de connaissances sur la façon dont le produit sera fabriqué, meilleure est la conception du produit en termes de fabricabilité et de performance. En outre, la méthodologie proposée ne vise pas à concevoir un seul composant, mais des produits (i.e. assemblages de composants). La Figure 8.13 à la page suivante présente un logigramme de l'approche PRIAM et met l'accent sur les étapes structurant le produit avant que la géométrie de celui-ci ait été générée. Ces dernières sont présentées ci-après.

8.4.3 Dérivation de l'architecture produit initiale

La première étape consiste à définir une architecture produit issue d'une décomposition fonctionnelle, externe et interne. Ceci demande au préalable d'effectuer une analyse fonctionnelle externe afin de comprendre les interactions entre le système à concevoir et ses milieux extérieurs. Les fonctionnalités résul-

FIGURE 8.13 – Logigramme décrivant partiellement la méthode PRIAM [Sossou *et al.*, 2018].

tantes peuvent être ensuite décrites par des fonctions élémentaires sur lesquelles des flux (énergie, matériel, signal, etc.) sont routés [Hirtz *et al.*, 2002]. Sur cette base fonctionnelle, des fonctions élémentaires ou des groupes de fonctions peuvent être alloués à des composants élémentaires voire des sous-ensembles, faisant alors ressortir un concept. De ce fait, la définition de l'architecture initiale peut se compléter par l'apport d'informations techniques telles que les relations composant-à-composant (liaisons cinématiques), les flux fonctionnels ainsi que les relations de nature spatiale. Nous verrons, au sein du chapitre 10, que ces dernières pourront être définies par des primitives issues de la théorie de la méréotopologie [Demoly *et al.*, 2012b].

A cette étape de la conception préliminaire, nous devons exploiter l'opportunité de générer des informations dédiées à la fabrication additive. En cohérence avec le cadre méthodologique de conception proactive pour l'X, nous allons insérer une étape nous permettant de pouvoir générer une gamme de fabrication additive d'assemblage, associant opération de fabrication, assemblage pendant/après fabrication tout en identifiant les machines de FA à utiliser. Il s'agit donc ici de pouvoir apporter des informations complémentaires au niveau des composants candidats à la FA (i.e. autre que les composants à acheter, à sous-traiter voire à réaliser par des procédés de fabrication conventionnels), notamment des paramètres de qualité de surface, type de matériau, épaisseur de parois, densité, couleur, ainsi que les propriétés mécaniques, électriques et thermiques pour ne citer qu'elles. Ces exigences auront une influence non négligeable

sur les décisions pour la consolidation des pièces et donc sur la définition de la gamme.

8.4.4 Définition du contexte de FA

Nous avons démontré au cours du chapitre que la prise en compte de la gamme d'assemblage et de fabrication est un levier important pour sensibiliser les concepteurs aux contraintes métier et favoriser par conséquent la réutilisation des connaissances en conception. Il reste donc à définir ici une gamme de fabrication appelant des opérations d'assemblage annexes voire durant l'impression et également des machines capables de répondre aux exigences. Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées pour la sélection des procédés de FA de pièces [Ghazy, 2012; Wang *et al.*, 2017]. La technique de sélection préliminaire employée peut être construite via deux étapes :

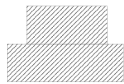

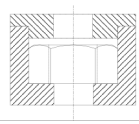
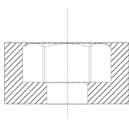


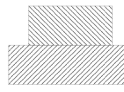
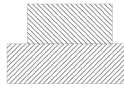
1. Sélectionner les matériaux et les techniques FA pour chaque pièce individuellement sur la base des exigences fixées précédemment.
2. Sélectionner les techniques FA au niveau de l'assemblage global. Chaque pièce, sujette à être fabriquée par ajout de matière, est susceptible d'être réalisée par plus d'une association matériau-technique FA. Ce raisonnement est nécessaire pour déterminer les combinaisons qui conviennent à la majorité des pièces, afin de rationaliser la fabrication de l'assemblage.

Les procédures algorithmiques sous-jacentes à ces deux étapes génératives sont présentées de manière détaillée dans le cadre des travaux de thèse de Germain Sossou [Sossou *et al.*, 2018].

8.4.5 Minimisation de l'architecture produit

A partir du moment où la sélection préliminaire des procédés et des machines a été effectuée pour construire la gamme, nous allons donc pouvoir agir dès la phase de conception préliminaire. Ici l'objectif est de simplifier la structure du produit en considérant de manière conjointe les contraintes issues du métier de l'assemblage et des opportunités offertes par le métier de la FA. Dès lors que l'architecte produit a généré une première nomenclature études, il devient judicieux de vérifier sa complexité afin de savoir si celle-ci est minimale.

Tableau 8.2 – Minimisation de l'architecture via les niveaux de consolidation de composants

Niveau consolidation	Type relation	Compatibilité matériaux	Compatibilité Technique FA	Etat initial	Etat final
Assemblage consolidé	Statique	Identiques/ Différents	Identiques		
Assemblage durant fabrication	Statique	Différents	Différentes		
Assemblage <i>In situ</i>	Dynamique	Identiques	Identiques		
Assemblage classique	Statique/ Dynamique	Identiques/ différents	Procédés différents		

Pour ce faire, le Tableau 8.2 expose les quatre niveaux de consolidation possibles pour des composants en contact physique, à savoir l'assemblage consolidé (pièces fusionnées), l'assemblage durant la fabrication

d'une pièce, l'assemblage *in situ* et l'assemblage classique. Nous proposons donc d'étudier les différentes relations de contact physique entre les composants. Cette analyse va permettre d'identifier les relations à fabriquer directement, celle à réaliser après fabrication et les relations à consolider. Ainsi, nous pouvons considérer les cas de minimisation pour les relations cinématiques de type « encastrement » ci-après, où un processus de consolidation est présenté à la Figure 8.14 :

- Cas 1** – Si les composants sont du même matériau et sont fabriqués par le même procédé AM, alors ils sont simplement fusionnés en un seul composant et leurs flux fonctionnels respectifs sont combinés.
- Cas 2** – Si les composants sont de matériaux différents mais traités par le même procédé, alors ils sont également fusionnés et les flux fonctionnels sont combinés.
- Cas 3** – Si les composants sont de matériaux différents et traités par procédés différents, alors les relations spatiales entre les composants ainsi que les capacités des deux procédés pour intégrer une pièce fabriquée pendant l'impression sont utilisés pour prendre une décision. Si les pièces présentent une tangence au niveau de leur régions spatiales, alors elles sont simplement fabriquées séparément et ensuite assemblées (nécessitant donc des caractéristiques d'assemblage pour une liaison encastree). Si par contre une des régions est partie intégrante (primitive méréotopologique *Integral Part*, $xIPy$) de l'autre, alors nous pourrions conclure à un assemblage durant fabrication en considérant cette capabilité par le procédé FA sélectionné.
- Cas 4** – Si l'un des composants est acheté/sous-traité ou tout simplement non réalisable par FA et que la région spatiale de celui-ci est partie intégrante de l'autre composant à réaliser par FA, alors nous serons dans le cas 3, sinon les composants feront l'objet d'une opération d'assemblage ultérieure.

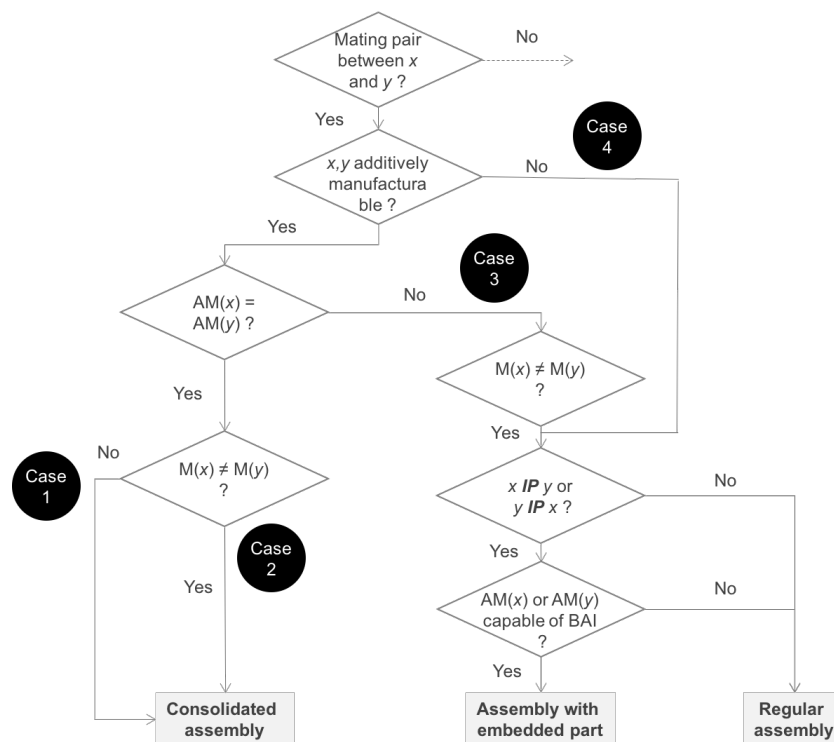


FIGURE 8.14 – Processus de consolidation des composants encastrés [Sossou *et al.*, 2018].

Pour ce qui concerne les liaisons cinématiques présentant un mouvement, il convient donc d'exploiter les opportunités offertes la FA. La consolidation d'un mécanisme demandera par conséquent une attention particulière au niveau de l'orientation d'impression. Il s'agit ici de vérifier chaque relation physique avec mouvement. Notons L_{A-B} , la liaison cinématique entre les composants A et B, l'unique situation où A et

B seront consolidés au niveau « assembly *in situ* » se présentera lorsque A, B et L_{A-B} seront réalisables un même procédé FA. Pour les autres situations, nous nous orienterons vers un assemblage classique (voir Tableau 8.2).

8.4.6 Emergence de la géométrie des composants

Une fois que le contexte de conception a pris les colorations fonctionnelles et métier via la FA, il est important de définir une stratégie pour faire émerger la géométrie des composants. Dans ce cadre, la Figure 8.15 introduit cinq étapes – se basant sur une ossature géométrique établie de manière descendante (voir Chapitre 9) – visant à contraindre les espaces de conception des composants de manière minimaliste. Il convient dans un premier temps de définir la formes des surfaces fonctionnelle (i.e. surfaces associées aux contacts internes et externe du produit), puis les épaissir afin de créer des volumes fonctionnels (FV), qui permettent la réalisation physique des surface fonctionnelles (FI). Ces épaisseurs peuvent être régies à la fois par la résolution du procédé FA considéré et par les tolérances appliquées à la FI étudiée. L'étape suivante consiste à lier les FVs afin de structurer les composants et/ou pour satisfaire un flux spécifique (voire une combinaison de flux). Ces différentes connexions entre FVs sont définies au niveau de leurs sections (forme, structure en treillis, section pleine ou creuse, etc.). Enfin, pour éviter les arêtes vives (et de manière équivalente, la concentration des contraintes), les angles sont lissés. Il est à noter que chacune de ces étapes conduit à la mise en place de paramètres géométriques, qui peuvent ensuite faire l'objet d'une optimisation, afin de générer un composant qui se comporte et achemine les flux de manière appropriée.

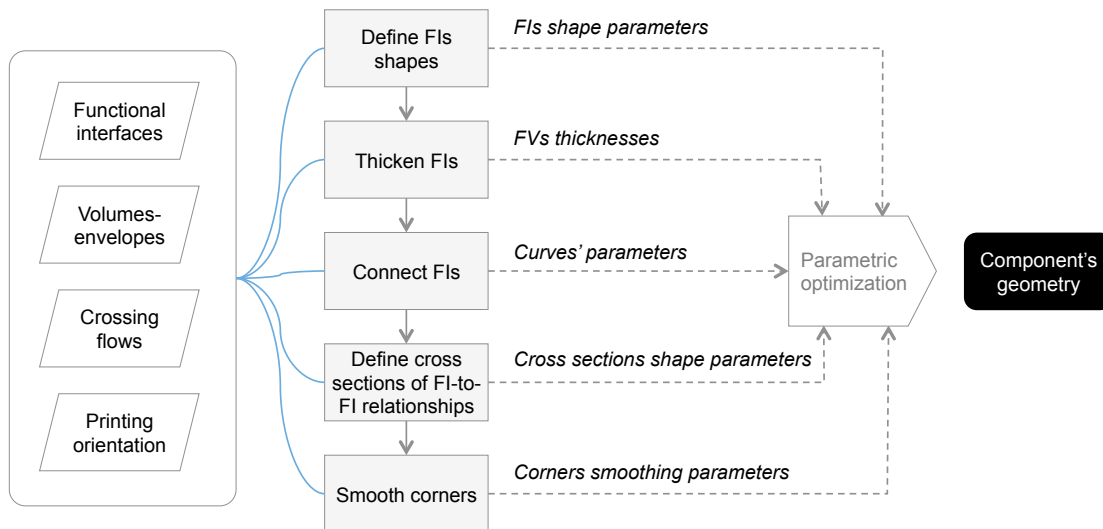


FIGURE 8.15 – Etapes permettant l'émergence de la géométrie [Sossou *et al.*, 2018].

8.4.7 Implémentation et cas d'études

Les efforts réalisés pour proposer une approche de conception proactive pour la fabrication additive nous ont conduit au développement d'applications d'aide à la conception ainsi que de modélisation géométrique générative. Pour ce faire, nous avons décidé de les développer au sein des environnements Pegasus et Grasshopper (plugin de Rhinoceros 3D). Différents cas d'études (pince de désincarcération, étai, serrement, etc.) ont été traités, afin de mettre en exergue l'impact de PRIAM au niveau de la conception d'assemblages mécaniques par FA et la squelettisation géométrique des pièces.

Lors des sections précédentes, nous avons montré que les relations composant-à-composant ont également un rôle important dans la cadre de la conception pour la fabrication additive, surtout si l'on

considère le problème selon le point de vue métier « assemblage ». Etant donné que PRIAM intervient dès l'étape de définition des relations composant-à-composant, nous avons décidé dans un premier temps d'effectuer des développements additionnels sur l'outil Pegasus. Les Figures 8.16 et 8.17 présentent les informations relationnelles d'un étai sur lesquelles des entités géométriques sont associées progressivement. Une description détaillée de cette étape est présentée au chapitre suivant. Ainsi l'outil Pegasus accompagne l'architecte produit et le concepteur lors de la définition de l'architecture minimale conduisant à des espaces de conception propices à la génération de la géométrie. A cet effet, la Figure 8.18 illustre les différentes étapes contraignant les espaces de conception d'une manière descendante, partant de la définition des surfaces fonctionnelles jusqu'à leur connexions organiques. Le jeu de paramètres géométriques se définit alors via une optimisation paramétrique afin de trouver une solution satisfaisante.

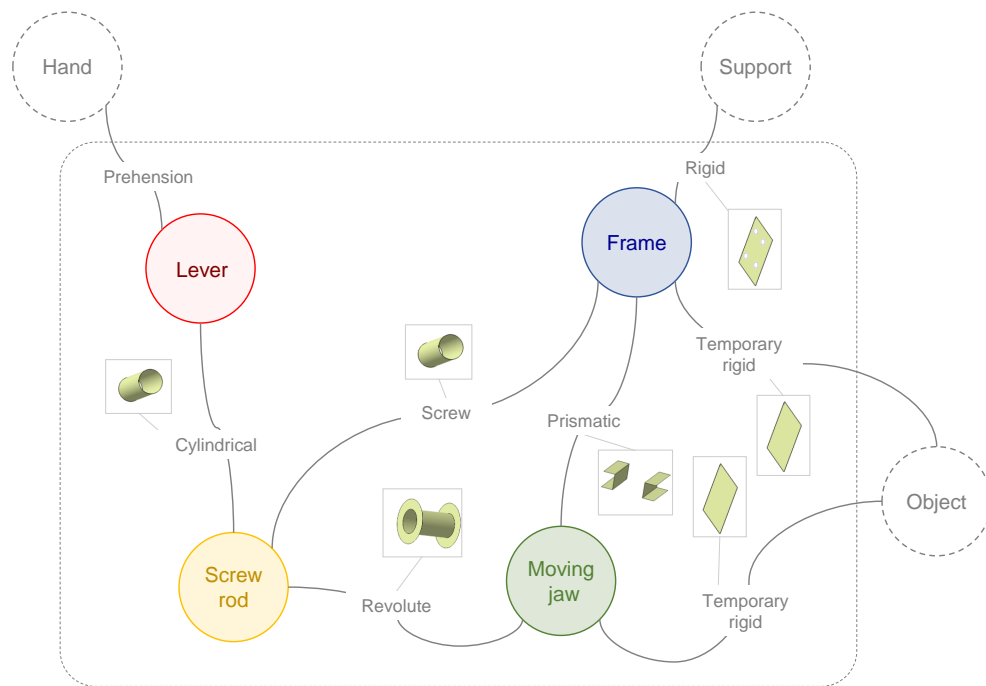


FIGURE 8.16 – Relations composant-à-composant avec leur surfaces fonctionnelles correspondantes.

Cette manière de contrôler l'émergence de la géométrie nous a également conduit à investiguer une voie plus appropriée, la modélisation paramétrique basée sur des algorithmes génératifs. C'est dans ce contexte que nous avons choisi d'utiliser l'environnement Grasshopper couplé à Rhinoceros 3D. Grasshopper est un outil de programmation visuelle intégrant des éléments encapsulant du code (fonctions ou sous-programmes) à assembler. Ces éléments fonctionnent comme des « boîtes noires » et effectuent des traitements à partir de données demandées en entrée et en produisent d'autres en sortie. On obtient alors un flux de conception dont les nœuds expriment les traitements à effectuer par le programme et les arcs (ou liens) les flux des données.

En ce sens, Grasshopper est un outil de conception générative de modèles hautement paramétriques, et donc propice à la génération de structures cellulaires ou organiques (étape de squelettisation des pièces). Un exemple de conception générative sous Grasshopper est fourni à la Figure 8.19 pour le cas d'un serre-joint. La figure se focalise uniquement sur l'émergence du modèle géométrique de la poignée du système. Nous avons donc extrait les surfaces fonctionnelles pour ensuite construire l'espace de conception. Pour intégrer des structures en treillis, nous avons exploité un add-on de Grasshopper, Intralattice⁷⁸. Cette extension permet de générer différents types de structures cellulaires solides dans un espace de conception donné. Adossé à un projet de recherche au sein du laboratoire à Université de McGill's Additive Design &

78. <http://intralattice.com/overview/>

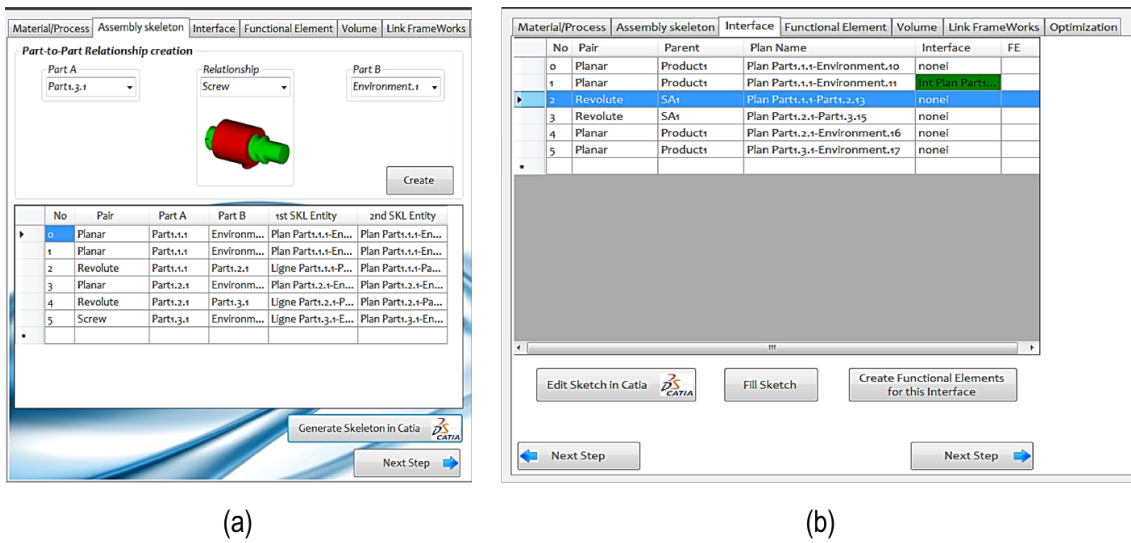


FIGURE 8.17 – Interfaces de Pegasus pour la définition (a) des relations cinématiques ainsi que (b) des surfaces fonctionnelles.

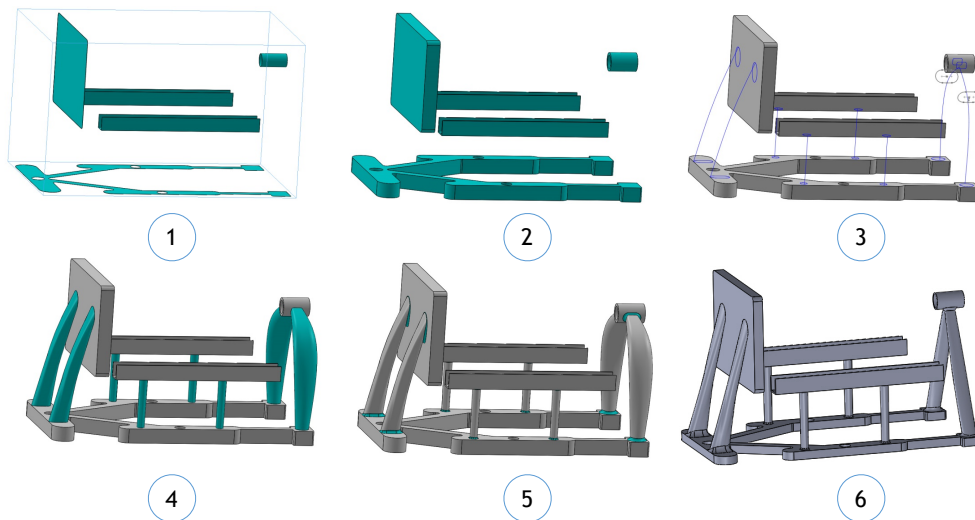


FIGURE 8.18 – Etapes permettant l'émergence de la géométrie en environnement CAO.

Manufacturing Laboratory (ADML), Intralattice offre la possibilité d'étudier les structures sous différentes échelles tout en les couplant aux techniques de FA. Un motif de structure en treillis de type « Diamond » a été spécifiquement conçu pour satisfaire aux sollicitations en flexion ainsi que pour garantir un angle inférieur à 45° facilitant la réalisation par technique FDM sans le besoin de support [Xu *et al.*, 2016]. La résolution des treillis a également été définie en fonction des capacités de la machine FDM Aneth 8 (telle que présentée à la Figure 8.20). Une fois les structures internes générées sous Grasshopper, les modèles géométriques sont alors exportés vers une application de pré-traitement (orientation, tranchage, densité de remplissage, vitesse, etc.) telle que Cura⁷⁹ ou Repetier-Host⁸⁰, afin de piloter les machines

79. <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>

80. <https://www.repetier.com>

d'impression 3D. La Figure 8.20 (a) présente l'implémentation de la poignée à imprimer sous Repetier ainsi qu'une vision en cours de fabrication (b).

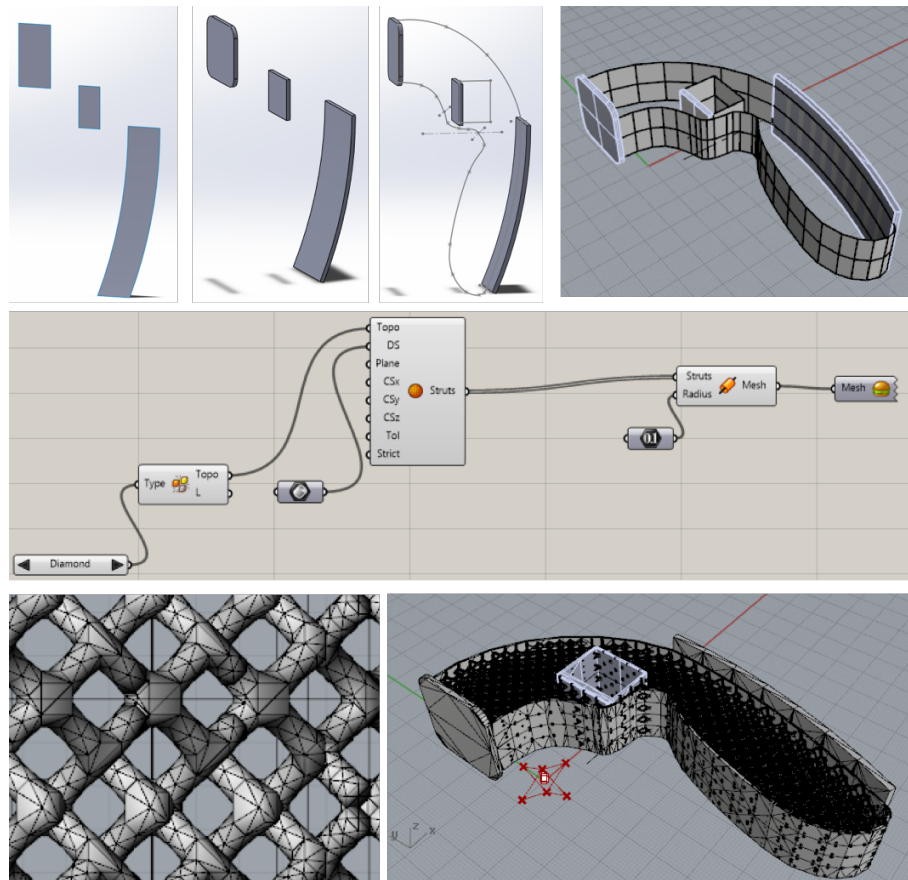


FIGURE 8.19 – Conception générative à base de structures en treillis d'une poignée appartenant à un serre-joint.

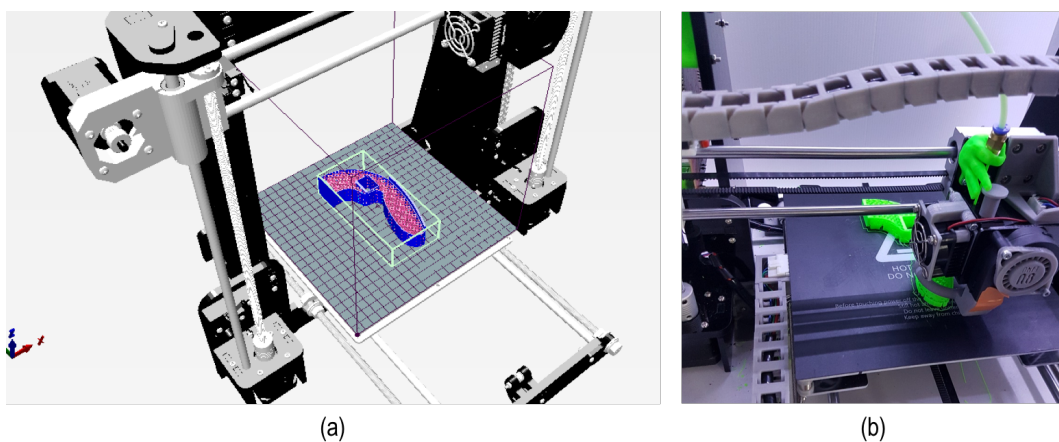


FIGURE 8.20 – (a) Pré-traitement sous Cura et (b) impression en FDM sur imprimante Anet 8.

8.5 Conception proactive pour l'impression 4D

De part les efforts réalisés pour intégrer les métiers de l'assemblage et de la fabrication additive dès les étapes amont du processus de conception (i.e. en conception préliminaire), nous nous sommes progressivement orientés vers la prise en compte de la dimension temporelle au niveau des produits telle que mise en exergue par l'association du métier de la fabrication additive avec les matériaux intelligents (une vision complémentaire et théorique est également apportée au Chapitre 10). De manière générale, la dynamique induite au niveau des produits se définit par les liaisons cinématiques existantes entre les composants, combinant des mouvements à base de rotation et de translation, et l'agrégation d'objets spatiaux au cours du temps dans le cas de l'assemblage [Gruhier, 2015]. Pour ce qui concerne les transformations au niveau de la matière, il sera nécessaire d'approfondir la description des phénomènes spatio-temporels par des primitives de changement. Ainsi, le couplage fabrication additive et matériaux intelligents – plus communément appelé impression 4D –, implique donc une quatrième dimension (la dimension temporelle) faisant référence à la capacité donnée aux objets physiques à changer leurs propriétés (i.e. forme, propriétés physique, etc.) et potentiellement leur fonctionnalité une fois fabriqués.

8.5.1 Vers des produits transformables et adaptés à leur environnement

L'origine de cette thématique émergente est double. D'une part la nécessité de réaliser des produits/objets capables de s'adapter à leur environnement, en s'inspirant des phénomènes identifiés dans la nature (nous parlerons de produits bio-inspirés). On peut naturellement constater que les précurseurs dans ce domaine ont été les chercheurs en médecine avec les techniques de « bioprinting » [Jung *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2016] mais également pour développer des solutions évolutives dans le cadre de la chirurgie mini-invasive [O'Brien *et al.*, 2017], puis vinrent les travaux dans les domaines du génie civil et du design industriel [Tibbits, 2014], voire même les ontologistes et les épistémologues en raison de la nature évolutive des objets physiques [André, 2017] (nous reviendrons sur ces derniers au Chapitre 10). Et d'autre part, il s'agit de donner la capacité aux produits d'étendre leur durée de vie en embrassant plusieurs fonctionnalités dédiées à différentes situations d'usage voire différentes situations de vie (pour le cas de systèmes déployables notamment).

Ces produits dits « intelligents » doivent de telles capacités aux matériaux doués de sensibilités aux stimuli issus de leur environnement d'usage. Dès lors, les propriétés du matériau peuvent changer lors de l'exposition à un stimulus spécifique ou à une configuration de stimuli (pouvant intervenir de manière combinée ou séquentiellement, et de façon homogène ou hétérogène dans l'espace). L'ingéniosité des objets et produits imprimés avec cette technique émergente repose sur des interactions/distributions entre la structure/géométrie du produit, les matériaux (conventionnels et intelligents) et les flux d'énergie (flux passif comme la chaleur ou l'humidité voire actif comme le courant électrique). L'une des propriétés mécaniques les plus intéressantes rencontrées dans le domaine des matériaux intelligents est la capacité de changement de forme en réponse à un stimulus spécifique (chaleur, lumière, humidité, etc.). Par exemple, les polymères à mémoire de forme (PMFs) ou les alliages métalliques à mémoire de forme (AMFs) peuvent être programmés thermo-mécaniquement pour prendre une forme temporaire et revenir à une forme permanente une fois soumis à la chaleur (la Figure 8.21 montre un exemple de séquence d'éducation). Cette capacité de changement de forme avec les PMFs est largement considérée comme la plus aboutie parmi les preuves de concept (également appelées Proof-of-Concept – POC) dans le domaine de l'impression 4D [Ge *et al.*, 2013; Ge *et al.*, 2014; Khoo *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2015; Zarek *et al.*, 2016].

Traditionnellement, les produits sont conçus pour avoir des fonctions stabilisées, bien que leur environnement d'usage soit en perpétuel évolution (e.g. conditions de l'environnement, exigences, besoins de l'utilisateur, régulation, etc.). Il est donc opportun de pouvoir exploiter ces changements afin de développer de nouveaux produits en interaction avec leur environnement, repoussant par conséquent leur obsolescence (fait que l'on retrouve de manière omniprésente au sein des produits destinés à un usage quotidien). Dans ce contexte, un produit possédant des capacités changeantes peut alors être développé pour les trois raisons suivantes :

- (i) **Adaptation** : le produit conserve sa fonctionnalité mais fait varier ses performances afin de s'adapter aux exigences fluctuantes ;

- (ii) **Multi-fonctionnalité** : le produit change son état structurel ou sa configuration afin de satisfaire différentes fonctionnalités voire différents scénarios d'usage (liés à des environnements d'usage différents par exemple) ;
- (iii) **Déploiement** : le produit change de configuration passant d'un état inerte à un état d'utilisation.

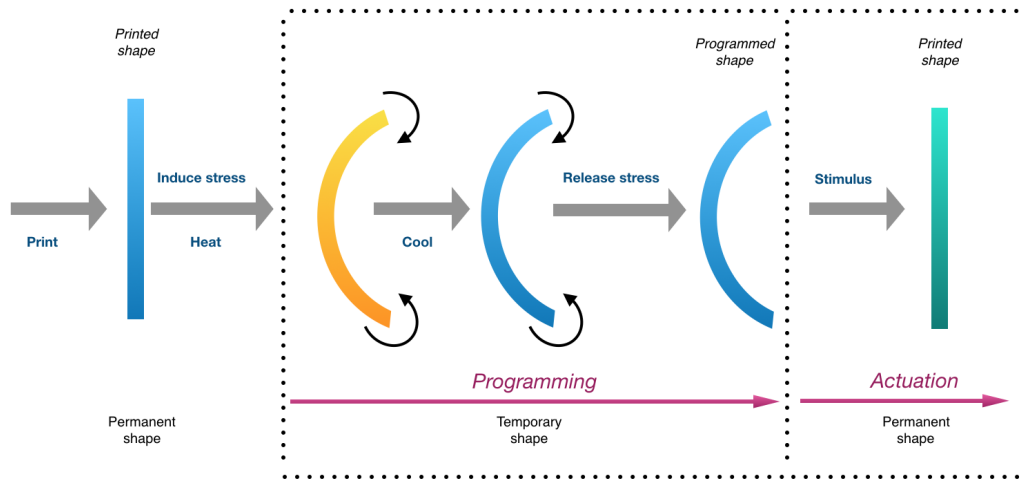


FIGURE 8.21 – Séquence de programmation thermo-mécanique de PMFs [Jian *et al.*, 2018].

8.5.2 Matériaux fonctionnels/intelligents

L'emploi des matériaux intelligents dans ce contexte doit pouvoir être réfléchi dès les phases préliminaires de conception, à partir du moment où la structure fonctionnelle du produit est établie. En conséquence, il devient essentiel de pouvoir identifier les différentes primitives de comportement ou de changement associées aux stimuli mis en jeu pour l'activation de chaque matériau intelligent. La notion de primitive de comportement ou de changement est ici importante pour décrire un problème de conception en phase préliminaire [Burman *et al.*, 2000 ; Singh *et al.*, 2009]. Parmi les rôles identifiés comme étant des fonctions liées aux matériaux intelligents issus de la littérature [Esther *et al.*, 2014], nous pouvons citer les :

- *Changeurs de forme* : leur réponse aux stimuli est généralement un changement de dimensions ou de forme. Tandis que certains d'entre eux présentent simplement une variation de taille (e.g. hydrogel, matériau piézo-électrique, etc.), d'autres, tels que les matériaux à mémoire de forme, réagissent en changeant de forme ;
- *Capteurs optiques* : leur réponse est optiquement perceptible ; ceci inclut par exemple les matériaux thermochromiques, les matériaux triboluminescents voire les matériaux électrochromiques ;
- *Convertisseurs/capteurs* : leur réponse est généralement un signal qui peut être utilisé comme stimulus pour un autre matériau intelligent ou pour fournir des informations sur l'état d'un support. Des exemples de tels matériaux comprennent les matériaux piézo-électriques, thermo-électriques ou photovoltaïques ;
- *Changeurs d'état* : les matériaux intelligents ont généralement une seule condition ; les changeurs d'état sont ceux dont les conditions changent en réponse au stimulus approprié. Les fluides électro-/magnéto-rhéologiques ou rhéo-épaississants en sont des exemples.

La Figure 8.22 illustre les différentes classes de matériaux intelligents regroupés par fonction. Nos efforts actuels se sont limités aux changeurs de formes (Shape changers) offrant les primitives de comportement – de type expansion/dilatation, contraction, flexion/pliage et effet à mémoire de forme (shape memory effect – SME) – une fois soumis aux stimuli tels que l'eau, la contrainte mécanique, le courant

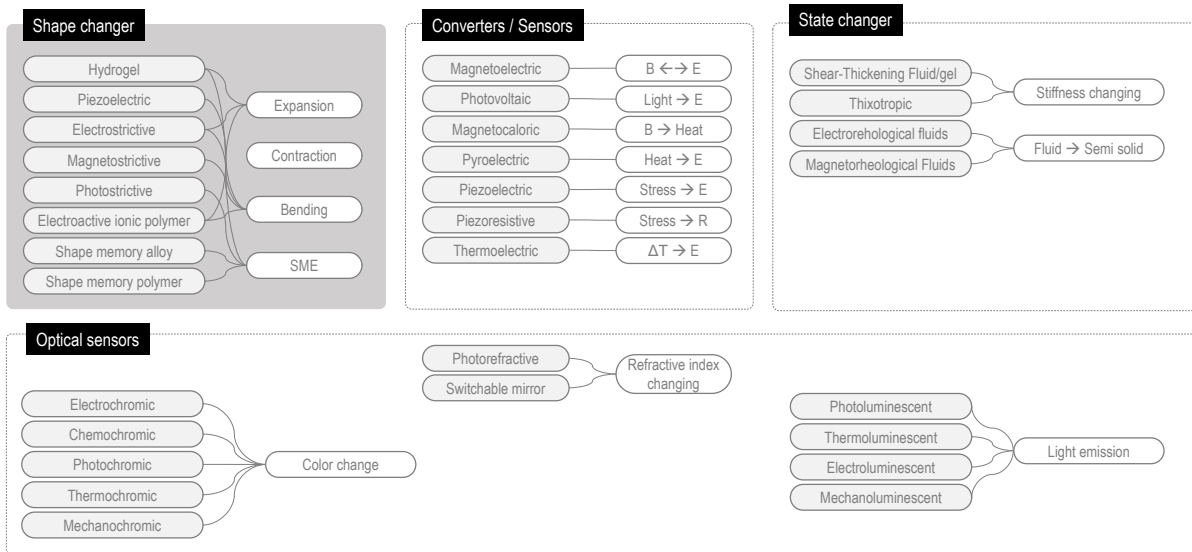


FIGURE 8.22 – Classification des matériaux intelligents [Sossou, 2019].

électrique, le champ magnétique, la lumière et la température pour ne citer qu'eux. Ainsi, ces matériaux doivent leur intelligence à la fois à leur sensibilité vis-à-vis du stimulus et à la façon dont ils répondent à celui-ci. Le degré d'intelligence est également relatif à la réversibilité (*two-way*) ou non (*one-way*) de leur comportement [Behl *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2017], aspect important dans le cadre de la conception de systèmes transformables. Notre intention première est de pouvoir mettre en forme ces matériaux par ajout de matière, et donc de pouvoir les associer en fonction de leurs états disponibles (i.e. poudres, filaments, résines/encre) aux techniques d'impression 3D. Dans ce contexte, la littérature met en évidence des techniques permettant d'imprimer des matériaux intelligents seuls – AMFs par SLM [Clare *et al.*, 2008], PMFs par SLA [Choong *et al.*, 2017] ou DiW [Wei *et al.*, 2017] –, et également des techniques d'impression multi-matériaux – dont Polyjet [Ge *et al.*, 2014] et FDM [Espalin *et al.*, 2014] – voire des techniques combinées ad-hoc [Wu *et al.*, 2018]. Cette opportunité permet donc d'aller au delà de la liberté de forme permise par la fabrication additive, elle apporte alors la liberté de composition aux concepteurs.

Le fait d'intégrer/programmer un comportement intelligent dans les structures et la matière revient à utiliser le matériau en tant que mécanisme exploitant une source d'énergie passive disponible dans son environnement d'usage ou fournie en interne. Par ailleurs, le souhait de le réaliser par impression multi-matériaux demande impérativement de pouvoir allouer spatialement, au sein du modèle géométrique, les différents matériaux à imprimer. Nous parlerons alors de matériaux numériques [Popescu *et al.*, 2006; Hiller & Lipson, 2009], afin de couvrir les problématiques de discretisation de modèles géométriques pour l'allocation et la composition des matériaux. Cette dimension est de plus en plus prise en compte au sein des solutions d'impression multi-matériaux demandant des investissements importants (e.g. Stratasys Polyjet, 3D Systems, HP, etc.). Celles-ci permettent en effet de pouvoir jouer sur différents paramètres à la fois (i.e. couleur, transparence, rigidité, flexibilité, densité, etc.) lors d'une même impression pour un ou plusieurs matériaux.

8.5.3 Modélisation multi-matériaux à base de voxels

Le fait d'intégrer des matériaux intelligents au sein des produits nous amène à augmenter les capacités de fabrication par ajout de matière, et donc la manière dont nous allons les décrire et les représenter. A cet effet, les travaux de Westbrook & Qi (2008) ont démontré que la distribution spatiale des matériaux intelligents au sein des structures joue un rôle prépondérant, afin d'assurer le comportement attendu

des actionneurs une fois soumis aux stimuli. Bien que le comportement d'un matériau intelligent, pris de manière isolé, peut sembler intuitif au premier abord, celui-ci devient beaucoup plus complexe lorsqu'il est associé à des matériaux inertes et/ou d'autres matériaux intelligents. Il est donc opportun d'adapter nos modèles de représentation actuels à un niveau de granularité nous permettant d'entrelacer, de manière à faciliter un raisonnement spatial, les matériaux actifs et inertes au sein d'un espace de conception.

Dès lors, notre stratégie scientifique s'est naturellement orientée vers la modélisation à base de voxels, en tant que pixels tridimensionnels occupant des régions spatiales [Kaufman *et al.*, 1993]. A ce jour, la modélisation à base de voxels – reconnue comme stable et prometteuse [Dobrovski *et al.*, 2015] – est devenue de plus en plus incontournable pour imprimer des voxels physiques [Hiller & Lipson, 2010; Huang *et al.*, 2015], et donc pour répondre aux enjeux scientifiques situés dans les domaines de la fabrication additive et des matériaux intelligents [Lipson & Kurman, 2013] notamment. A ceci s'ajoute notre constat, basé sur l'étude de la littérature, qu'une distribution de matériau intelligent était généralement attachée à un concept. En d'autres termes, la distribution des matériaux intelligents doit pouvoir être déterminée – au moins de manière qualitative – en phase de conception préliminaire. Il y a donc ici l'opportunité d'adresser cet enjeu d'efficacité en conception. De cette manière, en se positionnant à un certain niveau d'abstraction, il convient de pouvoir (i) donner une réponse qualitative sur une distribution choisie (en termes de primitives de comportement) et également (ii) d'être fidèle à la réalité physique.

L'approche proposée se base sur l'hypothèse première que les propriétés des matériaux au sein d'un voxel sont homogènes, c'est-à-dire qu'un voxel ne peut accueillir qu'un seul et unique matériau linéaire isotrope. D'autre part, deux aspects importants ont été considérés de manière conjointe. Le premier concerne l'utilisation d'un treillis, pour permettre de simuler rapidement et d'obtenir une réponse qualitative pertinente du comportement associé à une distribution sous un stimulus spécifique; le second intègre deux techniques bien établies dans le domaine de l'infographie 3D : *skinning* (maillage) et *rigging* (squelettage), dédiées à l'animation de personnages virtuels. Ce dernier permet de contrôler les déformations d'un objet en utilisant un ensemble de primitive de déformations liées au mouvement du squelette (qui est constitué d'os et d'articulations) [Jacobson *et al.*, 2014]. Pour remplacer les ressorts entre les voxels adjacents, des éléments de type « poutre » ont été utilisés, tels qu'illustrés Figure 8.23. Ces poutres résistent notamment à la traction, à la flexion bi-axiale et à la torsion. Elles sont régies par la théorie d'Euler-Bernoulli, négligeant l'influence du cisaillement. Les voxels –situés aux deux extrémités d'une poutre – peuvent alors se déplacer dans l'espace. On peut également préciser que chaque extrémité d'une poutre possède 6 degrés de liberté; les poutres s'étendent entre les centres des voxels adjacents, la moitié de leur longueur étant à l'intérieur de l'un ou l'autre des voxels, et dépendra donc des propriétés des matériaux affectés.

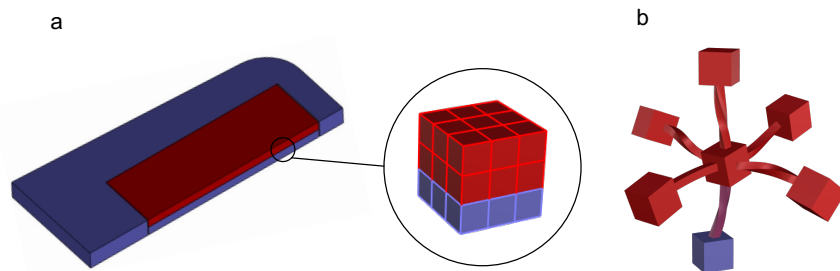


FIGURE 8.23 – (a) Modèle voxélisé et (b) vue explosée d'un voxel avec ses voxels adjacents [Sossou *et al.*, 2018].

Nous avons volontairement construit cette configuration, afin de pouvoir explorer rapidement les distributions possibles en phase préliminaire, et également être capables d'exposer de larges déformations (e.g. les hydrogels peuvent se contracter jusqu'à 400% et les PMFs ont une capacité de déformation élastique dépassant les 200% dans la plupart des cas). En effet, les simulations numériques utilisant la méthode de éléments finis demandent, en règle générale, un temps important et de la mémoire pour apporter des réponses qui sont d'un ordre différent de celles attendues dans notre cas (réponses d'ordre qualitatives avant la phase de conception détaillée).

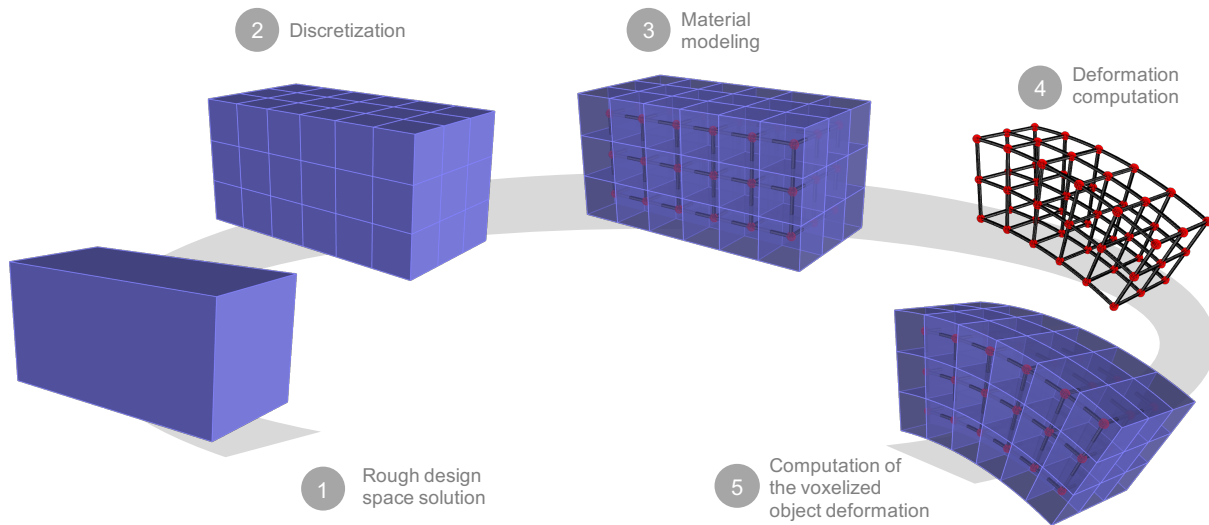


FIGURE 8.24 – Principes de la modélisation à base de voxels [Sossou *et al.*, 2019b].

Pour l'ensemble de ces raisons, la Figure 8.24 présente l'approche de modélisation à base de voxels via cinq étapes [Sossou, 2019; Sossou *et al.*, 2019b], telles que décrites ci-dessous :

- ① **Définition d'un espace (volume-enveloppe) de conception** – Cette étape consiste à modéliser en solide l'enveloppe préliminaire dans laquelle la distribution des matériaux doit être effectuée.
- ② **Discretisation** – Cette étape vise à découper le volume-enveloppe défini préalablement en cubes de taille égale (voxels), afin de pouvoir contrôler la granularité/précision de la distribution des matériaux. Comme expliqué ci-dessus, les voxels ici sont connectés en leur centre par des poutres tridimensionnelles. Ces poutres forment alors une structure 3D en treillis, agissant comme une structure de contrôle de la déformation de la géométrie.
- ③ **Modélisation du matériau** – Assumant que chaque voxel est homogène et constitué d'un seul et unique matériau linéaire isotrope, cette étape concerne l'introduction de propriétés telles que le module d'Young (E) et le module de rigidité (G) dans un premier temps, d'autres propriétés viendront s'adjoindre en fonction du comportement sensible au stimulus du matériau sélectionné. Une fois que les voxels ont reçu un matériau, leurs propriétés sont directement liées avec les propriétés au niveau des poutres. Cet héritage est utile pour le calcul de valeurs composées issues de la connexions de voxels portant des matériaux différents. Il est important de précision que les matériaux intelligents concernés sont ceux dont la réponse à un stimulus est soit une elongation, soit une contraction. Les matériaux programmables (typiquement ceux à mémoire de forme) ne sont pas pris en compte.
- ④ **Calcul de la déformation de la structure** – Cette étape est nécessaire pour calculer la déformation de la structure en treillis. Dans un premier temps, un calcul sera réalisé pour connaître les degrés de liberté de la structure et ensuite sa déformée en utilisant la méthode directe de rigidité (*Direct stiffness method*) [Okereke & Keates, 2018].
- ⑤ **Calcul de la déformation de l'objet voxelisé** – Une fois que la déformée de la structure de poutres ait été calculée, les voxels seront donc contrôlés en exploitant la technique *skinning* afin que la forme puisse suivre la structure, la déformée de la structure, quant à elle, suit les lois de la physique.

De cette manière, cette approche innovante, bien que composée de briques déjà admises par les mécaniciens/numériciens, offre l'avantage de relier plusieurs communautés scientifiques appartenant aux domaines de la mécanique numérique, de la fabrication et de l'infographie 3D.

8.5.4 Sélection et distribution des matériaux intelligents

Sur la base de notre approche de modélisation des matériaux, il devient tout aussi important de pouvoir explorer des distributions de matériaux pertinentes. La littérature nous apprend, à cet effet, que les distributions de matériaux intelligents dans les structures sont généralement ad hoc, excepté les travaux tout à fait originaux de [Maute *et al.*, 2015] portant sur une approche d'optimisation topologique – adossé à une extension de la méthode des éléments finis – pour prédire le comportement et arranger spatialement les PMFs au sein d'un matériau passif (inerte). Afin de réaliser un changement de forme souhaitée (i.e. d'une forme initiale vers une forme finale), disposant de quelques matériaux et d'un stimulus, il convient de pouvoir déterminer une répartition spatiale de matériaux permettant le changement souhaité. Pour ce faire, une méthodologie en trois étapes est proposée :

- ① **Voxélisation de la forme initiale** – Cette étape permet de voxéliser une forme correspondant à un état initial, c'est-à-dire un état résultant d'une impression. Cette étape inclut également la génération d'une structure de contrôle faites de points et de plans. Les points correspondant aux centres des voxels, et les plans à un plan médian des voxels. Ces éléments servent à capturer les degrés de liberté nécessaires à la déformation souhaitée : les points pour les déplacements et les plans pour les rotations. Cette structure enrichie va nous permettre de transformer manuellement la forme initiale en forme désirée⁸¹.
- ② **Comparaison** – Cette étape consiste alors à comparer les deux modèles voxélisés, afin d'obtenir les degrés de liberté associés aux noeuds de la structure de contrôle.
- ③ **Calcul de la distribution du matériaux** – La distribution ici résulte d'un problème inverse. Partant d'un vecteur de déformation désirée et d'un stimulus donné, cette étape va déterminer le matériau de chaque voxel, à la manière d'un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers qui plus est NP-difficile. L'objectif est de trouver une distribution de matériaux telle que la déformation qui en résulte produit un champ de DLLs proche de celui nécessaire au changement de forme souhaité. Autrement dit, une distribution qui est telle que lorsque la forme initiale est soumise au stimulus, elle se déforme en une forme très proche (voire identique) à la forme finale souhaitée. Pour ce faire, les matériaux à affecter seront sélectionnés parmi un ensemble de matériaux incluant un matériau conventionnel et un nombre fini de matériaux intelligents du même type. Ainsi, une distribution calculée sera représentée par une série d'entiers pour renseigner le matériau affecté à chaque voxel. La Figure 8.25 illustre la manière dont les voxels sont matérialisés via la combinaison de deux matériaux (#0 et #1). Afin de déterminer une distribution convenable, il convient d'optimiser une fonction objectif. Dans le cadre de l'approche proposée, la somme de la différence des carrés entre les DLLs calculés (pour une distribution) et les DLLs souhaités, a été choisie. Une distribution qui minimise cette fonction conviendra. Cette fonction n'étant pas une fonction linéaire d'une distribution, une approche évolutionniste – notamment l'algorithme génétique – a été retenue pour résoudre ce problème d'optimisation. Ce type d'approche est efficace pour résoudre les programmes non-linéaires en nombres entiers [Yokota *et al.*, 1996]. La mise en place du problème peut être décrite comme suit. Le génome est la distribution matérielle, dont les gènes sont les entrées de la représentation matricielle. La population choisie allant jusqu'à 100.

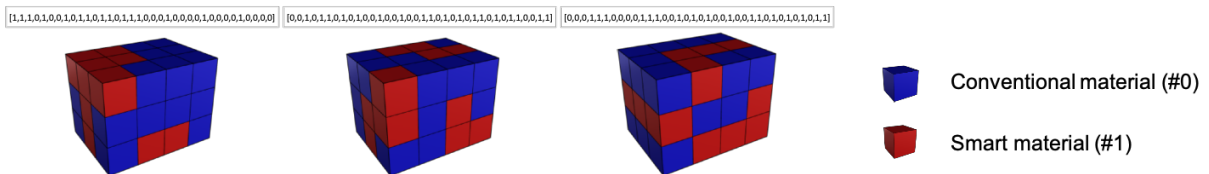


FIGURE 8.25 – Exemple de distributions d'un matériau actif (#1 en rouge) au sein d'un matériau inerte (#0 en bleu) [Sossou *et al.*, 2019b].

⁸¹. D'un point de pratique, cette déformation de la forme initiale vers la forme finale peut être réalisée en utilisant des composants du plug-in Grasshopper du modèleur 3D Rhinoceros.

8.5.5 Développement d'un add-on dans Grasshopper : VoxSmart

Afin de simuler, en conception préliminaire, les comportements inhérents à l'introduction des matériaux intelligents dans la matière et les structures, les ingénieurs-concepteurs ont besoin d'être dotés d'un outil adapté. Pour cette raison, une extension logicielle (add-on), appelée VoxSmart, a été spécialement développée en C# au sein de l'environnement Grasshopper, plug-in de Rhinoceros. Rhinoceros est un logiciel de modélisation géométrique explicite, tandis que Grasshopper est un éditeur d'algorithmes génératifs permettant de générer des géométries dynamiques. La programmation visuelle sous-jacente est généralement constituée d'un ensemble de composants (exécutant chacun un raisonnement) reliés par des connecteurs que sont les données qui les traversent. Ceci rend le moteur de calcul Grasshopper extensible avec la possibilité de développer des add-ons pour des besoins spécifiques tout en étant soutenu par une communauté dynamique et libre. VoxSmart est alors construit autour de six catégories de composants (tels que présentés par le bandeau des composants sur la Figure 8.26), dont (1) l'édition du voxel, (2) l'édition du matériau, (3) la définition des conditions aux limites, (4) la définition du stimulus (chaleur, champ électrique, champ magnétique, lumière) et (5) le calcul de la simulation de comportement ainsi que (6) la distribution.



FIGURE 8.26 – Interface de VoxSmart sous Grasshopper [Sossou *et al.*, 2019b].

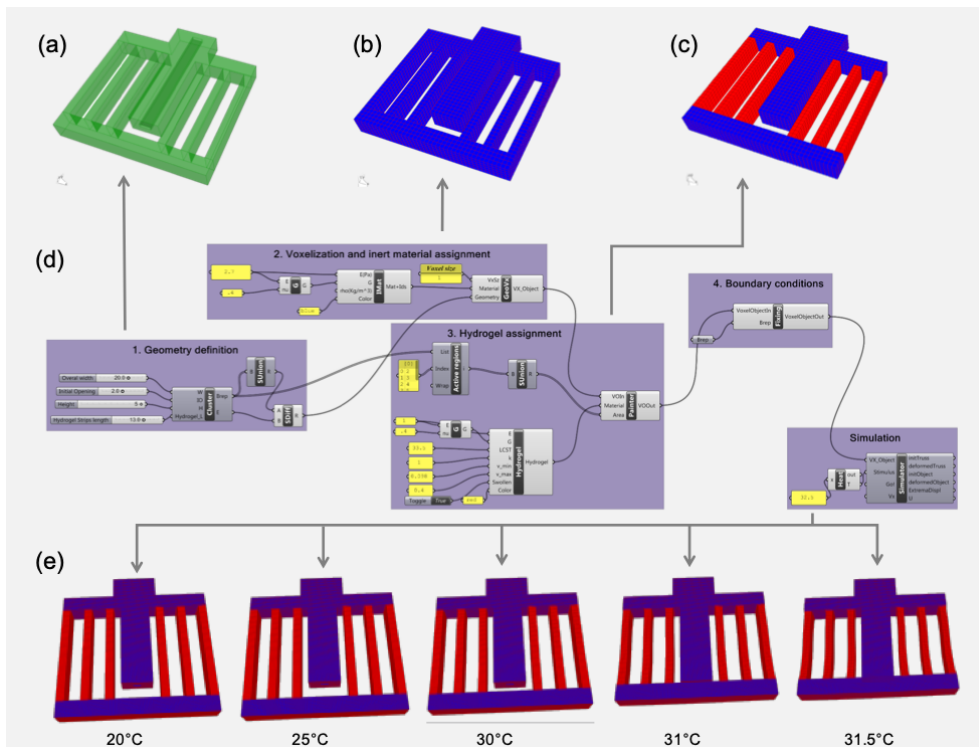


FIGURE 8.27 – Modélisation et simulation d'une valve sous VoxSmart [Sossou *et al.*, 2019].

Le développement de VoxSmart nous a permis de confronter notre approche à un cas concret : une valve, comme objet de conception nécessitant un contrôle de son comportement lorsque soumis à changement de température en milieu aqueux. La Figure 8.27 montre alors la mise en place du (a) modèle géométrique préliminaire, (b) la voxélisation de celui-ci avec l'allocation d'un matériau inerte, puis (c) l'affectation d'un matériau hydrogel pour les parties à activer. Les transformations de modèles étant orchestrées par (d) le programme Grasshopper utilisant les composants VoxSmart. Le moteur de calcul peut ensuite simuler le comportement physique de la valve soumise à différentes températures (e).

D'autres scénarios ont été adressés afin de tester notre approche de calcul de distributions. A cet effet, la Figure 8.28 présente deux aspects concernant le souhait de réaliser une flexion sur une éprouvette où les matériaux alloués aux voxels sont les mêmes que ceux sélectionnés sur le cas précédent (Figure 8.27). La première distribution – dite « originale » car provenant des travaux de [Westbrook & Qi, 2008] – est comparée alors à une distribution, qui a été calculée par notre algorithme génétique développé sous Matlab. On peut remarquer notamment que la simulation du comportement de ces différentes distributions met en exergue des formes désirées quasiment identiques. Ceci démontre que des distributions matérielles différentes peuvent converger vers un comportement similaire.

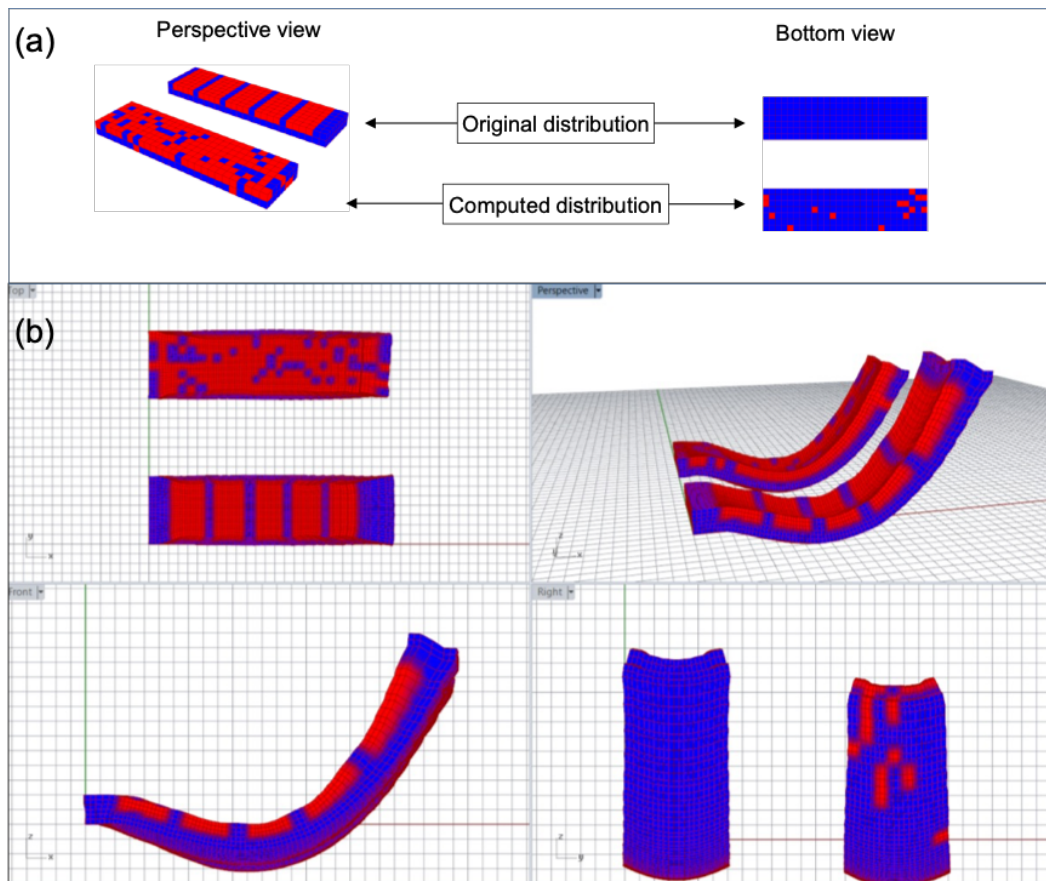


FIGURE 8.28 – (a) Distributions originale et calculée à l'état initial et (b) visualisation des comportements associés issus de VoxSmart au sein de Rhinoceros [Sossou *et al.*, 2019b].

8.5.6 Développement d'une machine dédiée : TITAN γ

En parallèle des développements logiciel, nous avons œuvré à travailler sur deux aspects afin de pouvoir imprimer des pièces comprenant des comportements une fois soumises à des stimuli. L'étude de la littérature nous a permis d'entrevoir très rapidement l'ensemble des moyens disponibles pour l'impression

multi-matériaux intégrant des résines réactives aux stimuli. Parmi les solutions dites lourdes car demandant un investissement conséquent, nous pouvons citer les machines proposées par Stratasys (Objet Connex 3 et J750 notamment), et 3D Systems (ProJet MJP 5600) qui exploitent le concept de matériaux numériques et les techniques de Material Jetting. Cet aspect sera abordé dans le projet scientifique proposé au sein du Chapitre 11.

En raison des délais pouvant s'accumuler sur des différents appels à projets pour acquérir des financements importants, nous avons choisi d'exploiter une ligne de machines open-source, afin d'être rapidement opérationnel pour réaliser des POCs. L'avantage ici est double, d'une part l'accessibilité et d'autre part la possibilité d'avoir le contrôle de la machine aux paramètres souhaités, aux matériaux souhaités mais également à la combinaison de plusieurs techniques de fabrication additive. Dans ce contexte, la littérature nous a permis d'identifier des travaux de recherche à fort potentiel. Il s'agit notamment des projets Xprint [Wang *et al.*, 2016] développé au Massachusetts Institute of Technology (MIT) et Fab@home [Malone & Lipson, 2006; Lipton *et al.*, 2009] à Cornell University. La vision commune de ces projets était de pouvoir déposer directement des résines plus ou moins visqueuses, on parle notamment de *syringe-based deposition system* voire de technique *Direct Ink Write* souvent employée dans le domaine du *bioprinting*.

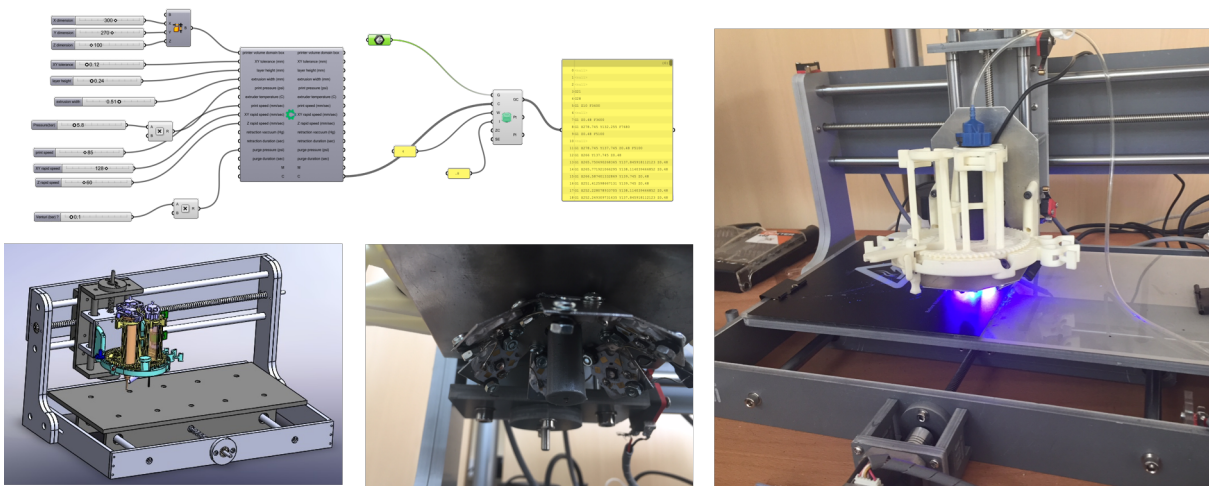


FIGURE 8.29 – Génération du programme au format G-code sous l'environnement Grasshopper et dépôt de PMF en résine via notre machine prototype combinant DIW et photopolymérisation, TITAN γ .

La machine alors proposée, et appelée TITAN γ , a pour objectif de réaliser des pièces telles que sujettes aux cas d'étude sus-mentionnés. En d'autres termes, il s'agit de pouvoir déposer, lors d'une même impression, plusieurs matériaux à l'état de résine ou d'encre. La machine, construite sur un châssis de CNC, exploite donc la technique DIW (seringue pilotée par énergie pneumatique) combinée avec une rampe de photopolymérisation, afin d'assurer la tenue de chaque couche déposée. La fonction multi-matériaux est ici rendue possible pour l'introduction d'un barillet permettant à tout moment de passer d'une seringue à l'autre par rotation. Pilotée par Repetier-Host en tant que pilote d'impression open-source et contrôlée par une carte arduino ATmega 2560 sur laquelle le firmware Marlin a été installé, TITAN γ est en mesure d'interpréter les commandes qu'on lui envoie et d'effectuer les opérations pour aller au delà des POCs actuels limités à des objets quasi 2D (surfaciques).

8.6 Bilan de l'OP₁

Cette opération de recherche, portant sur l'intégration proactive des métiers de l'assemblage et de la fabrication additive, a mis en avant des contributions originales permettant aux architectes produit et concepteurs d'être mieux sensibilisés aux problématiques relevant de l'industrialisation des produits. Ainsi, notre maturité scientifique a pu évoluer, partant d'un objectif premier de considérer les questions d'assemblage

seules en conception, pour ensuite les amener dans un contexte de fabrication additive. La Figure 8.30 illustre les différentes contributions de l'OP₁ et leurs relations au cours des différentes phases de sa carrière. De cette manière, nous sommes arrivés à adresser un des enjeux récurrents dans le domaine du DFX, qui est notamment celui de faire des compromis en entrelaçant des contraintes et connaissances métier. L'intégration de l'assemblage par la fabrication additive en conception préliminaire a également mis en exergue la nécessité de prendre en compte la dynamique temporelle au sein des produits (i.e. gamme de fabrication, gamme d'assemblage, etc.). Cette ouverture dimensionnelle a d'ailleurs évolué du domaine numérique vers le domaine physique via l'ouverture d'un champ scientifique en émergence : l'impression 4D.

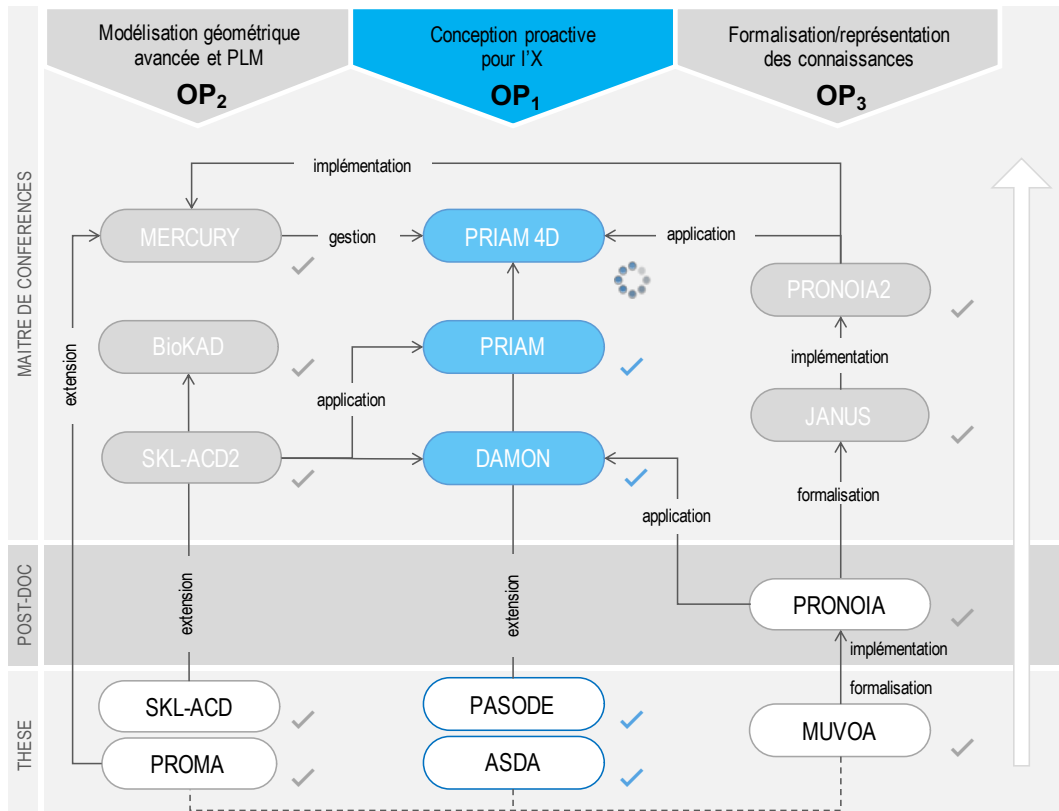


FIGURE 8.30 – Synoptique des contributions scientifiques issues de l'OP₁.

Chapitre 9

Modélisation géométrique avancée et chaîne PLM réconciliée (OP₂)

« *To function in the digital age, we have developed a new digital infrastructure. It's like the human nervous system. Companies need to have that same kind of nervous system : the ability to run smoothly and efficiently, to respond quickly to emergencies and opportunities, to quickly get valuable information to the people in the company who need it, the ability to quickly make decisions and interact with customers. The successful companies of the next decade will be the ones that use digital tools to reinvent the way they work. To make digital information flow an intrinsic part of your company.* » [Bill Gates, 1999]

Ce chapitre vise à présenter les efforts menés au sein de l'opération de recherche traitant des domaines de la modélisation géométrique avancée et de la chaîne PLM réconciliée (OP₂).

9.1 Enjeux hérités de la conception proactive pour l'X

L'intégration des métiers en conception met généralement en œuvre des actions correctives et réactives visant à vérifier [Maropoulos & Ceglarek, 2010], faire évoluer la géométrie voire simplifier la structure du produit [Demoly *et al.*, 2013a]. Le Chapitre 8 nous a permis d'exposer une vision scientifique différente, considérant cette intégration avec une dimension proactive. Gage d'efficacité et de sensibilisation auprès des ingénieurs-concepteurs, la conception proactive va demander, par ailleurs, de revoir les principaux piliers de la stratégie PLM permettant à l'activité de conception de se développer, à savoir la CAO et le PDM (Product Data Management). Au cours des deux dernières décennies, les stratégies d'entreprise – dont celles adressant la gestion du cycle des produits – ont remis en cause les processus d'ingénierie ; par exemple, cela a été nécessaire pour coupler le PLM aux principes de l'ingénierie concourante [Helms, 2002 ; Sapuan *et al.*, 2006].

Une démarche similaire doit alors être menée, afin de supporter la conception proactive pour l'X. Le premier aspect concerne l'évolution des approches de modélisation géométrique, afin d'être adaptées à la collaboration entre acteurs métier, à l'intégration progressive de connaissances métier voire aux opportunités offertes de nos jours par le métier de la fabrication additive (i.e. formes organiques, structures en treillis à densité hétérogène, etc.). Il est admis, aujourd'hui, que ces approches sont encore davantage orientées vers la définition des composants (*bottom-up*) via les caractéristiques géométriques (*feature-based*), et principalement contrôlées par des paramètres pouvant être d'ordre dimensionnel, géométrique voire des contraintes algébriques [Shah, 2001]. Malgré les avancées dans ce domaine, nous pouvons remarquer que la majorité des modèles CAO actuels restent encore extrêmement chargés en informations.

Notons également que la modélisation des relations et des contraintes parmi les descriptions en conception – capturées à différents niveaux dans la structure du produit – demande à être davantage étudiée [Zeng & Horvath, 2012]. Dès lors, ceci offre une représentation limitant l'introduction et l'exploitation d'informations techniques pertinentes à différents niveaux d'abstraction pour les concepteurs, et donc ces approches ne peuvent s'inscrire complètement dans le maintien des facteurs de compétitivité connus comme la flexibilité, l'efficacité, la fluidité, la traçabilité, etc. Pour dépasser ce manque de souplesse au niveau des structures d'informations en CAO, les approches de modélisation descendante (*top-down*) ont un rôle à jouer mais manquent encore d'accompagnement méthodologique [Demoly *et al.*, 2011c]. Les méthodologies sont souvent propres aux entreprises et sont donc bien évidemment protégées et brevetées [Landers & Khurana, 2004], car elles permettent aux organisations de conserver un avantage compétitif. Il est en effet très important de construire des espaces de conception, à la fois robustes et efficaces [Leahy, 2013], capables d'accueillir des connaissances et contraintes provenant d'un large spectre de métiers (i.e. assemblage, fabrication, maintenance, recyclage, etc.) pour répondre au juste besoin, faisant émerger ainsi la géométrie des composants [Roucoules, 2007].

Les enjeux au niveau de la modélisation géométrique en CAO vont de pair avec ceux associés à la gestion des informations techniques couvrant les phases de conception et d'industrialisation. Plus précisément, les enjeux dans ce domaine sont fondamentalement associés à (i) la complexité des multiples nomenclatures (i.e. nomenclatures études, CAO, méthodes, etc.) qui sont actuellement gérées par les systèmes PDM et MPM (Manufacturing Process Management), (ii) l'orchestration des flux d'informations permettant de les maintenir à jour, ainsi que (iii) l'augmentation sémantique des associations entre les divers objets techniques [Louihichi & Rivest, 2014]. A ceci s'ajoute que les interactions existantes entre ces deux systèmes ne permettent pas de couvrir raisonnablement les principes de la conception proactive pour l'X. Il est effectivement difficile de jouer de flexibilité entre systèmes d'informations et applications CAO sans une tierce application de type *hub*. Dans ce contexte, nous soutenons qu'une application jouant un rôle de « *peacemaker* » ou de conciliateur/médiateur [Demoly *et al.*, 2013] soit pertinente, afin d'orchestrer les flux d'informations entre les départements des études et des méthodes, favorisant ainsi les échanges bi-directionnels, la continuité sémantique par l'articulation sémantique, et l'irrigation/propagation des informations avec une fédération sémantique à différents niveaux d'abstraction [Fabian *et al.*, 2012]. Dans cette direction, plusieurs chercheurs ont initié des efforts pour structurer des applications, que ce soit les applications basées sur les concepts de médiateur [Madhusudan, 2005], les applications *context-aware* voire les applications *knowledge on-demand* [Lee & Kim, 2012].

9.2 Incubateur de conception en contexte PLM

En cohérence avec le concept d'incubateur de conception – projeté sur la séquence bouclée passé-présent-futur – tel qu'introduit à la Figure 8.3 au sein du Chapitre 8 Section 8.2.3, nous développons ici sa mise en place et sa dynamique d'évolution dans un contexte PLM. Le *hub incubator* consiste à améliorer la coordination des flux d'informations pour supporter la conception proactive pour l'X, notamment à travers les systèmes PDM et MPM, et les applications CAO. Son rôle principal est de (i) gérer (générer et capturer) les contextes de conception pour les architectes de produits et les concepteurs, (ii) capturer les intentions de conception lors de la phase de modélisation CAO, et (iii) instancier les connaissances appropriées (i.e. les connaissances procédurales et déclaratives) au bon moment et sur les objets techniques adéquats. Avec ce type de fonctions couplées à des objets techniques de contrôle, l'activité de modélisation géométrique peut être comprise et suivie que ce soit par l'acteur métier voire par une application logicielle.

De ce fait, la Figure 9.1 à la page suivante présente une vision globale de l'incubateur de conception en contexte PLM, dans lequel une application de type *hub incubator* – orchestrant les flux d'informations entre les systèmes susmentionnés – est introduite. En d'autres termes, elle assure et rythme la structuration du produit, la définition/capture du contexte de conception couplée à une orientation métier (e.g. gamme d'assemblage et de fabrication), ainsi que l'instanciation des connaissances à la demande en CAO. Actuellement, les systèmes PDM permettent la gestion des données techniques d'ingénierie, telles que les nomenclatures d'ingénierie (eBOM - engineering Bill Of Materials), les nomenclatures CAO (CAD-BOM), les sous-ensembles, les pièces, les structures de produit, les documents, les workflows, les configurations, etc. De tels systèmes fournissent un support précieux aux architectes produit et aux

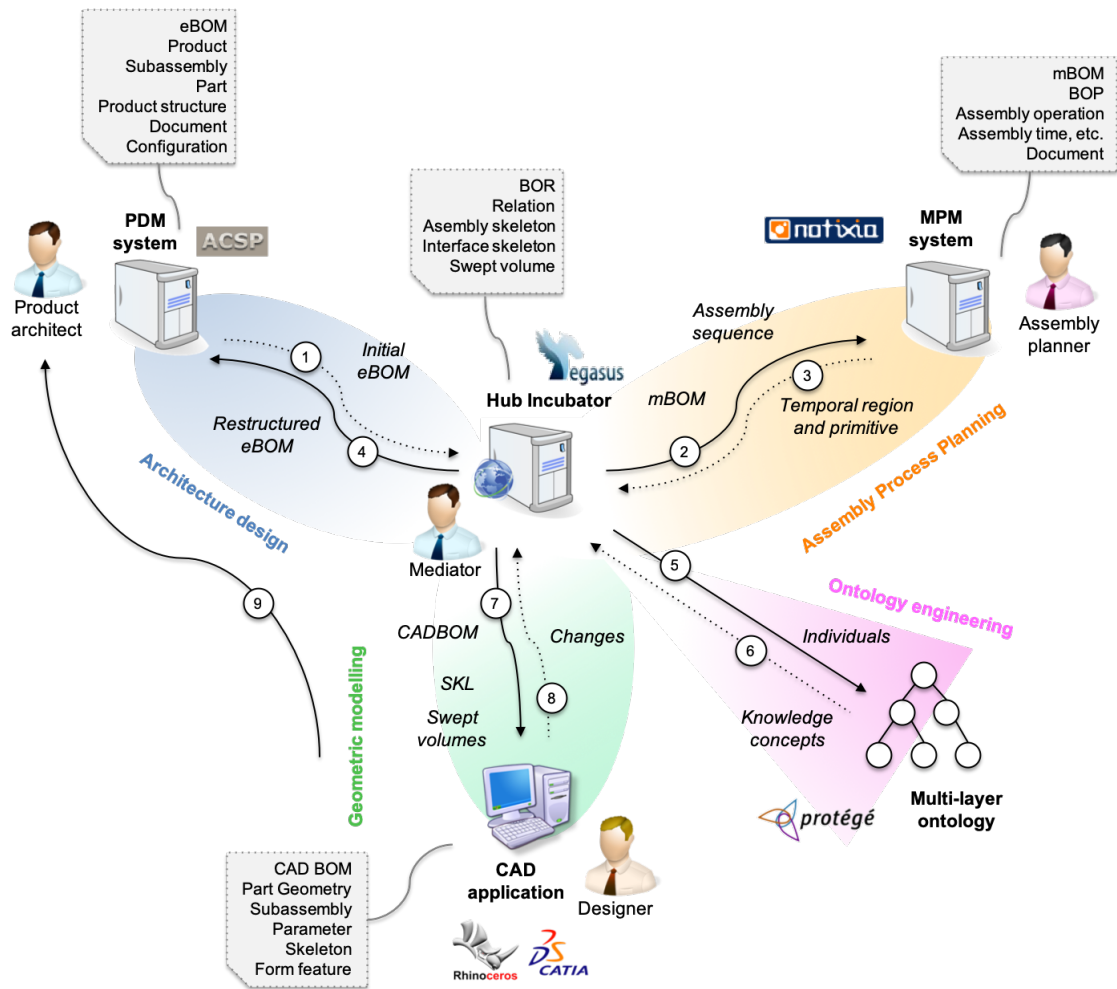


FIGURE 9.1 – Schéma général de l'incubateur de conception en contexte PLM [Gruhier *et al.*, 2017]

concepteurs. D'un autre coté, les systèmes MPM gèrent les informations associées aux gammes métiers (e.g. fabrication, assemblage, etc.), et permettent de manipuler des opérations reliées par des primitives temporelles, des nomenclatures orientées industrialisation (mBOM - manufacturing Bill Of Materials), des listes de procédés (BOP, Bill of Processes), des instructions de travail, des documents, des ressources, etc. Les applications CAO, quant à elles, présentent un ensemble d'entités géométriques à définir et à exploiter pour faire émerger la géométrie du produit, mais également des contraintes et des paramètres pour ne citer qu'eux. L'ouverture vers une ontologie multi-niveaux sera abordée dans la Section 5 de ce chapitre.

Positionné à une place centrale au sein de cet écosystème PLM, le *hub incubator* propose de gérer les flux d'informations via l'apport de nouvelles entités à capitaliser, notamment la nomenclature des relations (BOR - Bill Of Relations), les relations existantes entre les composants, les opérations et les relations d'allocation composants-opérations, ainsi que les entités géométriques intermédiaires de types squelettes et surfaces fonctionnelles, qui permettent de structurer les espaces de conception. Ces nouvelles entités techniques permettent de fournir un état complémentaire du produit tout en tenant compte des contraintes métier, particulièrement celles réservées à aux métiers de la fabrication et de l'assemblage. Cette tierce application permet alors de mettre en relation l'architecte produit, le gammiste et l'expert process ainsi que les concepteurs, en introduisant une part importante de raisonnement pour dynamiser la génération d'informations et les échanges de données, d'informations et de connaissances.

9.3 Modélisation géométrique descendante d’espaces de conception

Sur la base des enjeux évoqués à la section 9.1, un effort doit être réalisé pour définir, de manière descendante, des espaces de conception en phase de conception préliminaire. Pour ce domaine, plusieurs travaux de la littérature ont mis en évidence des besoins liés à la définition de contextes de conception permettant d’intégrer des connaissances ou des raisonnements [Chen *et al.*, 2012; Camba *et al.*, 2016]. De manière pragmatique, pour être proactif lors de la conception d’assemblages de systèmes mécaniques obtenus par procédés soustractifs ou additifs, les architectes produit et les concepteurs doivent pouvoir s’appuyer sur des entités géométriques intermédiaires traduisant des intentions à différents niveaux d’abstraction [Clement *et al.*, 1994; Bodein *et al.*, 2014; Chu *et al.*, 2016]. Ces entités leur permettront de faire appel à des contraintes et des connaissances spécifiques, et donc de faire évoluer les situations dans lesquelles ils travaillent [Camba *et al.*, 2016]. En d’autres termes, la structure à mettre en place en CAO doit pouvoir supporter l’intégration de connaissances associées aux métiers de l’assemblage et de la fabrication additive, et doit également permettre de déterminer les géométries offertes par ces métiers [Sossou *et al.*, 2019a]. C’est l’objectif des travaux que nous allons présenter au cours des prochains paragraphes.

9.3.1 Description générale de l’approche SKL-ACD2

L’approche appelée SKL-ACD2 (SKeLeton-based Assembly Context Definition 2) couvre les étapes ①, ②, ③, ④ et ⑦ de la Figure 9.1 précédente. Celles-ci offrent des mécanismes pour définir un contexte de conception basé sur des entités géométriques appropriées pour les concepteurs de systèmes mécaniques. En élargissant l’approche SKL-ACD initialement proposée par [Demoly *et al.*, 2011c] puis complétée par [Petrazoller *et al.*, 2013; Chu *et al.*, 2016], de nouveaux éléments géométriques sont introduits de manière à augmenter les espaces de conception puis la prise de conscience des concepteurs pour des définitions détaillées voire des calculs ultérieurs (e.g. optimisation topologique pour la fabrication additive, génération de structure en treillis, etc.). Le logigramme proposé à la Figure 9.2 présente les informations d’entrée/sortie (parallélépipèdes blanc) et les procédures de raisonnement associées (rectangles gris), où les principaux concepts (déjà existants dans la littérature) sont définis dans le Tableau 9.1 ci-dessous. Les sous-sections à venir sont destinées à décrire et expliquer les étapes principales de l’approche SKL-ACD2.

Tableau 9.1 – Définitions des entités géométriques développées dans l’approche SKL-ACD2.

Entité	Définition
Squelette d’assemblage	Cette entité – composée de droite, plan, point, etc. – représente les contraintes d’assemblage et peut être considérée comme étant le premier élément géométrique sur lequel les concepteurs vont définir leurs squelettes d’interface et allouer les volumes-enveloppes.
Squelette d’interface	Basée sur les squelettes d’assemblage, cette entité décrit la géométrie frontière (e.g. cercle, rectangle, esquisse, etc.) qui est utilisée pour construire une surface fonctionnelle.
Surface fonctionnelle	Cette entité représente une surface de contact entre deux composants, et est construite sur la base de squelettes d’assemblage et d’interface.
Volume-enveloppe	Cette entité représente l’encombrement spatial d’un composant en exploitant des primitives géométriques de type cylindre, sphère, parallélépipède, etc. Sa position et son orientation dans l’espace sont données par un repère.

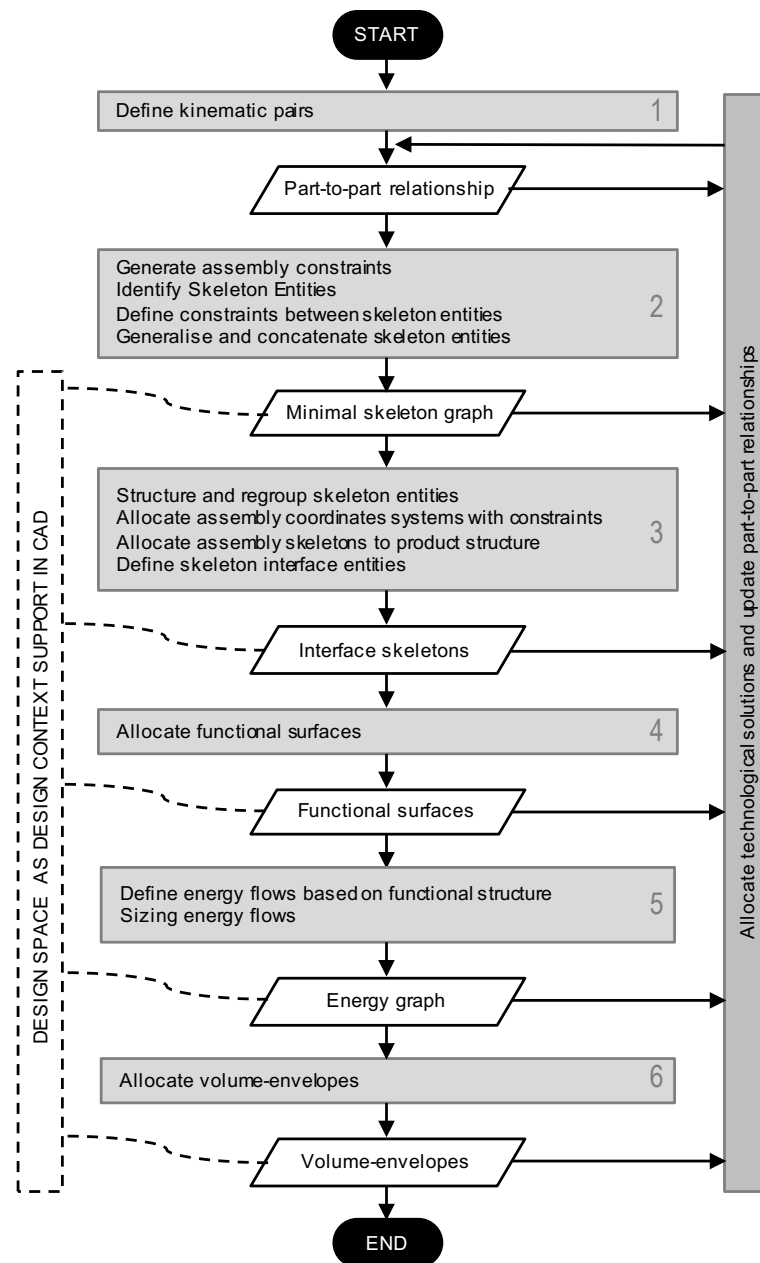


FIGURE 9.2 – Logigramme de l'approche SKL-ACD2.

9.3.2 Héritage de l'approche SKL-ACD

Cette approche de modélisation géométrique descendante – couvrant les étapes 1 et 2 de la Figure 9.2 – a tout d'abord été initiée par les travaux de [Demoly *et al.*, 2011c]. Partant d'un graphe relationnel décrivant des relations composant-à-composant sur lesquelles des ordres de précedence sont alloués, il est alors possible de :

- déterminer plusieurs séquences d'assemblage admissibles, afin de structurer le produit avec un regard relatif aux problématiques d'assemblage, et ;
- déduire les relations composant-composant – décrites sous la forme de relations cinématiques ou technologiques – en squelettes d'assemblage.

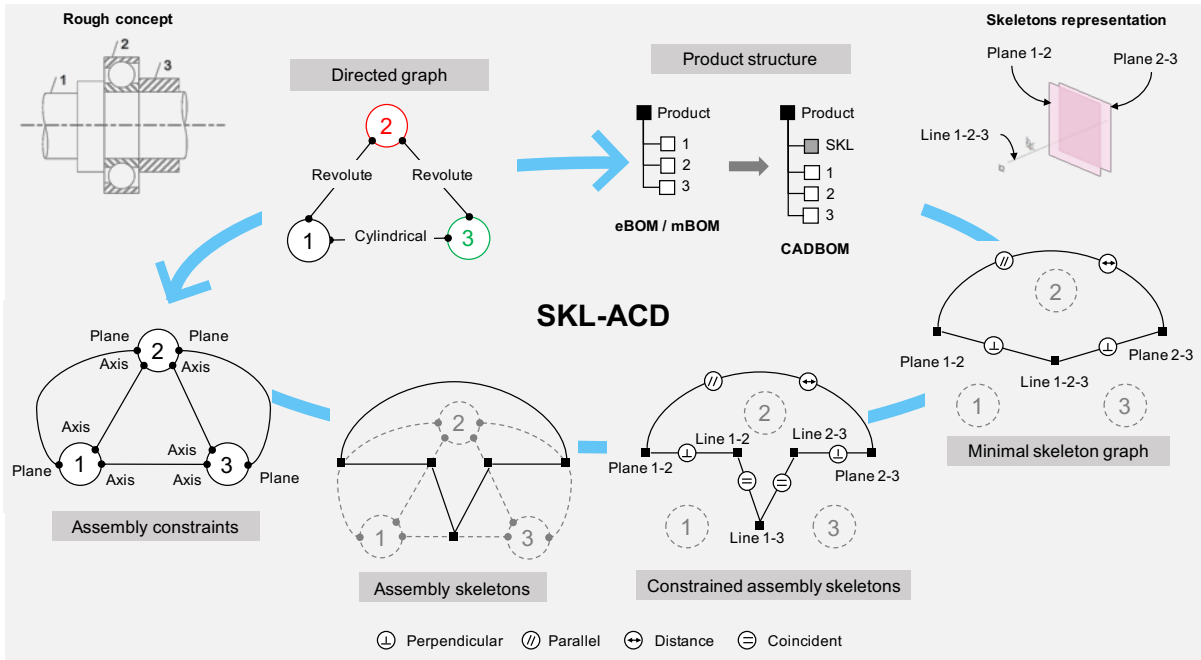


FIGURE 9.3 – Approche SKL-ACD : du graphe des liaisons aux squelettes d’assemblage.

La Figure 9.3 illustre le processus de génération des squelettes d’assemblage tel que proposé dans l’approche SKL-ACD. Nous pouvons voir qu’en fonction des données d’entrée fixées par l’architecte produit, plusieurs graphes sont déduites, dans le but de faire émerger un graphe minimal des squelettes d’assemblage à être intégrés dans une structure produit reconfigurée (nous parlerons de CADBOM) à cet effet. Pour le passage des différents graphes, le Tableau 9.2 ci-dessous met en évidence les associations entre les liaisons cinématiques, les contraintes d’assemblage, les squelettes d’assemblage et leurs contraintes. De cette manière les concepteurs peuvent véritablement travailler dans un contexte de conception descendante en se référant à des entités contrôlées par l’architecte produit. Plus précisément, pour chaque niveau hiérarchique de la CADBOM, une pièce squelette (SKL) – de type « fantôme » car n’existant pas dans la eBOM – est spécialement introduite, afin de centraliser l’ensemble des entités intermédiaires créées en CAO.

Tableau 9.2 – Définition des squelettes d’assemblage basées sur les relations cinématiques [Demoly et al., 2011c].

Kinematic pair	Assembly Constraint	Assembly skeleton Entity	Constraint	Assembly axis
Rigid	CS/CS	CS	/	Any
Revolute	Axis/axis and plane/plane	Line, Plane	Perpendicular	Rotation axis
Prismatic	Axis/axis and plane/plane	Line, Plane	Perpendicular	Translation axis
Screw	Axis/axis and plane/plane	Line, Plane	Perpendicular	Rotation axis
Cylindrical	Axis/axis	Line	/	Translation/rotation axis
Spherical	Point/point	Point	/	Any
Planar	Plane/plane	Plane	/	Perpendicular to the plane
Point-contact	Point/plane	Point, Plane	Coincidence	Perpendicular to the plane
Line-contact	Line/plane	Line, Plane	Coincidence	Perpendicular angle
Curve-contact	Curve/curve	Curve	/	Translation axis

9.3.3 Des squelettes d'interface aux volumes-enveloppes

Suite à la définition des squelettes d'assemblage, il devient opportun d'aller plus loin en y agrégeant des surfaces fonctionnelles pour matérialiser les interfaces entre les composants du produit ainsi qu'entre ces derniers et les potentiels milieux extérieurs. Une transition nécessaire concerne l'introduction de squelettes d'interface (e.g., cercle, rectangle, esquisse, etc.), qui – construits sur des squelettes d'assemblage – permettront de générer des surfaces fonctionnelles. Dans ce contexte, des informations pertinentes peuvent alors être extraites des liaisons cinématiques. Le Tableau 9.3 récapitule les types d'entités pouvant être allouées pour répondre à une intention de réaliser une liaison cinématique en particulier. Par exemple, une liaison pivot sera décrite par une ligne et un plan en tant que squelettes d'assemblage, sur lesquels deux squelettes d'interface spécifiques (implémentés dans des esquisses) sont alloués.

Tableau 9.3 – Définition des éléments géométriques des espaces de conception en fonction des liaisons cinématiques.

Kinematic pair	Assembly skeleton	Interface skeleton	Functional surface	Volume-envelope
Revolute	Line Plane (Perpendicular)	2 circles \in Plane Circle or rectangle \in Plane Segment \in Line	Cylindrical and circular	2 cylinders Cylinder or cuboid
Prismatic	Line Plane (Perpendicular)	Rectangle \in Plane	Rectangular	Cuboid
Screw	Line Plane (Perpendicular)	Circle \in Plane Segment \in Line Circle or rectangle \in Plane	Cylindrical	Cylinder Cylinder or cuboid
Cylindrical	Line Segment \in Line	Circle	Cylindrical	Cylinder Cylinder or cuboid
Spherical	Point	Circle	Spherical	Cylinder Cylinder or cuboid
Planar	Plane	Circle or rectangle \in Plane Circle or rectangle \in Plane	Circular or rectangular Circular or rectangular	Cylinder or cuboid Cylinder or cuboid
Point-contact	Plane Point	Circle or rectangle \in Plane	Circular or rectangular Cylinder or cuboid	Cylinder or cuboid
Line-contact	Plane Line	Circle or rectangle \in Plane	Circular or rectangular	Cylinder or cuboid Cylinder or cuboid

En considérant ce tableau et le graphe minimal des squelettes (présenté à la Figure 9.3), des squelettes d'interface (notés ISKL) sont ensuite introduits avec des contraintes similaires à des contraintes de squelettes d'assemblage, afin d'établir une couche de contrôle supplémentaire dans la définition descendante du produit. La Figure 9.4 montre l'affectation des squelettes d'interface (représentés par des triangles bleus) pour les trois relations cinématiques introduites pour le cas d'étude, ce qui explique clairement l'émergence géométrique progressive des espaces de conception en CAO. De même, une définition des squelettes d'interface peut être affinée en fonction du choix d'une solution technologique. Par exemple, pour répondre à un besoin de réaliser une liaison glissière, il est alors possible de choisir une solution technologique prise parmi un ensemble de solutions existantes (e.g. guidage cylindrique, guidage prismatique, etc.) et ensuite de fixer le type de forme. Dans le cas d'un guidage prismatique, il est possible notamment de choisir une section en T, une section rectangulaire voire une section en V [Demoly *et al.*, 2019c].

Sur cette base, l'étape suivante consiste à générer les surfaces fonctionnelles, soit en remplissant les squelettes d'interface soit extrudant/développant les entités d'interface sur une direction. Ainsi il est possible d'obtenir des surfaces fonctionnelles qui sont communes entre les pièces d'un assemblage et qui assurent la robustesse du modèle CAO. Ceci est effectivement orthogonal vis-à-vis des approches traditionnelles qui créent des surfaces fonctionnelles sur les composants pour ensuite les relier par des contraintes d'assemblage. Notre approche permet donc de diminuer le nombre d'entités géométriques à éditer et également d'éliminer les contraintes d'assemblage, ce qui allège considérablement les modèles CAO. Afin d'aider les architectes produit, le Tableau 9.3 précédente traduit également des informations pertinentes pour la construction des surfaces fonctionnelles.

En d'autres termes, une surface fonctionnelle est ici une entité géométrique – porteuse de fonctions techniques – représentant un contact d'assemblage et assurant un ou plusieurs degrés de liberté spécifiques (composés de translation, rotation voire les deux). Une telle étape peut être considérée comme une étape nécessaire et intermédiaire pour la définition des espaces de conception car elle contribue à la spécification de la position relative des composants du produit et de la localisation des interactions entre composants. Cela conduit évidemment à un graphe enrichi, dans lequel les surfaces fonctionnelles (notées FS) sont représentées par des pentagones verts comme présenté sur la Figure 9.5. Ces surfaces fonctionnelles offrent l'avantage d'être des entités porteuses de connaissances voire de spécifications [Ballu *et al.*, 2006].

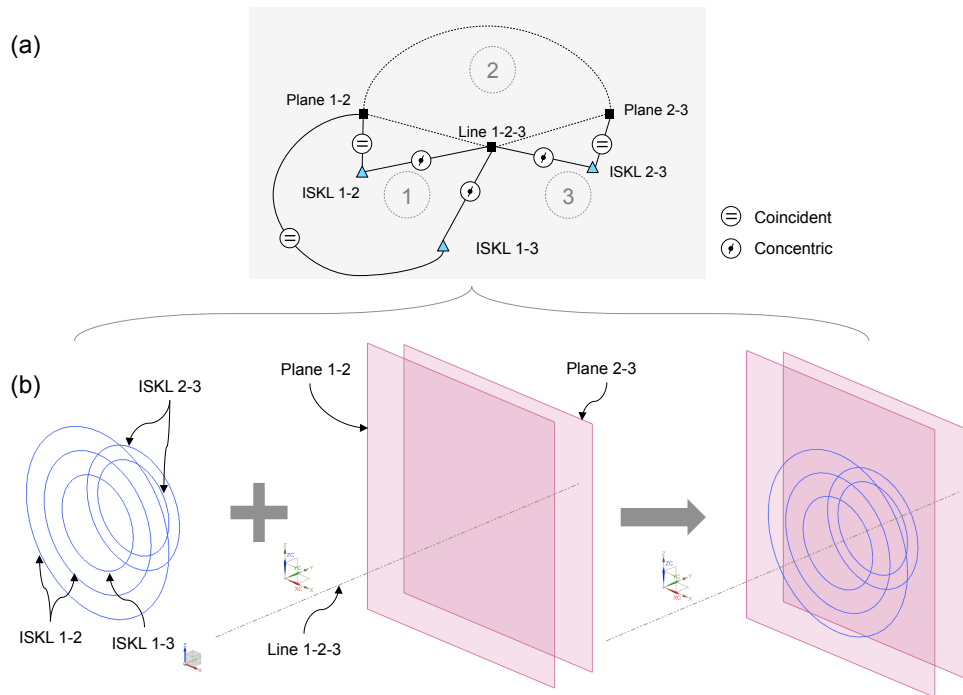


FIGURE 9.4 – (a) Graphe des squelettes d'interface et (b) représentation géométrique associée.

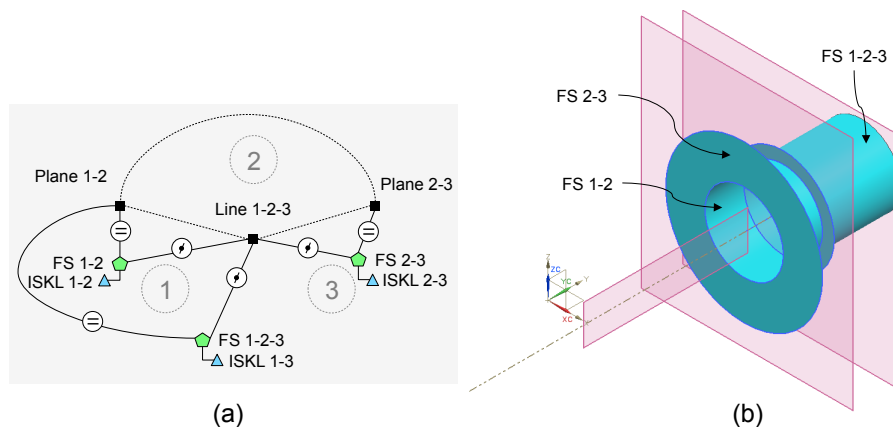


FIGURE 9.5 – (a) Graphe des surfaces fonctionnelles et (b) représentation géométrique associée.

La dernière étape permet d'allouer un volume-enveloppe (appelé VE) pour chaque composant du

produit. L'entité volume-enveloppe, définie à partir de primitives volumiques (e.g. cylindre, sphère, parallélépipède, etc.) et des paramètres dimensionnels, a pour objectif de limiter l'encombrement spatial de la pièce à laquelle elle est affectée. Cette étape d'agencement spatial des pièces du produit est alors cruciale pour l'instanciation des connaissances que ce soit dans le contexte de la conception proactive, de l'optimisation topologique, de la conception générative de structures cellulaires voire de structures organiques. Une extension de l'approche SKL-ACD2 pour couvrir les problématiques d'édition de modèles numériques dans le domaine de la biomécanique, a été réalisée [Demoly & Roth, 2017]. Appelée BioKAD (Biomechanical structures using Knowledge-Aided Design), l'approche a pour objectif de convertir des informations médicales pour générer des modèles CAO, intégrant des configurations biomécaniques (e.g. différentes structures osseuses de mains), destinés à la simulation numérique.

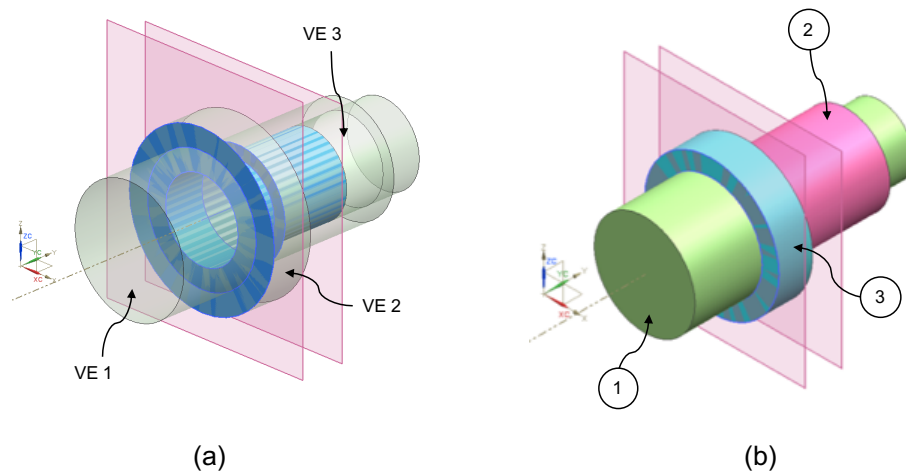


FIGURE 9.6 – (a) Allocation de volumes-enveloppes et (b) modélisation solide des composants.

Notons qu'il est également possible de combiner cette étape avec des primitives méréotopologiques (nous aborderons cet aspect au Chapitre 10), afin de décrire les relations entre les régions spatiales (une région spatiale est une partie de l'espace occupée par certaines entités, telle qu'un composant physique) dans le produit. La méréotopologie est une théorie des régions adaptée aux problèmes de conception intégrée et proactive, qui vise à joindre la méréologie (relation d'une partie à un tout) à la topologie (relation de connexion) [Gruhier *et al.*, 2016]. De cette manière, les régions spatiales peuvent être combinées vers des volumes-enveloppes plus complexes. Par souci de clarté, la Figure 9.6 illustre l'allocation de volumes-enveloppes via des squelettes d'assemblage et d'interface et des surfaces fonctionnelles pour constituer des espaces de conception propices à l'émergence des géométries des composants.

9.3.4 Cas d'étude et implémentation

Afin de démontrer l'application de l'approche SKL-ACD2, nous présentons, dans cette section, un cas d'étude portant sur le conception d'un étai. Traditionnellement, l'assemblage mécanique proposé est composé de quatre pièces principales répertoriées comme pièces internes, afin de satisfaire la fonction principale permettant à l'utilisateur de sécuriser un objet (entre les mors). A cette liste s'ajoute l'objet à sécuriser ainsi que les milieux extérieurs au système à concevoir, faisant également émerger les interfaces externes. L'attribution des composants est la suivante : ① Opérateur, ② Manivelle, ③ Axe, ④ Mors, ⑤ Objet à maintenir, ⑥ Bâti et ⑦ table d'atelier. Pour cet assemblage, nous avons développé l'ensemble des différents graphes pour construire, de manière pas à pas, les espaces de conception dans lesquels la géométrie des composants doit émerger. L'ensemble de la procédure SKL-ACD2 peut être retrouvée à la Figure 3.3 de la Section 3.2.2 (Chapitre 3). Pour faciliter la compréhension du lecteur, nous avons uniquement extrait, à la Figure 9.7, le graphe des squelettes d'interface afin d'illustrer la manière dont les diverses entités géométriques sont associées.

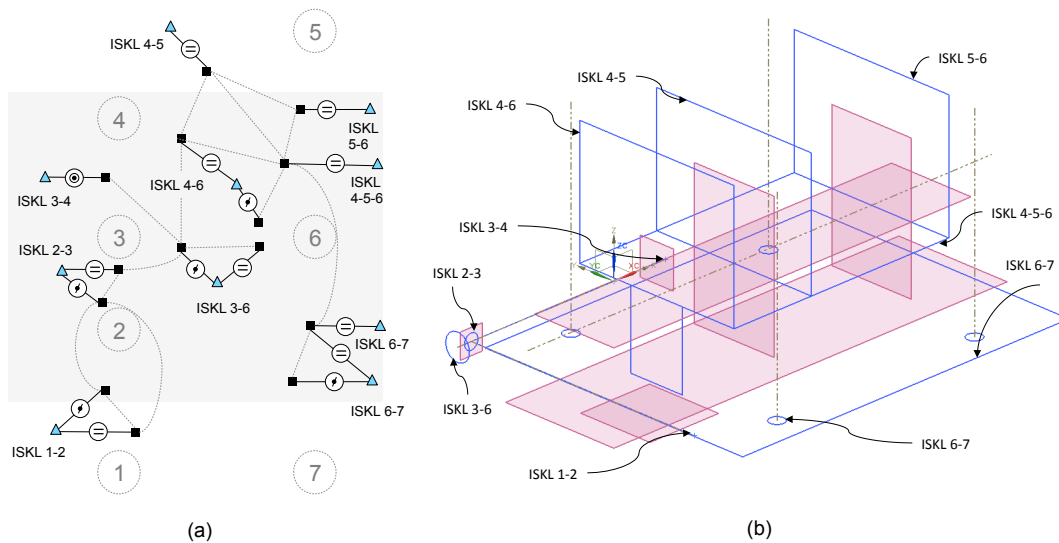


FIGURE 9.7 – (a) Graphe des squelettes d'assemblage et d'interface et (b) représentation géométrique associée pour l'étude de l'étiau.

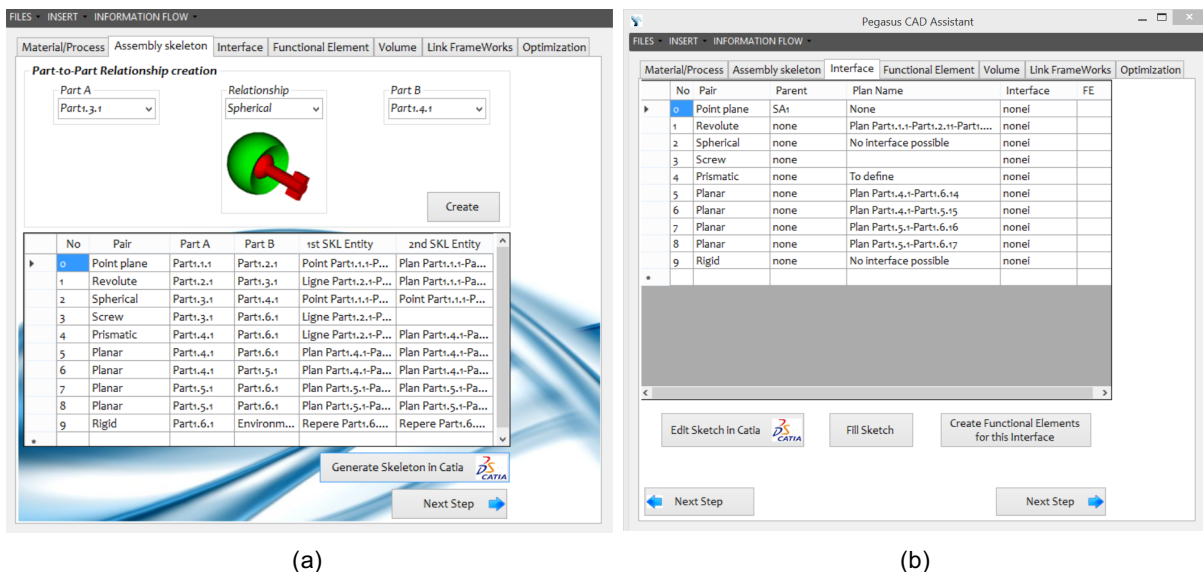


FIGURE 9.8 – Interfaces de l'application Pegasus CAD Assistant montrant la définition des squelettes (a) d'assemblage et (b) d'interface.

L'approche a, par ailleurs, été implémentée dans une application développée en VB.Net et appelée Pegasus CAD Assistant (voir Figure 9.8). Dans le contexte de notre *hub incubator*, l'application Pegasus CAD Assistant peut être considérée comme une extension nous permettant d'interagir avec l'environnement CAO (ici CATIA V5). De cette manière, les entités manipulées et générées par Pegasus CAD Assistant peuvent être à la fois envoyées vers l'application CAO et également être capturées dans le *hub incubator*. La Figure 9.8 illustre les interfaces de l'application pour la définition des squelettes d'assemblage (a) et des squelettes d'interface (b) renseignés pour l'étude de cas. Cette application a été réalisée pour être quasiment intégrée à CATIA V5. Cela implique que toutes les actions de Pegasus CAD As-

sistant peuvent être directement mises en œuvre par la création d’entités géométriques dans le système CAO. L’application est actuellement en cours d’intégration (en utilisant le langage de programmation C#) à notre *hub incubator*, appelé Pegasus. Une description détaillée des fonctionnalités principales de l’application Pegasus est présentée dans [Demoly *et al.*, 2013a], les fonctionnalités pertinentes seront, quant à elles, abordées dans les sections ci-après.

9.4 Chaîne PLM réconciliée

Nos efforts – dédiés au développement des espaces de conception propices à l’intégration, au juste besoin, de connaissances métier – ont introduit de nouvelles entités géométriques à définir au sein d’une structure squelette complémentaire et couplée à la structure produit en CAO (CADBOM). Cette structure de contrôle doit pouvoir être gérée par une solution idoine au sein de l’écosystème PLM [Kim *et al.*, 2004, 2006; Rachuri *et al.*, 2006]. En remontant à un niveau d’abstraction supérieur, on constate que ces entités agrégées apportent du sens au produit car étant affectées sur les relations [Brown, 2006]. Ces dernières permettent d’établir des liens entre les composants du produit et facilitent ainsi les processus cognitifs en conception proactive pour l’X [Gruhler, 2015; Gruhier *et al.*, 2016]. Pour dépasser les obstacles liés au manque d’associativité entre les objets techniques couvrant les systèmes hétérogènes actuellement en place dans l’industrie [Louihichi & Rivest, 2014], nous nous devons d’y apporter des solutions souples. Nous pouvons alors jouer sur le modèle de données, les structures ainsi que les flux d’informations où une sémantique adaptée à la nature des objets techniques doit être mise en œuvre. Celle-ci permettra, *in fine*, de réconcilier les structures d’informations et d’assurer une continuité sémantique entre la conception et l’industrialisation, telle que proposée par les travaux de [Cheutet, 2012] pour le lien conception-production. Les sous-sections ci-après aborderont ces éléments clés tout en couvrant les neuf étapes de la Figure 9.1.

9.4.1 Référentiel de départ : le modèle multi-vues MUVOA

L’écosystème PLM, proposé pour l’incubateur de conception, qualifié de « *hub incubator* », a été construit sur la base d’un modèle multi-vues, MUVOA (MUlti-Viewpoints Oriented Assembly) [Demoly *et al.*, 2010]. En se concentrant sur la classe *Relation*, le modèle (présenté à la Figure 9.9) a pour objectif de connecter les entités et leurs associations sur les domaines de la conception et du processus d’assemblage. Pour pouvoir considérer les nouvelles entités de contrôle liées à l’approche SKL-ACD2, un domaine *fantôme* a été délimité, afin d’assurer la réconciliation entre ces deux domaines. Ceci a donc pour conséquence d’étendre le modèle MUVOA – initialement structuré autour de ces deux domaines – vers un troisième domaine : le domaine « interface ». Ceci rejoint d’autres chercheurs qui ont également pris cette orientation pour intégrer le métier de la fabrication en conception [Skander *et al.*, 2008], voire pour intégrer plusieurs disciplines [Zheng *et al.*, 2017]. Ce premier découpage va être accompagné par l’allocation de vues spécifiques liées aux préoccupations des acteurs métier impliqués, dont l’architecte produit, le médiateur, le gammiste, l’expert process et le concepteur. Le médiateur ici joue un rôle crucial pour intégrer proactivement des contraintes et des connaissances métier en conception. Parmi les vues spécifiques identifiées, nous pouvons alors citer les vues : fonctionnelle, structurelle, contextuelle, géométrique, comportementale et technologique.

D’autre part, la conception basée sur les relations prend en compte l’importance des relations entre les pièces et les opérations d’assemblage, afin d’accroître l’efficacité en conception. Une relation est ici considérée comme le moyen d’établir, de représenter ou de maintenir un lien cohérent entre deux entités techniques [Demoly *et al.*, 2012a]. La Figure 3.4, introduite Section 3.2.3, amorce, à un niveau d’abstraction supérieur, les verrous scientifiques à relever autour de la classe *Relation*, notamment ceux couvrant des dimensions différentes (i.e. spatiale, temporelle et spatiotemporelle) et à leurs multiples associations. De ce fait, les relations spatio-temporelles permettent donc de comprendre comment les pièces sont physiquement connectées ensemble de manière dynamique [Brown, 2006]. Celles-ci fournissent également des informations sur l’évolution du produit, rationalise les intentions de conception, capture les modifications apportées dans le temps et dans l’espace et assure la cohérence de la définition du couple produit-process. Le Tableau 9.4 présente les types de relation nous permettant d’élever nos objets à l’échelle spatio-temporelle (ceci concerne plus particulièrement les trois dernière lignes du tableau).

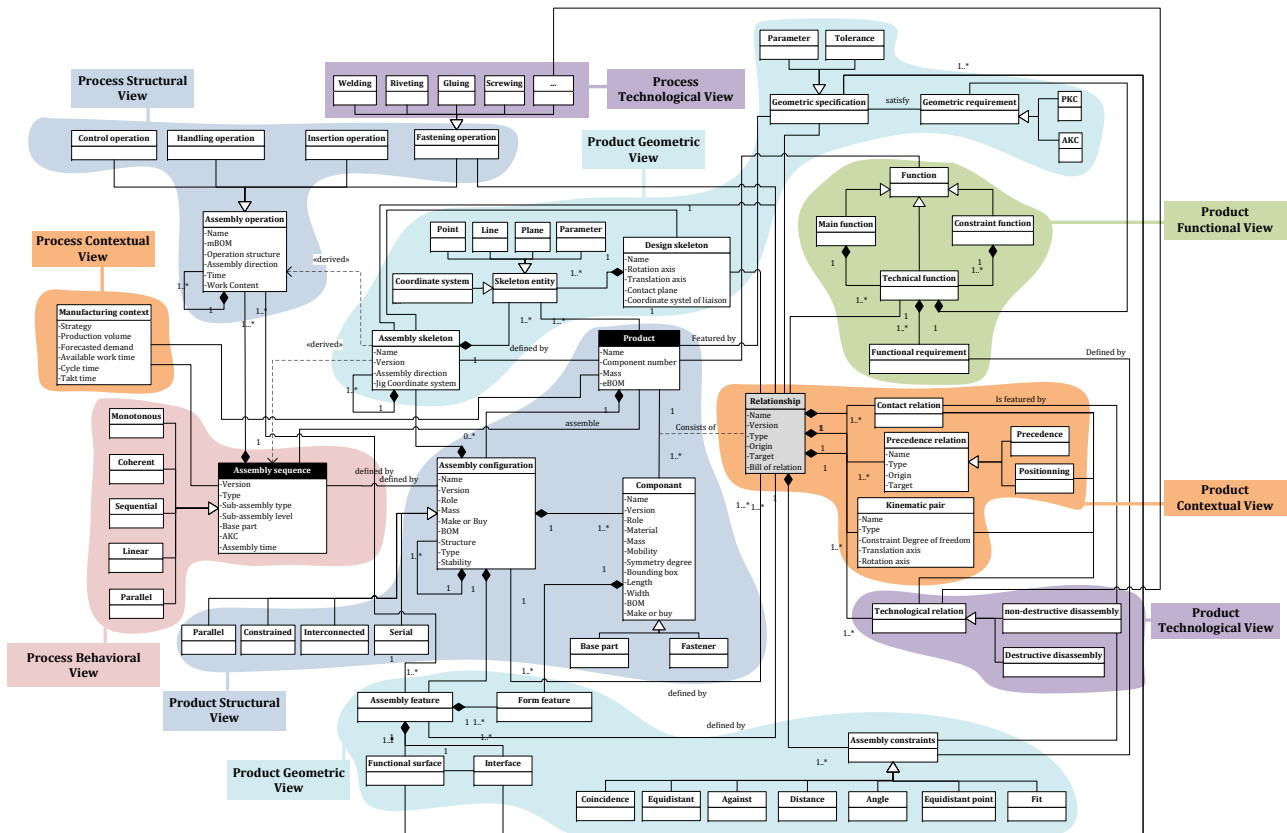


FIGURE 9.9 – Diagramme de classe UML du modèle MUVOA [Demoly et al., 2010].

Tableau 9.4 – Liste des relations utilisées dans l’approche combinée PROMA-MERCURY

Relation	Définition
Contact	Contact physique entre deux pièces.
Précédence	Ordre logique d’assemblage entre deux pièces, étant en contact ou pas.
Modification	Information complémentaire sur la relation intrinsèque, permettant la description spatiotemporelle du changement de taille ou de forme du produit.
MIP liaison cinématique	Information complémentaire sur une relation de contact, permettant la description spatiotemporelle de la Mise en Position (MIP) d’une pièce sur une autre selon le(s) degré(s) de liberté.
MIP liaison technologique	Information additionnelle sur une relation de contact, permettant la description spatiotemporelle de la mise en position d’une pièces sur une autre pour réaliser une fonction.

Dans ce contexte, les relations spatio-temporelles sont définies comme de nouveaux objets techniques liant des relations de composants (objets spatiaux) à des opérations d’assemblage (objets temporels), afin de capitaliser/générer des volumes balayés (objets spatio-temporels) au sein des espaces de conception et augmenter ainsi la sensibilisation des concepteurs. Avec ce type de relation, une liaison de type pivot,

traditionnellement comprise comme étant une relation offrant un degré de rotation entre deux pièces déjà assemblées, sera projetée dans une perspective temporelle via la description de ses différents états pour sa mise en position (MIP).

En conséquence, dès lors que la réconciliation du couple produit-process consiste à relier des entités de l'espace avec des entités du temps, nos objectifs scientifiques au niveau du PLM consisteront à développer une nouvelle approche de gestion d'informations techniques, appelée MERCURY (a ManagEment framework appRoaCh of prodUct and process Relationships in assembly and design phases) [Gruhier *et al.*, 2017] comme une extension à l'approche PROMA (PRoduct relationships Management Approche) déployée pour gérer les entités relationnelles indépendamment du temps [Demoly *et al.*, 2012a]. Pour rendre opérationnel notre concept de *hub incubator*, MERCURY couplée à PROMA, vise à (i) assurer de la flexibilité du couple produit-process en conception préliminaire d'assemblage, (ii) prendre en considération la dynamique induite par l'assemblage et les changement dûs aux itérations de conception lors de la modélisation géométrique des produits pour (iii) sensibiliser les concepteurs avec des informations réconciliées en CAO.

9.4.2 Spectre des nomenclatures du couple produit-process

En considérant cette augmentation dimensionnelle des relations, il devient impératif d'ajouter de la flexibilité dans les structures d'informations parcourant les phases de conception et d'industrialisation : les nomenclatures. Dans ce contexte, la Figure 9.10 présente l'introduction d'une nomenclature des relations (appelée *bill of relations* – BOR), afin de centraliser et de coordonner les objets de l'espace (i.e. composants du produits) avec les objets du temps (i.e. opérations d'assemblage) organisés sous différents angles.

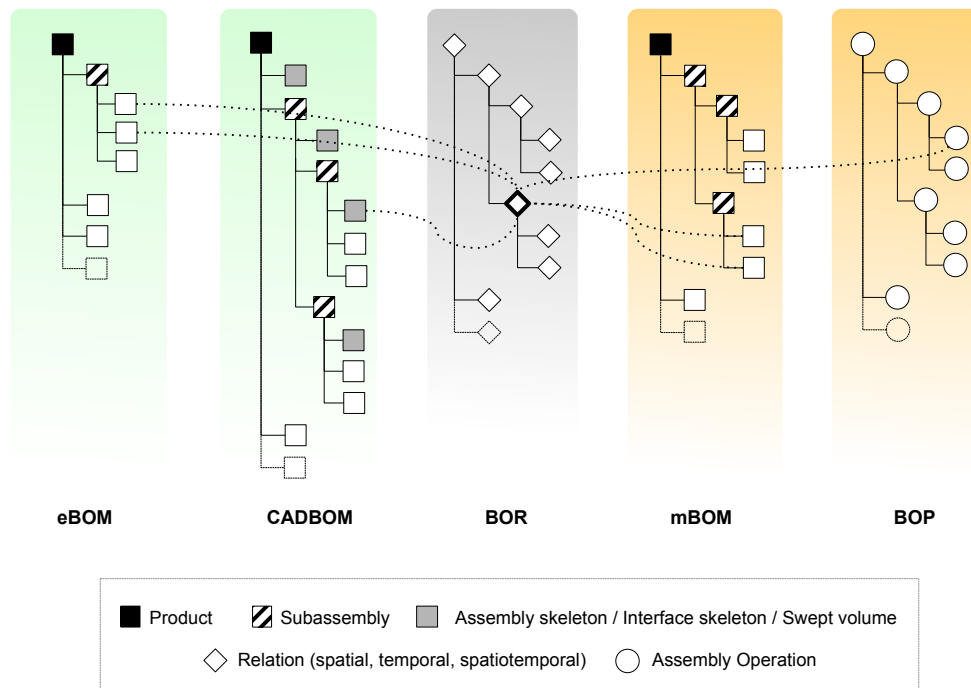


FIGURE 9.10 – Introduction de la BOR comme structure de réconciliation entre les nomenclatures des systèmes PDM, MPM et CAO [Gruhier *et al.*, 2017].

Pour apporter plus de clarté au sein du spectre des nomenclatures, la eBOM représente la nomenclature associée au point de vue des « études », la mBOM est l'image de la eBOM sous le regard des « méthodes », la CADBOM, quand à elle, est la structure implémentée en CAO qui est basée sur la mBOM. En effet,

dans le contexte de la conception proactive pour l'assemblage, la structure produit CAO est construite en fonction d'une séquence d'assemblage structurant la eBOM en mBOM. Enfin la BOP (*bill of processes*) correspond à la structure des opérations déployées pour assembler/fabriquer le produit. Ce spectre de structure nous permet alors de capitaliser différents états du produit qui demandent à être reliés, afin d'être en mesure de capturer l'évolution du produit en début de cycle de vie. Dans ces conditions, la BOR devient un pièce maîtresse pour assurer la réconciliation aux niveaux des structures d'informations réparties au niveau des systèmes PDM, MPM et CAO.

9.4.3 Gestion des flux d'informations techniques

Les gestion des flux d'informations et des structures de données associées fait partie des préoccupations communes dans le domaine PLM. Aujourd'hui la complexité des interrelations entre les composants du produit ainsi que les différentes étapes du processus de développement requiert une décomposition et une orchestration des flux informationnels entre les systèmes [Eckert *et al.*, 2017]. Afin de dépasser les traditionnelles barrières limitées à la réconciliation unidirectionnelle (e.g. de la eBOM vers la mBOM), voire à l'interprétation des caractéristiques géométriques pour un métier en particulier (i.e. pour la fabrication historiquement [Shah *et al.*, 2001; Harik *et al.*, 2008]), nous avons délibérément souhaité augmenter dimensionnellement les relations du produit car étant connectées à la fois aux composants et aux opérations d'assemblage notamment (Figure 3.4). L'extension du modèle MUVOA nous a donc permis d'amorcer une première structuration au niveau des points de vue, qui ont été articulés autour de trois domaines selon la configuration proposé dans le cadre de l'incubateur de conception. Cette configuration – régit par le choix d'une architecture de type *Hub-and-Spoke* [Ren *et al.*, 2007; Meija *et al.*, 2007] – va à l'encontre des implémentations actuelles en industrie des principaux systèmes associés à la stratégie PLM. Généralement, ceux-ci travaillent en binôme via des échanges non-réciproques (i.e. du PDM vers le MPM, de la CAO vers le MPM) [Ciocoiu *et al.*, 2001], et donc fournissent des capacités d'interopérabilité assez faible [Peachavanish *et al.*, 2006].

Sur cette base, la Figure 9.11 (à la page suivante) présente les flux d'informations *inter* et *intra* domaines (produit, process d'assemblage et interface), i.e. les flux parcourant les différentes vues du modèle étendu MUVOA. Notons que trois vues spécifiques (i.e. contextuelle, structurelle et géométrique) ont été introduites dans le domaine « interface ». Celles-ci ont pour objectif de couvrir la BOR, les relations spatio-temporelles ainsi que les entités générées par l'approche SKL-ACD2 et les volumes balayés pour ne citer qu'eux. A titre d'exemple, MERCURY propose de relier la vue contextuelle du produit avec celle du processus d'assemblage via la vue contextuelle du domaine « interface », garantissant ainsi une continuité dans les flux d'informations. Le Tableau 9.5 présente les différentes vues au sein de leur domaine respectif, ainsi que les acteurs et les objets techniques impliqués.

Tableau 9.5 – Lien entre les domaines, vues, acteurs métier et objets techniques

Domain	View	Acteur	Objet technique
Produit	Fonctionnelle	Architecte produit	Fonction technique
	Technologique	Designer	Liaison technologique
	Structurelle	Architecte produit	Configuration produit, eBOM
	Géométrique	Concepteur	Contrainte d'assemblage, géométrie composant
Processus d'assemblage	Contextuelle	Architecte produit	Liaison cinématique, relation de contact
	Behavioural	Gammiste	mBOM et BOP
	Technological	Gammiste	Contrainte de précédence, contexte de production
		Gammiste	Gamme d'assemblage
Interface	Structurelle	Médiateur	Liaison technologique, technologie d'assemblage
	Géométrique	Médiateur	BOR
	Contextuelle	Médiateur	Squelette d'assemblage et d'interface, volume balayé MIP liaison cinématique et technologique & Modification conception (e.g. U-union, croissance and déformation)

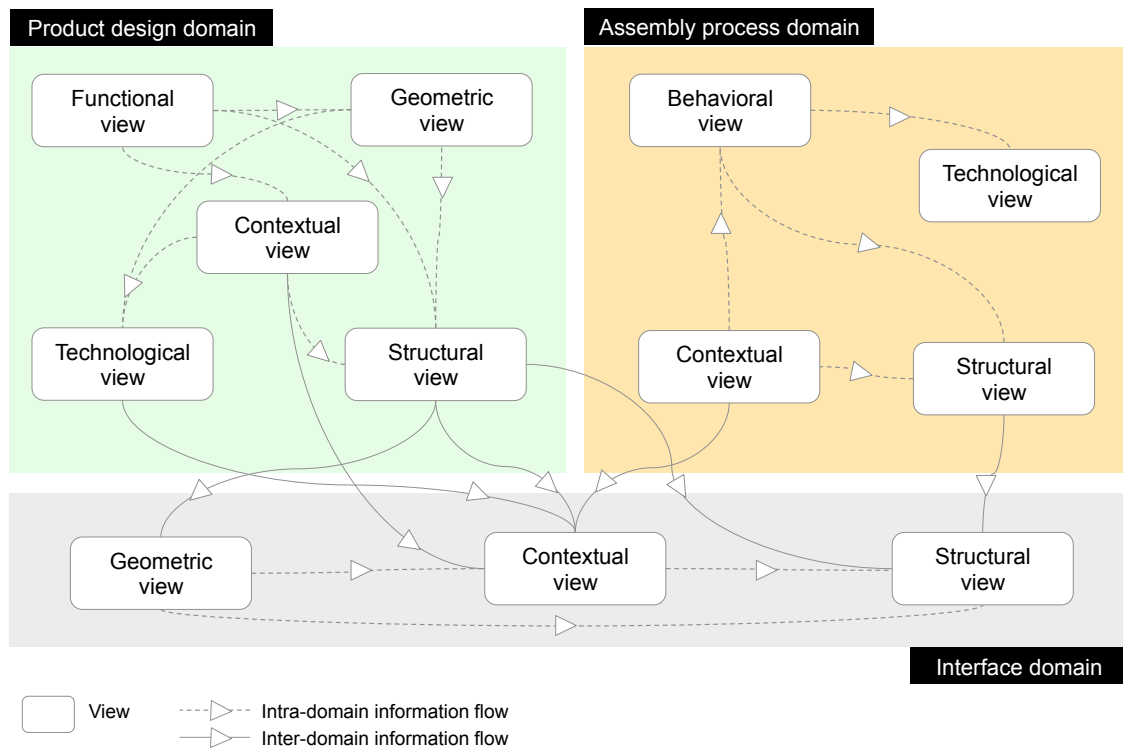


FIGURE 9.11 – Cartographie des vues au sein des trois domaines et des flux d’informations associés [Gruhler *et al.*, 2017].

Le *hub incubator* (Figure 9.1) présente des flèches à double sens avec les systèmes environnants dont les systèmes PDM, MPM, CAO et une ontologie pour garantir une interopérabilité sémantique. Nous verrons, au cours du prochain chapitre, que l’ouverture du *hub incubator* vers une ontologie va nous permettre, une nouvelle fois, d’augmenter notre référentiel par la sémantique et la logique, ce qui constituera un premier levier pour homogénéiser et articuler les informations du couple produit-process et intégrer des connaissances métier. Pour revenir aux interactions du *hub incubator* avec les systèmes mentionnés, nous allons exprimer ci-dessous les échanges d’informations en se basant sur la chronologie présentée à la Figure 9.1, considérant les flèches pleines comme étant des flux sortants (i.e. générés par le *hub incubator*) et les flèches en pointillés comme des flux entrants. La séquence est définie comme suit :

- ① – L’architecte produit définit la eBOM dans le système PDM. Celle-ci est exportée dans le *hub incubator*. À partir de cette structure, des informations relationnelles (i.e. contact, précédence, cinématiques, technologiques, etc.) vont pouvoir être définies pour relier les composants du produit.
- ② – Une fois ces relations définies, le *hub incubator* va alors raisonner pour générer des séquences d’assemblage via l’algorithme ASDA, qui offre des mécanismes de générations de solutions et d’aide à la décision pour la sélection de sous-assemblages sur la base de règles DFA. Le gammiste a alors la possibilité d’interagir avec l’algorithme pour définir la séquence la plus appropriée. La séquence choisie va restructurer la eBOM en mBOM, qui va être envoyée au système MPM.
- ③ – Une fois la mBOM exportée, les opérations d’assemblage sont alors définies d’un point de vue technologique. En ce qui concerne la séquence d’assemblage, les relations opération-opération sont affinées à l’aide de primitives temporelles basées sur les intervalles de Allen (1983). Les informations relationnelles affinées sont ensuite renvoyées vers le *hub incubator*.
- ④ – Si une approche de conception proactive est déployée, alors la eBOM sera construite en fonction de la séquence d’assemblage et mise à jour au sein du système PDM.

- ⑤ – Sur ces premiers échanges, les données structurelles et relationnelles sont instanciées vers l'ontologie. Les informations spatiales, temporelles et spatio-temporelles sont alors automatiquement traitées par des unités de raisonnement assurant cohérence et complétude notamment.
- ⑥ – Les informations spatiotemporelles issues de l'ontologie sont envoyées vers le *hub incubator* afin de générer la BOR en concaténant les relations cinématiques par la prise en compte de la dimension temporelle ainsi que des contraintes d'assemblage.
- ⑦ – Cette étape – définie en grande partie par l'approche SKL-ACD2 – va être complétée par la construction d'un graphe spatio-temporel spécifiant l'évolution de l'assemblage. Cela permet de définir les espaces de conception incluant les volumes balayés en CAO. De cette manière, le concepteur peut prendre pleinement conscience du contexte spatio-temporel pour concevoir ses pièces.
- ⑧ – En fonction de la structure des squelettes d'assemblage, le concepteur peut attribuer des volumes, des formes et des valeurs sur les squelettes. Les informations géométriques relationnelles sont ensuite remontées au *hub incubator*. En outre, le concepteur a la possibilité d'entreprendre des modifications, qui sont gérées en mettant à jour automatiquement la BOR. Les volumes balayés ou les pièces modifiées sont représentés de manière dynamique et les concepteurs peuvent voir directement les impacts des modifications. Si d'autres modifications sont requises, les nouvelles informations sont à nouveau mises à jour. Les modifications sont capturées dans le graphique d'évolution spatio-temporelle de la conception, calculé à partir des modifications répertoriées par le concepteur tout au long du processus de conception. Les modifications peuvent être visualisées et effectuées dynamiquement.
- ⑨ – Une fois que le concepteur a défini toutes les caractéristiques géométriques du produit, les modèles CAO peuvent être rangés, à l'aide des procédures standards de *check-in*, dans le système PDM.

9.4.4 Développement d'une application *hub* : Pegasus

L'application Pegasus – telle que présentée à la Figure 9.12 – a été développée afin de mettre en œuvre l'approche MERCURY comme extension de l'approche PROMA. Initialement développé dans le cadre de mes travaux de thèse pour la définition d'informations relationnelles en conception et la génération de séquences d'assemblage associées, Pegasus a fait l'objet d'évolution au cours de ces dernières années, afin de couvrir les problématiques de réconciliation produit-processus au sein de la chaîne PLM.

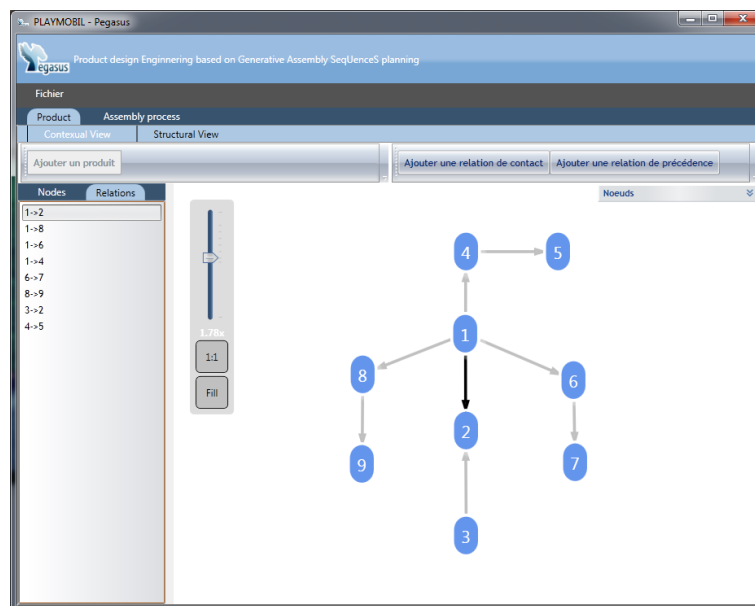


FIGURE 9.12 – Interface de Pegasus dédiée à la définition des relations composant-composant.

Le choix du modèle de développement logiciel s'est porté sur l'architecture logiciel *Model View View-Model* (MVVM), comprenant trois couches d'informations. La couche *Model*, en tant que premier élément, représente le contenu des informations. La couche *View*, considérée comme la couche de présentation, décrit les références à tous les éléments, qui sont affichés par l'interface utilisateur graphique (GUI). Enfin, la couche *ViewModel* représente le lien entre la couche *Model* et la couche *View*, afin de traiter les données via le contexte et donc de lier les propriétés des objets du modèle aux champs de la couche *View*. Ce dernier niveau permet également le contrôle et la propagation des modifications apportées par l'utilisateur à la couche *Model*. De ce point de vue, la couche *ViewModel* contient la logique métier. Ici, les liaisons (*bindings*) permettent les interactions bi-directionnelles des données entre la couche *View* et la couche *ViewModel*. Ainsi la Figure 9.13 présente une vue générale de l'architecture MVVM appliquée aux problématiques de conception proactive pour l'X et de chaîne PLM réconciliée, où les différentes contributions abordées dans ce mémoire (i.e. PASODE/DAMON, PROMA-/MERCURY, MUVOA, etc.) ont été affectées. A noter également l'introduction d'une ontologie, appelée PRONOIA (PROduct relatioNships description based On mereotopologIcal theory), qui fera l'objet d'une description au sein du prochain chapitre, mais dont les problématiques d'intégration sont présentées dans cette section.

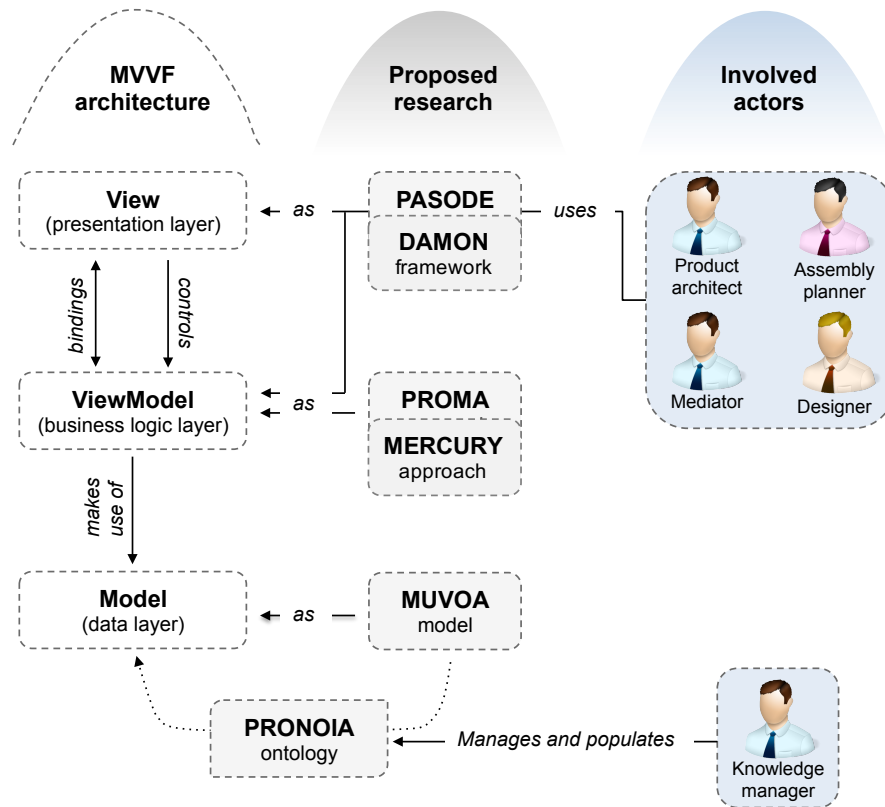


FIGURE 9.13 – Architecture MVVM de Pegasus [Demoly *et al.*, 2013a].

De manière à faciliter l'accessibilité de Pegasus, un service web a donc été spécifiquement développé pour partager les concepts entre les différents acteurs métier. Cette application est donc développée via des standards et des protocoles ouverts, dont la syntaxe basée sur le langage XML (eXtensible Markup Language) pour coder les données et les informations indépendamment des plateformes informatiques. En outre, le protocole SOAP (Simple Object Access Protocol) est considéré comme un protocole de communication permettant la transmission de messages entre entités informatiques. Cependant, ce protocole ne définit pas encore quels messages peuvent être échangés pour obtenir une interaction réussie. Le langage WSDL (Web Service Description Language) est également utilisé pour décrire les opérations proposées.

par le service, les entrées et les sorties. Avec un tel langage, il est alors possible de définir l'emplacement du service et le protocole de communication à utiliser.

Parmi les différentes vues implémentées et les mécanismes de gestion pour assurer la réconciliation du couple produit-process, notons que la Figure 9.1 a introduit Pegasus comme une application pivot pour les systèmes suivants :

- ACSP ((Atelier Coopératif de Suivi de Projet) qui est un système PLM développé au sein du laboratoire [Gomes, 2008] basé sur la technologie web ;
- NOTIXIA qui est une plateforme MPM, permettant la gestion des gammes métier ;
- CATIA V5 qui est utilisé comme application CAO ;
- Protégé qui est considéré comme un éditeur d'ontologie.

Une attention particulière a donc été menée pour assurer les échanges d'informations entre Pegasus et ces systèmes, en particulier entre Pegasus, ACSP et NOTIXIA [Demoly *et al.*, 2013]. En ce qui concerne les interactions entre Pegasus, CATIA V5 et Protégé, nous nous sommes orientés vers l'architecture proposée à la Figure 9.14.

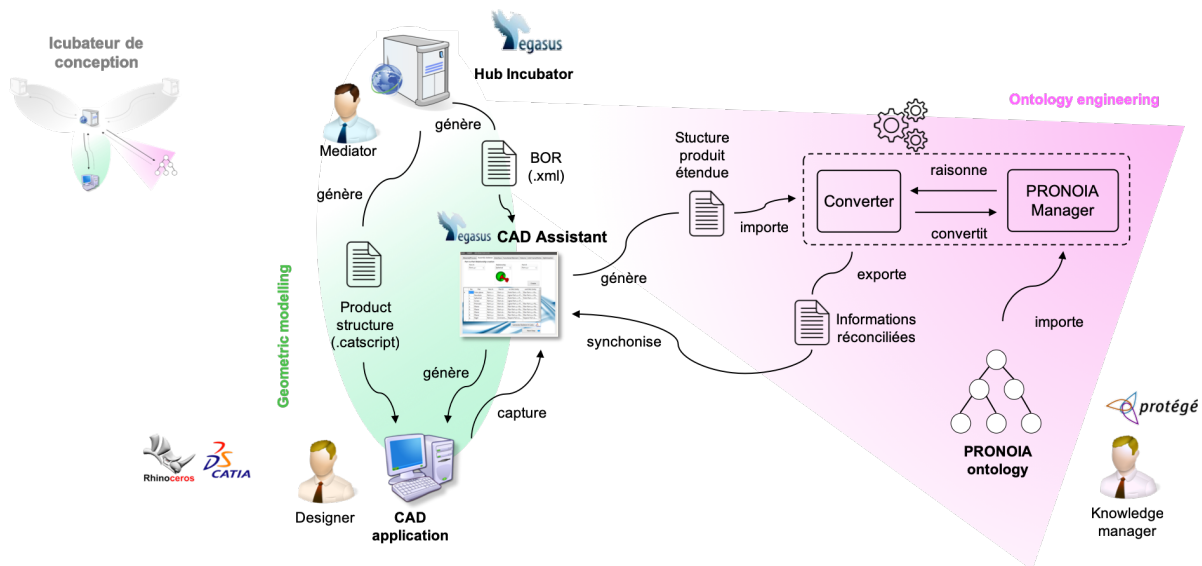


FIGURE 9.14 – Intégration de Pegasus CAD Assistant et du gestionnaire d'ontologie.

L'architecture proposée comprend la gestion d'un flux de données bidirectionnel entre CATIA V5 (via l'application intermédiaire Pegasus CAD Assistant introduite à la Figure 9.8 et l'ontologie PRONOA, ainsi que la création d'un gestionnaire de cette ontologie, également responsable de la gestion de l'inférence à partir des règles logiques [Marconnet, 2017]. Pegasus CAD Assistant étant plus accessible pour recueillir des informations géométriques, nous avons privilégié, en premier lieu, de construire une architecture basée sur l'import et l'export de données à partir celui-ci. L'export de ces informations directement à partir de CATIA V5 est possible mais nécessite de s'intéresser au traitement de formats qui sont soit propriétaires, soit très lourds, car contenant toutes les informations géométriques du produit [Khan *et al.*, 2017]. En conséquence, le flux de données bidirectionnel est défini via deux étapes :

1. Importation des données produit de Pegasus CAD Assistant vers l'ontologie PRONOA. Les données produit doivent être traitées par le gestionnaire de l'ontologie (i.e. PRONOA3 Manager), et transformées dans un format adapté à la population de PRONOA, i.e. à la création d'individus et de relations liés au produit en cours de conception ;
2. Exportation des données produit étendues ou enrichies avec le résultat de l'inférence vers CATIA V5. Il s'agit de l'inverse de la première étape, i.e. de PRONOA3 Manager vers Pegasus CAD Assistant.

Dans ce contexte précis, PRONOA3 Manager a donc deux objectifs : (1) l'ingestion de données issues de la conception, i.e. les informations sur la composition et la structuration du produit par exemple, dans l'ontologie PRONOA. PRONOA3 Manager transforme alors les données reçues et alimente PRONOA avec les données transformées ; (2) le renvoi de données vers Pegasus CAD Assistant, par ajout d'informations structurales et fonctionnelles issues du processus d'inférence dans PRONOA.

9.5 Bilan de l'OP₂

Cette opération de recherche, portant sur la modélisation géométrique avancée et la chaîne PLM réconciliée, a mis en avant des approches opérationnelles permettant de promouvoir la conception proactive pour l'X dans un contexte PLM. Les dimensions sous-jacentes aux niveaux des assemblages et à leur intégration proactive ont nécessité une remise en cause des efforts initialement proposés dans le cadre de mes travaux de thèse [Demoly, 2010]. D'une part, il en résulte une extension des squelettes d'assemblage pour développer davantage les espaces de conception comme support en CAO à : (i) l'intégration de connaissances métier, (ii) la définition géométrique par optimisation topologique (i.e. retrait de matière) voire (iii) à l'introduction d'algorithmes génératifs (i.e. ajout de matière). D'autre part, une évolution des approches PLM a été entreprise et outillée, afin de fluidifier et orchestrer les flux d'informations réconciliées du couple produit-process. La Figure 9.15 rappelle les différentes contributions de l'OP₂ et leurs relations au cours des différentes phases de ma carrière. Il est important de relever que ces changements ont permis d'amorcer une voie primordiale pour fondamentalement couvrir les problématiques de gestion d'informations techniques à dimensions multiples : l'augmentation spatio-temporelle et sémantique des informations relationnelles.

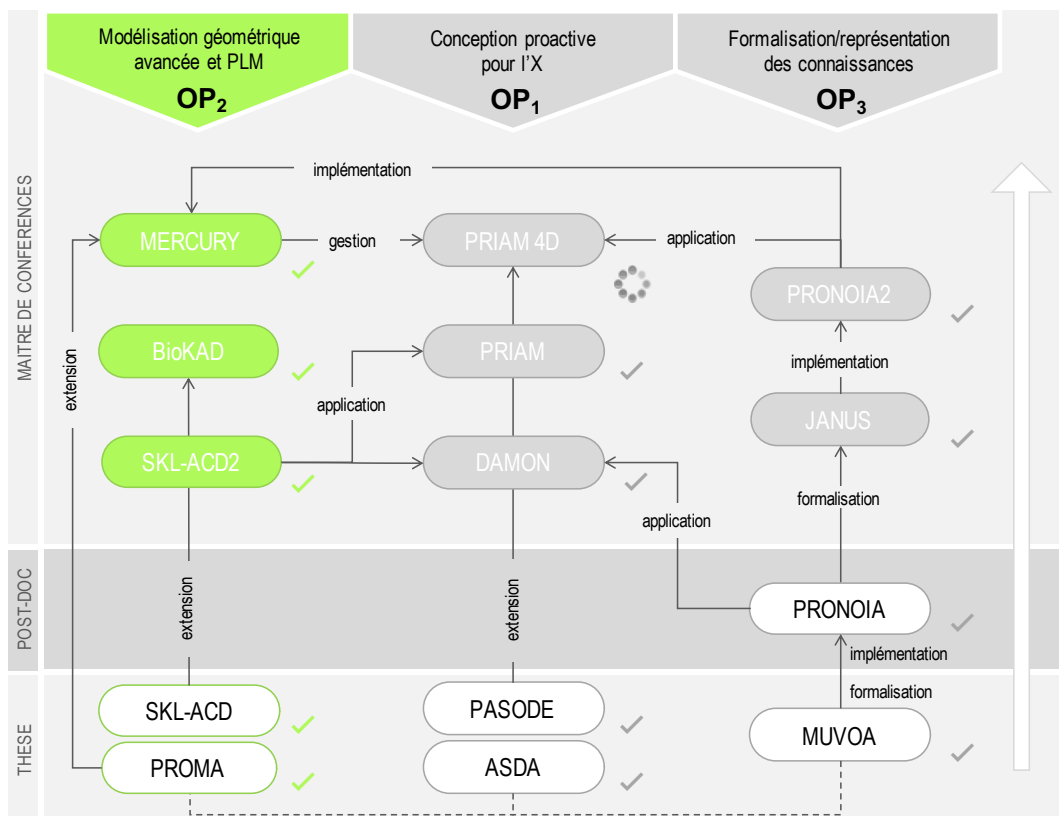


FIGURE 9.15 – Synoptique des contributions scientifiques issues de l'OP₂.

Chapitre 10

Formalisation et représentation des connaissances produit-process (OP₃)

« La réalité est mouvement. Or, la vie est une évolution. Nous concentrons une période de cette évolution en une vue stable que nous appelons une forme, et, quand le changement est devenu assez considérable pour vaincre l'heureuse inertie de notre perception, nous disons que le corps a changé de forme. Mais, en réalité, le corps change de forme à tout instant. Ou plutôt il n'y a pas de forme, puisque la forme est de l'immobile et que la réalité est mouvement. Ce qui est réel, c'est le changement continu de forme : la forme n'est qu'un instantané pris sur une transition. »

[Henri Bergson]

Ce chapitre vise à présenter les efforts menés au sein de l'opération de recherche traitant du domaine de la formalisation / représentation des connaissances du couple produit-process (OP₃).

10.1 Vers une conception éternaliste de l'espace-temps

Les domaines de la conception proactive pour l'X et de la chaîne numérique intégrée ont fait émerger des besoins quant à l'augmentation spatio-temporelle et sémantique/logique des informations et des connaissances du couple produit-process. La considération des métiers, comme ceux de l'assemblage et de la fabrication additive, nous amène dorénavant à coupler des objets temporels et des objets spatiaux. Ceci est encore plus que nécessaire lorsque l'on adresse les problématiques d'impression 4D via l'usage des matériaux intelligents. La dynamique induite – lors de la définition des modèles numériques – rend alors nos modèles de conception obsolètes ou, du moins, pas assez proches de la réalité, de part le monde tridimensionnel statique appréhendé jusqu'à présent en conception [ISO 159262, 2003]. Dans ce cas présent, il devient indispensable de dépasser les paradigmes utilisés pour décrire les objets – notamment leur nature et leurs évolutions – afin d'amorcer de nouvelles visions pour l'ingénierie du futur.

Pour répondre aux enjeux, d'ordre général, liés à la compétitivité industrielle, les chercheurs se sont toujours inspirés de la nature et des phénomènes associés, de théories mathématiques, d'essais philosophiques, de sciences cognitives voire de techniques utilisées en médecine et biologie, etc. Nous proposons ici de procéder de la même façon, avec l'objectif d'aligner les modèles à la réalité ou, du moins, à des positions philosophiques permettant de s'en rapprocher. Cette remise en cause doit notamment passer par les questions métaphysiques et ontologiques concernant les objets matériel et leur nature [Loux & Crisp, 2017]. En tant que point de vue philosophique, la conception éternaliste (i.e. les temps passé et futur coexistent au temps présent) de l'espace-temps postule que la seule manière d'exister dans le temps est celle qui consiste à perdurer, i.e. où tous les objets de l'univers sont des processus ou des

événements [Lewis, 1986 ; Savitt, 2006 ; Petersen, 2012]. Cette vision nous invite à étudier davantage une position connexe prometteuse : le perdurantisme (*four-dimensionalism*), opposé à l'endurantisme (*three-dimensionalism*), sur lequel un objet a des parties temporelles distinctes tout au long de son existence, et donc conserve la même identité quels que soient les changements subis [Sider, 2001 ; McKinnon, 2002]. De cette position, le temps est – d'un point de vue mathématique – une dimension qui s'ajoute aux trois dimensions de l'espace géométrique. Un objet matériel peut alors être défini comme une suite d'événements spatio-temporels [Lewis, 2007]. Cette orientation philosophique va nous permettre de développer des descriptions spatio-temporelles pour les informations techniques et connaissances du couple produit-process, où les capacités cognitives des concepteurs pourront être davantage étendues. Le fait d'élever un raisonnement à l'échelle spatio-temporelle permet d'imaginer un modèle spatial tout en comprenant comment les éléments peuvent s'insérer dans cet espace, et donc améliorer grandement la compréhension des acteurs métier.

Les enjeux – engendrés par les résultats scientifiques mentionnés dans les chapitres précédents – vont de pair avec la prolifération des technologies sémantiques pour décrire les connaissances métier de manière qualitative et interprétable par des systèmes [Kusiak & Salustri, 2007 ; El Kadiri *et al.*, 2016]. On peut notamment constater que les efforts scientifiques se sont orientés vers les approches à base de connaissances et notamment les ontologies, qui classifient / décrivent formellement et explicitement des concepts dans un domaine spécifique [Batsakis & Petrakis, 2011], via l'utilisation d'axiomes, de définitions et de théorèmes [Guarino, 1995 ; Bittner *et al.*, 2006]. Leur construction peut alors être conduite de deux manières : soit partir d'un domaine pour en extraire un réseau sémantique (*bottom-up*), ou alors partir d'une théorie liée à un point de vue métaphysique (*top-down*) [Fernandez *et al.*, 1997]. Nous soutenons qu'une démarche hybride – liant ontologie de domaine et ontologie fondationnelle – est pertinente pour décrire des relations spatio-temporelles en ingénierie. En effet, le fait de décrire les connaissances de manière qualitative va demander, d'une part, une attention particulière pour élaborer une fondation logique partant d'un haut niveau d'abstraction pour englober plusieurs domaines métier, et d'autre part, va permettre de constituer des contextes qualitatifs propices à la phase de conception préliminaire (voir Figure 3.2 introduite au Chapitre 3) [Salustri, 2002]. En résumé, nos efforts visent à (i) élaborer une théorie – cohérente vis-à-vis de la position perdurantiste sur les objets qui nous entourent – pour (ii) structurer des ontologies et ainsi (iii) dériver des modèles supports à l'ingénierie proactive du couple produit-process.

10.2 Théorie basée sur la méréotopologie spatio-temporelle

Les enjeux, abordés ci-dessus, ont permis d'amorcer une réflexion (i.e. le perdurantisme) et d'orienter la manière nous devons appréhender les objets qui nous entourent. L'objectif principal est alors de formaliser les connaissances produit-process – plus particulièrement les relations du produit – en utilisant les mathématiques, afin d'établir une théorie et un formalisme capables de structurer la description d'entités spatio-temporelles en conception. De ce fait, nous proposons de considérer ci-après la théorie mathématique et philosophique traitant de la partie et du tout (*parthood*) supportée par la méréologie [Leśniewski, 1929] et son extension avec la topologie : la méréotopologie [Smith, 1996].

10.2.1 Base de la méréotopologie spatio-temporelle

La méréotopologie peut être considérée comme une théorie dérivée de la méréologie, qui est la théorie de la relation de la partie et du tout [Leśniewski, 1929]. La méréologie permet de décrire formellement la relation « *est une partie de* », comme primitive réflexive, antisymétrique et transitive. Une extension de cette théorie mathématique vers la topologie (*pointless topology*) [Johnstone, 1983] – faisant intervenir la relation « *est connecté à* » – est apportée par la méréotopologie. Cette dernière – utilisant la logique de premier ordre (*first order logic*) – permet de décrire de manière formelle des connexions entre entités telles que les régions spatiales [Asher & Vieu, 1995 ; Varzi, 1996 ; Borgo *et al.*, 1996]. En effet, au lieu de se concentrer sur la théorie des ensembles, les pratiques en conception et en CAO ont mis l'accent sur la nécessité de travailler avec une théorie basée sur les régions en considérant le produit tel qu'il peut être perçu dans le monde réel [Salustri, 2002]. Ceci présente donc une alternative à la topologie générale (*point-set topology*) liée à la théorie des ensembles pour apporter un niveau d'abstraction plus adéquat

et intuitif vis-à-vis de l'interprétation des relations spatiales.

Pour l'ensemble de ces raisons, nous avons décidé de bâtir notre propre théorie basée sur les régions (i.e. spatiales, temporelles et spatio-temporelles). Dans un premier temps, les primitives méréotopologiques définies par [Smith, 1996], telles que représentées à la Figure 10.1 ci-dessous, ont été utilisées. Chaque primitive est écrite avec une majuscule en gras située entre deux entités, comme suit $x\mathbf{R}y$, où \mathbf{R} décrit une relation particulière entre deux entités et où les variables x, y, z , etc. sont placées sur des entités (i.e. régions spatiales). Le Tableau 10.1 ci-après présente les opérateurs et les symboles utilisés pour la description des primitives méréotopologiques.

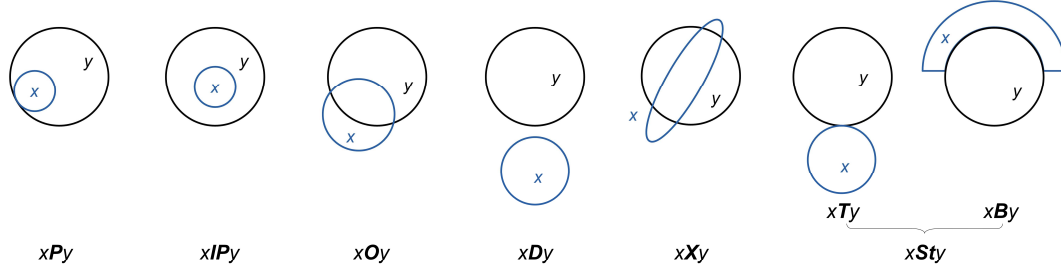


FIGURE 10.1 – Représentation des primitives méréotopologiques spatiales [Demoly *et al.*, 2012].

Tableau 10.1 – Opérateurs fondamentaux de la méréotopologie [Smith, 1996 ; Demoly *et al.*, 2012]

Symbole	Nom	Symbole	Nom
\wedge	Logical conjunction	\vee	Logical Disjonction
$:=$	Definition	\rightarrow	Logical implication
\exists	Existential quantifier	\neg	Logical negation
\forall	Universal quantifier	\emptyset	Empty region
\mathbf{A}	Overall assembly	ϕ	Condition
σ	Sum (fusion or join)	\equiv	Equivalence
ι	Definite descriptor	1	Universe

Tableau 10.2 – Description des primitives méréotopologiques spatiales [Demoly *et al.*, 2012]

Primitive	Description méréotopologique
x is a part of y	$x\mathbf{P}y := \forall z(z\mathbf{O}x \rightarrow z\mathbf{O}y)$
x is an interior part of y	$x\mathbf{I}P y := x\mathbf{P}y \wedge \neg x\mathbf{T}y$
x overlaps y	$x\mathbf{O}y := \exists z(z\mathbf{P}x \wedge z\mathbf{P}y)$
x is discrete from y	$x\mathbf{D}y := \neg x\mathbf{O}y$
x crosses y	$x\mathbf{X}y := \neg x\mathbf{P}y \wedge \neg x\mathbf{D}y$ For $y \neq 1$, $x\mathbf{X}y := x\mathbf{O}y \wedge x\mathbf{O}(1 - y)$
x is a tangent of y	$x\mathbf{T}y := \exists z(z\mathbf{P}x \wedge z\mathbf{B}y)$
x is a boundary of y	$x\mathbf{B}y := \forall z(z\mathbf{P}x \rightarrow z\mathbf{S}t y)$
x straddles y	$x\mathbf{S}t y := \forall z(x\mathbf{I}P z \rightarrow z\mathbf{X}y)$
<i>Sum of ϕs</i>	$\sigma x(\phi x) := \iota y(\forall w(w\mathbf{O}y \equiv \exists v(\phi v \wedge w\mathbf{O}v)))$

En premier lieu, la méréologie permet de décrire la relation de la partie et du tout, où $x\mathbf{P}y$ signifie que x est une partie de y avec \mathbf{P} comme prédicat. Sur la base de cette primitive, d'autres primitives peuvent alors être dérivées. Ainsi, la première notion méréologique dérivée est que x overlaps y , notée $x\mathbf{O}y$, où z

peut être une partie quelconque de x et de y . La seconde primitive concerne x is discrete from y , notée $x\mathbf{D}y$, pour expliquer que x does not overlap y . Les primitives méreotopologiques peuvent être introduites en considérant des instruments topologiques avec les primitives méreologiques décrites précédemment. Soit alors $x\mathbf{I}P_y$, une primitive méreotopologique dérivée de \mathbf{P} pour décrire que x is an interior part of y . A ceci s'ajoute une autre primitive pour définir que x crosses y , notée $x\mathbf{X}y$. Cette primitive signifie que x is neither a part of nor discrete from y , voire également que x overlaps both y and its complement (1 étant associé à l'univers dans ce contexte). Enfin la primitive x straddles y , notée $x\mathbf{S}y$, représente soit une tangence soit une frontière. Cela conduit naturellement vers l'introduction de la primitive frontière $x\mathbf{B}y$ (pour exprimer x is a boundary of y) et de la primitive tangente, notée $x\mathbf{T}y$ (signifiant que x is a tangent of y). Une description plus détaillée des primitives méreotopologiques et des axiomes associés a été réalisée par [Smith, 1996].

Afin d'être en adéquation avec la position philosophique du perdurantisme, nous avons également pris en considération l'aspect temporel pour décrire les différents états d'un objet sujet à des phénomènes. Ces derniers sont définis par des relations temporelles et des objets temporels. Dans notre contexte, un objet temporel est considéré comme une région temporelle, pouvant être un intervalle ou un instant [Sider, 2001]. Le Tableau 10.3, présenté à la page suivante, illustre les primitives temporelles entre deux intervalles (troisième colonne), entre un intervalle et un instant (quatrième colonne) et entre deux instants (cinquième colonne). La description proposée est fortement inspirée des intervalles de [Allen, 1983], qui a formalisé les relations topologiques entre les intervalles temporels. Ici, a , b et c sont les variables affectées aux régions temporelles. Comme les dimensions des régions et des primitives spatiales diffèrent de celles décrites présentement, d'autres caractères ont alors été introduits pour exprimer les primitives méreotopologiques temporelles et lever ainsi toute ambiguïté. Ces dernières sont inspirées des primitives spatiales et adaptées pour représenter chaque phénomène temporel pouvant être identifié au cours d'un processus.

10.2.2 Description générale de JANUS

A partir de cette collection de systèmes formels axiomatiques, une théorie – appelée JANUS (*Joined AwareNess and Understanding in assembly oriented deSign with mereotopology*) – a été développée, afin de couvrir les besoins en formalisation et en représentation des connaissances du couple produit-processus d'assemblage [Gruhier et al., 2016]. A cet effet, la Figure 10.2 ci-dessous présente le cadre général de la théorie via la superposition d'une couche de sémantique et de logique sur des informations techniques associées à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage. Il en résulte une émergence d'objets et de primitives à considérer dans chaque domaine respectif, y compris à leur interface.

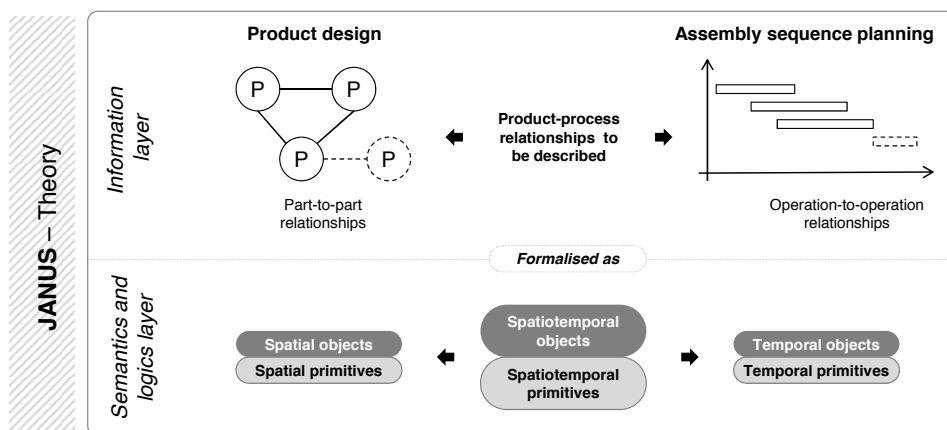


FIGURE 10.2 – Théorie JANUS – Couche sémantique et logique en conception proactive pour l'assemblage.

Plus particulièrement, les enjeux scientifiques consistent à assurer à la fois une intégration et une continuité entre ces deux domaines. La formalisation des relations va donc demander d'introduire des

Tableau 10.3 – Description des primitives méréotopologiques temporelles [Gruhier *et al.*, 2016].

Primitive temporelle	Description méréotopologique	Représentation intervalle/intervalle	Représentation intervalle/instant	Représentation instant/instant
b is a temporally part of a	$b\mathbf{P}ta := \forall c(c\mathbf{O}tb \rightarrow c\mathbf{P}ta)$	$\frac{b \text{ } a}{}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$
b is a start temporally part of a	$b\mathbf{P}tsa := \exists c(b\mathbf{P}ta \wedge c\mathbf{T}tb \wedge c\mathbf{t}pa)$	$\frac{b \text{ } a}{}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$
b is a finish temporally part of a	$b\mathbf{P}tfa := \exists c(b\mathbf{P}ta \wedge b\mathbf{T}tc \wedge a\mathbf{t}pc)$	$\frac{b \text{ } a}{}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$
b is a temporally interior part of a	$b\mathbf{I}Pta := b\mathbf{P}ta \wedge \neg b\mathbf{P}tsa \vee \neg b\mathbf{P}tfa$	$\frac{b \text{ } a}{}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$
b temporally overlaps a	$b\mathbf{O}ta := \exists c(c\mathbf{P}tb \wedge c\mathbf{P}ta)$	$\frac{b \text{ } a}{}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$
a temporally precedes b	$a\mathbf{t}pb := \exists c(a\mathbf{T}tc \wedge b\mathbf{P}tc)$	$\frac{a \text{ } b}{}$	$\frac{a \text{ } \bullet}{b \text{ } \bullet}$	$\frac{a \text{ } \bullet}{b \text{ } \bullet}$
b is temporally tangent of a	$b\mathbf{T}ta := \exists c(c\mathbf{P}tsa \wedge c\mathbf{B}tb)$	$\frac{b \text{ } a}{}$	$\frac{b \text{ } \bullet}{a \text{ } \bullet}$	$\frac{ab \text{ } \bullet}{\infty}$
b is temporally equal to a	$b\mathbf{t}ea := b\mathbf{I}Pta \wedge a\mathbf{I}Ptb$	$\frac{a \text{ } b}{}$	$\frac{a \text{ } \bullet}{b \text{ } \bullet}$	$\frac{a \text{ } \bullet}{b \text{ } \bullet}$

objets spatio-temporels (i.e. volumes balayés) et des relations spatio-temporelles, capitalisant ainsi la trajectoire sémantique des objets au cours du temps [Harbelot et al., 2015]. Nous adresserons notamment deux temporalités distinctes liées à (i) la séquence d’assemblage des composants, et également (ii) aux diverses modifications/actions effectuées sur les informations du produit durant le processus de conception. Ces problématiques de capitalisation de connaissances évoluant au fil de l’eau ont également fait l’objet d’une norme – intitulée ISO 15926 (*Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas facilities*) – pour le compte de l’industrie pétrolière [ISO 15926-2]. Cette norme est notamment structurée autour de quatre dimensions [Stell & West, 2004], ce qui signifie que l’objet peut être étendu à la fois dans l’espace et le temps [Batres et al. 2007]. L’objet est alors considéré comme perdurant dans le temps et est défini en fonction de ses relations avec les autres. Dans le contexte de conception proactive pour l’X, il convient de pouvoir capitaliser l’évolution des objets au cours de leur cycle de vie, et également leurs évolutions durant les phases de conception. Ces deux aspects seront abordés en utilisant la méréotopologie. Les sections ci-après vont donc aborder les différentes dimensions couvertes par JANUS.

10.2.3 Représentation qualitative de l’espace et du temps

L’objectif, au niveau de la dimension spatiale, est de décrire les relations composant-composant au sein d’un produit. Pour ce faire, JANUS va exploiter les primitives méréotopologiques introduites par le Tableau 10.2, et décrire la nature des contacts physiques entre les composants du produit, considérés ici comme objets de l’espace. Tout au long de ce mémoire, les relations du produit ont été considérées comme un fil conducteur, ceci est d’autant plus vrai dans le contexte de la conception proactive pour l’assemblage. Rappelons que ces mêmes informations ont déjà été associées et représentées par des squelettes géométriques, afin de contrôler les espaces de conception de manière centralisée [Demoly et al., 2011; Demoly et al., 2019]. JANUS doit donc permettre de formaliser ces connaissances et leurs associations. Pour ce faire, la condition méréotopologique ϕ est introduite [Smith, 1996]. Celle-ci – associée à une unique variable x – est satisfaite si et seulement si l’argument ϕx est vrai pour au moins une valeur de x [Kim et al., 2008]. En conséquence la somme des ϕ s peut être définie comme : la variable y qui est telle que, quelque soit w , $w\mathbf{O}y$ si et seulement si w **overlaps** avec une variable portant cette condition, telle que notée : $\sigma x(\phi x) := \iota y(\forall w(w\mathbf{O}y \equiv \exists v(\phi v \wedge w\mathbf{O}v)))$. Sur la base de cette hypothèse, il est alors possible d’introduire deux entités (voir Figure 10.3), sur lesquelles la géométrie des pièces peut être définie :

- le *Squelette d’assemblage* – assurant le positionnement des composants au sein du produit – est représenté par k (e.g. droite représentant un axe de rotation voire de translation sur la Figure 10.3(a)) :
 $k := \sigma z(\phi z) \rightarrow \forall z(\phi z \rightarrow (z\mathbf{T}x \wedge z\mathbf{T}y) \wedge (z\mathbf{P}x \wedge z\mathbf{P}y))$
- le *Squelette d’interface* – s’appuyant sur un squelette d’assemblage et décrivant une géométrie frontière utilisée pour construire une surface fonctionnelle – est représenté par f (voir Figure 10.3(b)) :
 $f := \sigma z(\phi z) \rightarrow \forall z(\phi z \rightarrow z\mathbf{B}x \wedge z\mathbf{B}y)$

L’entité k a été introduite pour compléter la définition des relations cinématiques entre les composants du produit. L’entité f , initialement introduite par [Kim et al., 2008] pour la définition des liaisons technologiques d’assemblage, a été réutilisée dans JANUS. En conséquence, le Tableau 10.4 présente les descriptions méréotopologiques pour les relations cinématiques, telles qu’énumérées dans le Tableau 9.2.

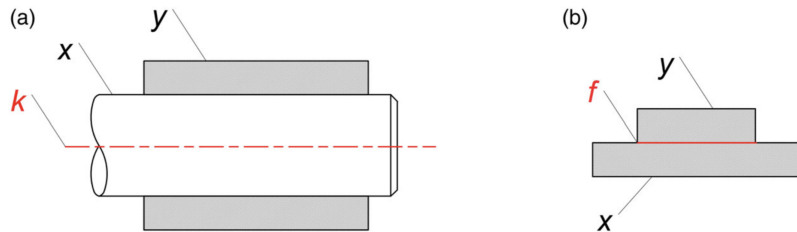


FIGURE 10.3 – Représentation géométrique des squelettes d’assemblage k (a) et d’interface f (b) [Demoly et al., 2012].

Tableau 10.4 – Descriptions méréotopologiques associées aux liaisons cinématiques [Demoly et al., 2012]

Liaison cinématique	Description méréotopologique	Commentaire
Rigid	$x\mathbf{K}_{\text{rig}y} := \exists x, y \{ (x\mathbf{X}y \wedge x\mathbf{T}y) \wedge (x\mathbf{O}k \wedge y\mathbf{O}k) \}$	k is a point
Revolute	$x\mathbf{K}_{\text{rev}y} := \exists x, y \{ (x\mathbf{X}y \wedge x\mathbf{T}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1 \wedge y\mathbf{O}k_1) \wedge (x\mathbf{T}k_2 \wedge y\mathbf{T}k_2) \}$	k_1 is a line, k_2 is a plane
Prismatic	$x\mathbf{K}_{\text{pri}y} := \exists x, y \{ x\mathbf{X}y \wedge (x\mathbf{O}k \wedge y\mathbf{O}k) \}$	k is a line
Screw	$x\mathbf{K}_{\text{scr}y} := \exists x, y \{ (x\mathbf{X}y \wedge x\mathbf{T}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1 \wedge y\mathbf{O}k_1) \wedge (x\mathbf{T}k_2 \wedge y\mathbf{T}k_2) \}$	k_1 is a line, k_2 is a plane
Cylindrical	$x\mathbf{K}_{\text{cyl}y} := \exists x, y \{ x\mathbf{X}y \wedge (x\mathbf{O}k \wedge y\mathbf{O}k) \}$	k is a line
Spherical	$x\mathbf{K}_{\text{sph}y} := \exists x, y \{ (x\mathbf{S}t y \wedge x\mathbf{I}B y) \wedge (x\mathbf{O}k \wedge y\mathbf{O}k) \}$	k is a point
Planar	$x\mathbf{K}_{\text{pla}y} := \exists x, y \{ x\mathbf{T}y \wedge (x\mathbf{T}k \wedge y\mathbf{T}k) \}$	k is a plane
Point-contact	$x\mathbf{K}_{\text{pt}y} := \exists x, y \{ x\mathbf{T}y \wedge (x\mathbf{T}k \wedge y\mathbf{T}k) \}$	k is a point
Line-contact	$x\mathbf{K}_{\text{lin}y} := \exists x, y \{ x\mathbf{T}y \wedge (x\mathbf{T}k \wedge y\mathbf{T}k) \}$	k is a line
Curve-contact	$x\mathbf{K}_{\text{cur}y} := \exists x, y \{ x\mathbf{B}y \wedge (x\mathbf{B}k \wedge y\mathbf{B}k) \}$	k is a curve

A noter toutefois que dans le cas d'un même assemblage, les squelettes d'assemblage et d'interface, qui auront été identifiés et générés, seront décrits de la manière suivante : k_1 , k_2 ou f_1 , f_2 , etc. Il convient de remarquer à ce niveau d'abstraction, que les primitives méréotopologiques fournissent un moyen de description puissant pour être compréhensible et interprétable par des moteurs d'inférences par exemple. L'alignement avec la position du perdurantisme requiert également de considérer l'aspect temporel associé au domaine du processus d'assemblage. En effet, la gamme d'assemblage, de part ses opérations, offre l'opportunité de décrire le produit à travers un scénario composé de plusieurs objets temporels de différentes tailles [Hadjieleftheriou et al. 2002]. Dans JANUS, chaque objet temporel est considéré comme une région temporelle (notée TR – *Temporal Region*). La création des régions temporelles va donc être fortement liée à l'agrégation des régions spatiales voire à des changements sur des régions spatiales. Deux types de temporalité pourront être couvertes, à savoir la temporalité de l'objet lui-même via son évolution géométrique et la temporalité de l'objet par rapport aux autres au sein d'un assemblage. La chronologie relative entre les opérations d'assemblage implique une discrétisation du temps [Renolen, 1999], et peut être capturée à l'aide de relations temporelles [Rodier et al., 2010].

Tableau 10.5 – Types d'assemblage basés sur trois pièces [Demoly et al., 2011].

Type d'assemblage	Série interconnecté	Série	Parallèle	Contraint
Graphe orienté				
Exemple				

Le Tableau 10.3, introduit précédemment, permet de décrire toutes les configurations possibles entre les régions temporelles. Les primitives temporelles sont, quant à elles, inspirées des primitives spatiales et adaptées pour représenter chaque phénomène temporel pouvant être identifié au cours d'un processus d'assemblage. Pour ce faire, le Tableau 10.5 présente les types d'assemblage à considérer. Dans ce contexte, nous pouvons constater que seulement deux primitives temporelles peuvent être exploitées – notamment

temporally precedes (notée **tp**) et *is temporally tangent of* (notée **Tt**) –, afin de décrire les différentes contraintes de précédence en conception. Les autres primitives temporelles pourront être utilisées pour décrire des opérations technologiques qui demandent davantage de détails.

10.2.4 Description spatio-temporelle

La description du produit en conception – à travers les dimensions spatiale et temporelle – nécessite une dimension supplémentaire, la dimension spatio-temporelle. Celle-ci va permettre d'introduire des objets spatio-temporels, tels que les volumes balayés générés à partir de déformations, de modifications voire de transformations. Un volume balayé, en tant que région spatio-temporelle, correspond à une région spatiale occupée par un objet pendant une durée spécifique. Dans ce contexte, le volume balayé permet de faire coexister le passé avec le présent en conception. Par contre, il est important de noter que cette dimension n'accueille pas les squelettes géométriques (introduits au chapitre précédent) car ils ne possèdent pas de partie spatio-temporelle. En effet, les régions spatio-temporelles sont constituées de composants spatiaux et temporels [Bittner *et al.*, 2006]. Il en résulte que cette dimension est déterminante pour relier les objets de l'espace et du temps, mais également critique car elle reste difficile à appréhender pour l'Homme, notamment au niveau de la visualisation. Par exemple, lors d'une séquence d'assemblage, si un roulement est manipulé pour être mis en position sur un arbre, le concepteur ne pourra pas visualiser la partie spatio-temporelle générée. Ce constat est fondé sur le fait que l'Homme ne peut pas penser en termes d'évolution continue [Bergson, 1923]. Pour assurer l'adoption de la part des acteurs métier concernés par ses questions, la dimension spatio-temporelle proposée par JANUS sera construite de manière discrète sur le plan temporel.

Relation de filiation

Avant de pouvoir introduire des régions et des primitives spatio-temporelles, il est important de d'avoir une vision claire sur l'identité des objets en cours d'évolution [Hallo, 2012]. Cela se traduit notamment par la nécessité d'aborder les relations de filiation [Del Mondo *et al.*, 2010]. Parmi les philosophes qui ont initié l'étude de cette notion, nous pouvons citer Plutarque avec son expérience de pensée via le bateau de Thésée [Plutarque, 1853], ou encore Descartes, qui avait notamment réalisé l'expérience avec un morceau de cire (changement d'états) soumis à différents environnements [Descartes, 1647]. Ces réflexions philosophiques ont permis d'ouvrir la discussion sur ces questions et également de définir des limites à l'identité dans le mouvement perpétuel. Sur cette base, on peut constater que les propriétés d'un objet changent dès que celui-ci est modifié mais ne changent pas l'objet lui-même. La relation de filiation joue alors un rôle de dépendance transmis du parent (i.e. produit assemblé) à l'enfant (i.e. pièce). Elle permet donc l'identification de chaque objet et leur unicité [Del Mondo *et al.*, 2010]. Pour ce faire, deux types de relations de filiation sont exploitées : (i) la relation de *continuation* pour exprimer un maintien de l'identité d'un objet entre deux régions temporelles, et (ii) la relation de *dérivation* pour informer qu'une partie de l'identité de l'objet original est présente dans l'objet modifié entre deux régions temporelles.

Primitives spatio-temporelles : évolutions en conception et assemblage des liaisons

Les changements réalisés en cours de conception permettent de faire émerger la géométrie finale du produit. Le chapitre précédent a mis en évidence l'approche SKL-ACD2 dédiée à la construction progressive des espaces de conception. La chronologie de définition de ces espaces s'avère utile, afin d'avoir une parfaite compréhension des intentions de conception qui ont permis d'aboutir à une solution finale. Cette métamorphose numérique – partant d'un modèle squelettique jusqu'à la définition de la forme – doit pouvoir être interprétée au-delà du fait de comparer les différentes versions des documents ou d'étudier les commentaires pouvant être faits lors des révisions. A ce jour, il n'existe pas de moyen formel et sémantique permettant de retracer l'évolution des intentions en conception au sein de la maquette numérique, ce qui se traduit par des problèmes d'incompréhension notamment. Dès lors, il convient de considérer la nature spatio-temporelle des changements/modifications et leur mise en relation, afin de capturer le sens embarqué dans l'activité de conception. Ainsi, les primitives spatio-temporelles expriment le changement

à travers l'espace et le temps [Haddad, 2009], et offrent ainsi des moyens efficaces pour visualiser les intentions de conception et d'assemblage [McKinney *et al.*, 1996]. sur cette base, la Figure 10.4 présente une cartographie des évolutions induites et permises en conception et donc des primitives spatio-temporelles à décrire formellement.

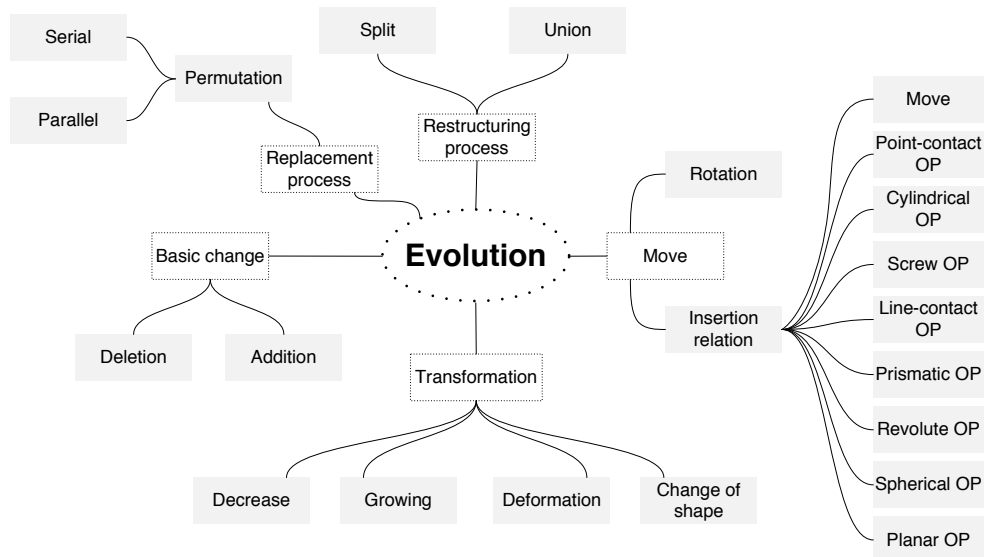


FIGURE 10.4 – Cartographie des évolutions en conception [Gruhier *et al.*, 2016].

Ceci rejoint ce que nous avons introduit à la section 10.2.3, à savoir que les liaisons cinématiques pouvaient être décrites par des primitives méréotopologiques. Les descriptions fournies par le Tableau 10.4 présentent donc les liaisons déjà assemblées, i.e. que ces descriptions ne permettent pas de comprendre comment les liaisons cinématiques ont été établies au cours du temps. Il est donc pertinent d'introduire la dimension temporelle en faisant évoluer les primitives spatiales en primitives spatio-temporelles. En conséquence, nous passons des liaisons cinématiques (e.g. pivot glissant – *Cylindrical*) aux liaisons cinématiques MIP (mises en position) (e.g. *CylindricalOP*). Ces nouvelles primitives spatio-temporelles sont exprimées à l'aide de primitives méréotopologiques spatiales et temporelles. Les Tableaux 10.6 et 10.7 présentent les descriptions des évolutions possibles en conception ainsi que les liaisons cinématiques établies au cours du temps en utilisant les primitives méréotopologiques spatio-temporelles.

Afin d'illustrer plus précisément nos propos, la primitive spatio-temporelle **CylindricalOP** (OP signifiant « opérée » pour marquer la dynamique inhérente à une opération de mise en position) est explicitée au sein d'un graphe spatio-temporel (représenté par la Figure 10.5 et légendé via le Tableau 10.8). La définition méréotopologique proposée présente l'établissement, au cours du temps, de la liaison pivot glissant entre les pièces 1 et 5. Pour faciliter la compréhension, le temps a été découpé en 7 régions temporelles. La définition annonce au départ que : les régions spatiales 1 et 5 sont déconnectées, la région spatiale 1 est chevauchée par le squelette d'assemblage k_1 , qui est également distant de la région spatiale 5. Ensuite, la région spatiale 5 se déplace, générant par conséquent une région spatio-temporelle, et k_1 va désormais chevaucher la région spatiale 5, de telle manière que les régions spatiales seront alignées. Pour atteindre la fin de la mise en position des deux pièces, la région spatiale 5 se déplace à nouveau (création d'une région spatio-temporelle) pour être traversée par la région spatiale 1 jusqu'à ce que la région spatiale 5 soit tangente au squelette d'interface f_5 . Selon le schéma spatio-temporel développé, les opérations sont considérées comme continues (i.e. construites selon des intervalles et non des instants) et leurs régions temporelles sont définies telles que TR_i précède toujours TR_{i+1} . Sur cette base, les travaux de [Gruhier *et al.*, 2016] ont permis de développer davantage les descriptions méréotopologiques associées aux liaisons technologiques d'assemblage, que ce soit pour les montages permanents ou non permanents.

Tableau 10.6 – Description mérotopologique des primitives de changement en conception [Grubier et al., 2016].

Nom	Description mérotopologique	Représentation	Commentaire
Serial-Permutation	$((x\mathbf{R}z) \wedge (y\mathbf{R}z) \wedge (x\mathbf{R}y) \wedge (x\mathbf{T}f) \wedge (x\mathbf{R}k) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (z\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{R}k))_{TR1} \wedge (x\mathbf{Movez})_{TR2} \wedge ((x\mathbf{D}z) \wedge (y\mathbf{R}z) \wedge (x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{R}k) \wedge (z\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{R}k))_{TR3} \wedge (y\mathbf{Movez})_{TR4} \wedge ((x\mathbf{D}z) \wedge (y\mathbf{D}z) \wedge (x\mathbf{D}y))_{TR5} \wedge (y\mathbf{Movez})_{TR6} \wedge ((x\mathbf{D}z) \wedge (y\mathbf{R}z) \wedge (x\mathbf{D}y) \wedge (y\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{R}k) \wedge (z\mathbf{T}f_1))_{TR7} \wedge (x\mathbf{Movez})_{TR8} \wedge ((x\mathbf{R}z) \wedge (y\mathbf{R}z) \wedge (x\mathbf{R}y) \wedge (x\mathbf{T}f_2) \wedge (x\mathbf{R}k) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (z\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{R}k))_{TR9}$		k line, f_1 and f_2 surfaces
Parallel-Permutation	$((x\mathbf{R}z) \wedge (y\mathbf{R}z) \wedge (x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{T}f_1) \wedge (x\mathbf{R}k_1) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (z\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{R}k_2) \wedge (f_1\mathbf{D}f_2))_{TR1} \wedge (k_1\mathbf{D}k_2)_{TR2} \wedge ((x\mathbf{Movez}) \wedge (y\mathbf{Movez}))_{TR3} \wedge ((x\mathbf{D}z) \wedge (y\mathbf{D}z) \wedge (x\mathbf{D}y))_{TR4} \wedge ((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{R}z) \wedge (x\mathbf{T}f_2) \wedge (x\mathbf{R}k_2) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (z\mathbf{T}f_2) \wedge (y\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{R}k_1) \wedge (f_1\mathbf{D}f_2) \wedge (k_1\mathbf{D}k_2))_{TR5}$		k_1 and k_2 lines, f_1 and f_2 surfaces
Addition	$(x\mathbf{P}\emptyset)_{TR1} \wedge ((x\mathbf{P}A) \wedge (x\mathbf{T}f))_{TR2}$		f surface
Deletion	$((x\mathbf{P}A) \wedge (x\mathbf{T}f))_{TR1} \wedge (x\mathbf{P}\emptyset)_{TR2}$		f surface
Split	$((\emptyset\mathbf{Addition}y) \wedge (\emptyset\mathbf{Addition}z) \wedge (x\delta y) \wedge (x\delta z) \wedge (x\mathbf{T}f_1))_{TR1} \wedge ((y\mathbf{P}x) \wedge (z\mathbf{P}x) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{T}f_2))_{TR2} \wedge ((x\mathbf{Deletion}\emptyset) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{T}f_2))_{TR3}$		f_1 and f_2 surfaces
Union	$((x\mathbf{Addition}\emptyset) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{T}f_2))_{TR1} \wedge ((y\mathbf{P}x) \wedge (z\mathbf{P}x) \wedge (z\mathbf{T}f_1) \wedge (y\mathbf{T}f_2))_{TR2} \wedge ((\emptyset\mathbf{Deletion}y) \wedge (\emptyset\mathbf{Deletion}z) \wedge (x\delta y) \wedge (x\delta z) \wedge (x\mathbf{T}f_1))_{TR3}$		f_1 and f_2 surfaces
ChangeOfForm			
Deformation			
Growing	$(x\mathbf{T}f_1)_{TR1} \wedge (x\mathbf{T}f_2)_{TR2}$		f_1 and f_2 surfaces
Decrease			

Tableau 10.7 – Description méréotopologique des primitives des MIP liaisons cinématiques [Gruhler et al., 2016].

Nom	Description méréotopologique	Représentation	Commentaire
Moves	$(x\mathbf{T}k_1)_{TR1} \wedge (x\mathbf{T}k_2)_{TR2}$		k_1 and k_2 point, line or surface
CylindricalOP	$((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{O}k) \wedge (y\mathbf{D}k))_{TR1} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR2} \wedge ((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{O}k) \wedge (y\mathbf{O}k))_{TR3} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR4}$		k line, f surface
PrismaticOP	$\wedge((x\mathbf{X}y) \wedge (x\mathbf{O}k) \wedge (y\mathbf{O}k))_{TR5} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR6} \wedge ((x\mathbf{X}y) \wedge (x\mathbf{O}k) \wedge (y\mathbf{O}k) \wedge (y\mathbf{T}f))_{TR7}$		k line, f surface
SphericalOP	$(x\mathbf{D}y)_{TR1} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR2} \wedge ((x\mathbf{S}t\mathbf{y}) \wedge (x\mathbf{I}P\mathbf{y})) \wedge (x\mathbf{T}f) \wedge (y\mathbf{T}f) \wedge (x\mathbf{O}k) \wedge (y\mathbf{O}k))_{TR3}$		k point, f surface
RevoluteOP	$((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{D}k_1))_{TR1} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR2} \wedge ((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{O}k_1))_{TR3} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR4} \wedge ((x\mathbf{X}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{O}k_1))_{TR5} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR6} \wedge ((x\mathbf{T}y) \wedge (x\mathbf{X}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (x\mathbf{T}k_2) \wedge (x\mathbf{T}f) \wedge (y\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{T}k_2) \wedge (y\mathbf{T}f))_{TR7}$		k_1 line and k_2 plane, f surface
PlanarOP	$((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{T}k))_{TR1} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR2}$		k plane, f surface
PointContactOP	$\wedge((x\mathbf{T}y) \wedge (x\mathbf{T}f) \wedge (y\mathbf{T}k) \wedge (f\mathbf{T}k))_{TR3}$		k point, f point
LineContactOP			k line, f segment
ScrewOP	$((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{D}k_1))_{TR1} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR2} \wedge ((x\mathbf{D}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{O}k_1))_{TR3} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR4} \wedge ((x\mathbf{X}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{O}k_1))_{TR5} \wedge (y\mathbf{M}ove\mathbf{x})_{TR6} \wedge ((x\mathbf{X}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{O}k_1) \wedge (y\mathbf{T}f_1) \wedge (f_2\mathbf{O}f_3) \wedge (y\mathbf{T}f_2) \wedge (x\mathbf{T}f_3))_{TR7}$		k_1 line, f_1 area, f_2 and f_3 elliptical curve
Rotation	$((x\mathbf{O}k_2) \wedge (k_1\mathbf{O}k_2) \wedge (k_1\mathbf{O}k_3) \wedge (k_2\mathbf{D}k_3))_{TR1} \wedge (x\mathbf{M}ove\mathbf{k}_1)_{TR2} \wedge ((x\mathbf{O}k_2) \wedge (k_1\mathbf{O}k_2) \wedge (k_1\mathbf{O}k_3) \wedge (k_2\mathbf{O}k_3) \wedge (x\mathbf{O}k_3))_{TR3}$		k_1 point, k_2 and k_3 line

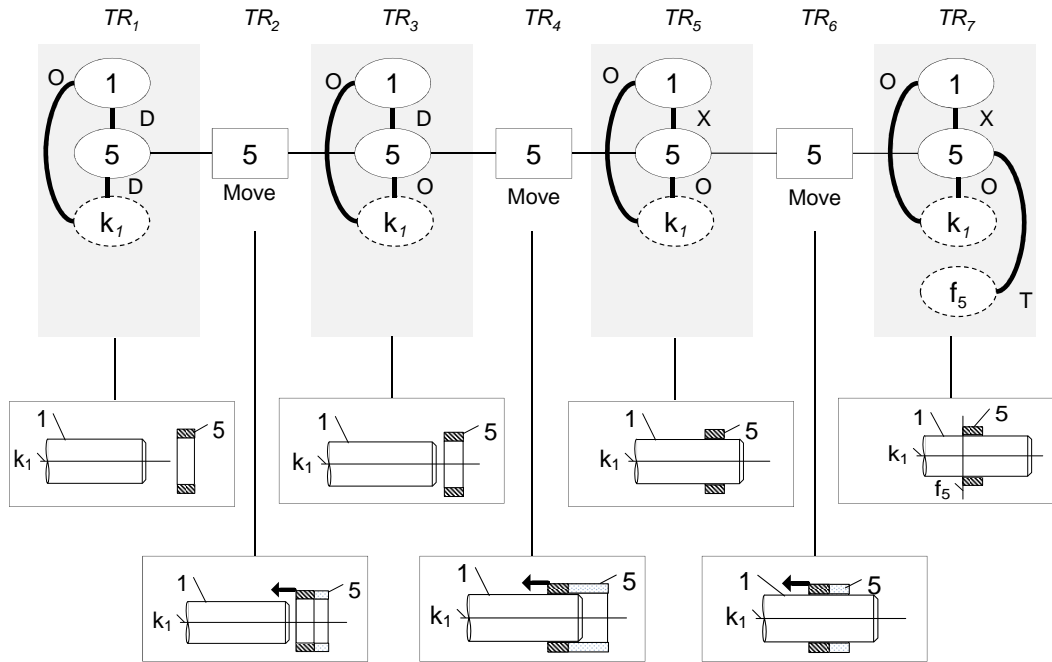


FIGURE 10.5 – Représentation de la primitive **CylindricalOP** au sein d'un graphe spatio-temporel [Gruhier *et al.*, 2016].

Tableau 10.8 – Légende pour la définition du graphe spatio-temporel [Gruhier *et al.*, 2016].

Symbole	Signification	Symbole	Signification
\overline{T}	Spatial relationship	$\overline{\overline{T}}$	Temporal relationship
$\overline{\text{Move}}$	Spatiotemporal relationship	TR_i	Temporal region number i
(5)	Spatial region	[5]	Spatiotemporal region
(k)	Assembly skeleton k	(f)	Interface skeleton f

10.3 Développement de l'ontologie modulaire : PRONOIA 2

La théorie JANUS a mis en évidence la possibilité de formaliser la dynamique induite au niveau de la définition géométrique des objets ainsi qu'au niveau leur montage. Ceci a pu être réalisé via le développement d'une théorie de premier ordre : la méréotopologie spatio-temporelle. Celle-ci a pour vocation de structurer les connaissances du couple produit-process par l'intermédiaire d'une ontologie formelle. Dans ce contexte, il est alors possible de construire une ontologie dérivée de JANUS (approche *top-down*), ou alors commencer par comprendre les domaines métier pour construire une ontologie nouvelle (approche *bottom-up*). Notre stratégie s'est orientée vers une approche hybride, afin d'aligner la vision philosophique du perdurantisme avec les objets matériels et les phénomènes physiques associés au domaine du produit et du processus d'assemblage. Les sections ci-après vont donc illustrer l'évolution des différentes ontologies ainsi que leurs niveaux de raisonnement et d'interaction avec les applications de type *hub incubator* et CAO notamment.

10.3.1 Approche ontologique ascendante : PRONOIA

L'objectif premier de PRONOIA est de formaliser des informations techniques liées aux problématiques d'assemblage en conception intégrée. Pour ce faire, nous sommes partis du modèle MUVOA [Demoly *et al.*, 2010], qui avait été proposé dans le cadre de mes travaux de thèse [Demoly, 2010]. Pour rappel, ce modèle a été construit en cohérence avec les rôles, les préoccupations et les entités associés aux acteurs métier impliqués dans les problématiques sus-mentionnées. Spécifié avec le langage UML (Unified Modeling Language), MUVOA a été utilisé comme un modèle de données pour l'application Pegasus (application introduite au Chapitre 9). Bien que les modèles de base de données et les ontologies partagent des caractéristiques communes à un niveau conceptuel – comme l'utilisation d'un langage formel, l'expressivité (i.e. type, propriété, agrégation, généralisation et contraintes) ou encore l'utilisation de contraintes pour la vérification de cohérence – nous avons délibérément choisi de construire une ontologie. Cela est justifié par le fait que la fonction première d'une ontologie est de clarifier et de spécifier un ensemble de significations/sens en s'appuyant sur une sémantique formelle rigoureuse pour inférer de nouvelles informations et connaissances. Dans ce contexte, l'ontologie présente un fort potentiel pour faire émerger des connaissances sur demande en conception proactive.

Pour développer cette première ontologie (présentée à la Figure 10.6), le diagramme de classes du modèle MUVOA (voir Figure 9.9) nous a permis d'identifier les concepts et associations majeurs, auxquels nous avons superposé une couche sémantique dédiée au raisonnement à base des règles de description logique (DL - *Description Logics*) [Baader *et al.*, 2007] et des règles issues du sémantique web (SWRL - Semantic Web Rule Language) [SWRL, 2019; SWRLTab, 2019] au sein du moteur de règles Jess [Jess Rule Engine, 2019]. Sur la base de cette configuration, il est alors possible de classer et de vérifier la cohérence des classes en fonction des concepts qu'elles représentent. Les règles DL permettent, quant à elles, d'inférer et de catégoriser de nouvelles informations (via les instances) au sein des classes. En résumé l'ontologie est exécutable, dynamique et flexible.

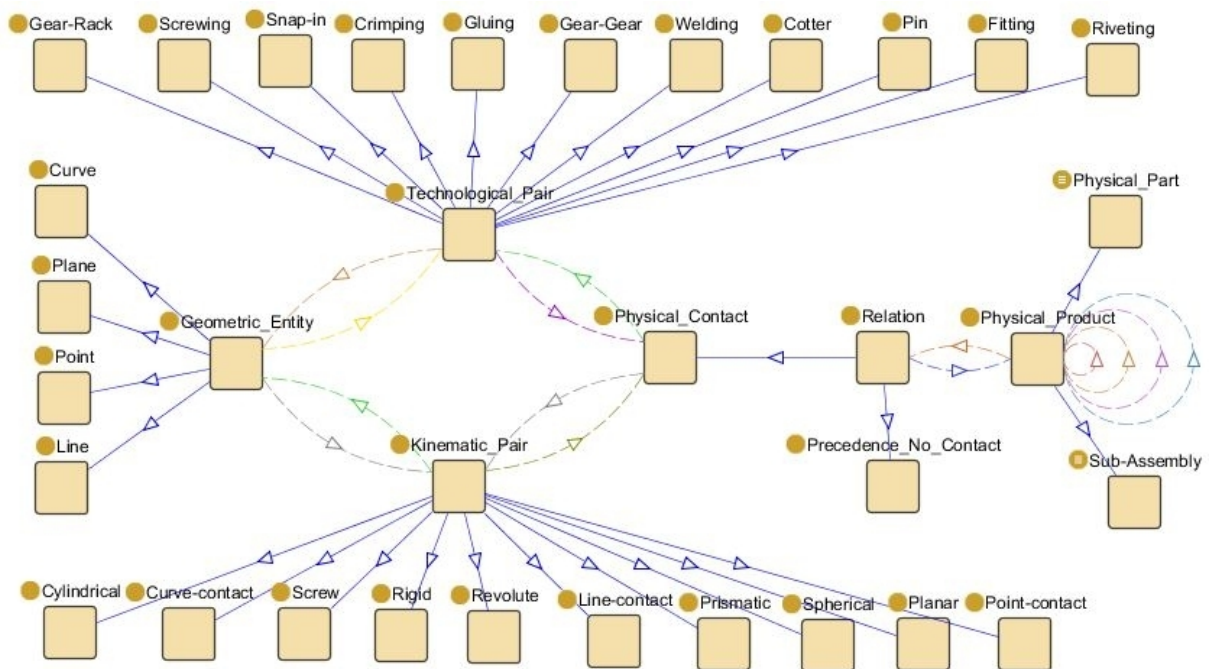


FIGURE 10.6 – Modèle ontologique PRONOIA représenté sous Protégé [Demoly *et al.*, 2012].

Afin de faciliter la compréhension du lecteur, nous avons adopté une convention de nommage standard dans le domaine de l'ingénierie ontologique, à savoir que les classes sont écrites en Arial (e.g. `Physical_Product`), les attributs/rerelations sont exprimés en Courier New (e.g. `isParentOf`), tandis que les

instances sont en Arial italique (e.g. *Physical_Part_1*). PRONOIA a donc été développée au sein de l'outil Protégé ontology editor (Protégé-OWL) tout en tenant compte des primitives méreotopologiques spatiale pour décrire notamment les liaisons cinématiques et technologiques. L'ontologie est composée principalement des classes : *Kinematic_Pair*, *Physical_Contact*, *Relation*, *Physical_Product*, *Technological_Pair* et *Geometric_Entity*. Ces classes possèdent également des sous-classes, telles qu'illustrées à la Figure 10.6. Les classes ont été définies et contraintes par des règles DL en étant conforme au processus de développement proposé par [Matsoki & Kiritsis, 2010]. Ce type de restriction apporte un sens logique aux classes du modèle et les rendent compréhensibles pour un moteur d'inférence. Dans notre contexte, nous avons utilisé le moteur d'inférence (ou raisonneur) Pellet [Pellet, 2019]. Le Tableau 10.9, présenté ci-dessous, liste à titre indicatif les règles DL qui ont été insérées dans l'ontologie. De cette manière le raisonneur peut vérifier la cohérence du modèle, les équivalences parmi les classes, la réorganisation de la hiérarchie des classes et l'inférence des instances [Horrocks, 2007]. A titre d'exemple, la classe *Revolute* de PRONOIA a été définie avec la restriction DL suivante :

$$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \forall \text{Kinematic_Pair_has2Geometric_Entity} . (\text{Line} \sqcap \text{Plane})$$

Cette restriction introduit le concept de *Revolute* (i.e. liaison pivot) et affirme que ses instances ne sont que les individus, qui sont des instances de la classe *Kinematic_Pair* à qui les instances des entités géométriques de type *Line* et *Plane* sont rattachées.

Tableau 10.9 – Extrait des règles DL implémentées dans PRONOIA [Demoly *et al.*, 2012].

Classe	Type de règle	Règle de description logique (DL rule)
<i>Geometric_Entity</i>	Cardinality	$\text{Geometric_Entity} \equiv 1 \text{ is_Geometric_Entity_Of2Kinematic_Pair}$
<i>Kinematic_Pair</i>	Cardinality	$\text{Kinematic_Pair} \equiv 1 \text{ is_Kinematic_Pair_of2Physical_Contact}$
<i>Relation</i>	Cardinality	$\text{Relation} \equiv 2 \text{ Relation2Physical_Product}$
<i>Physical_Contact</i>	Cardinality (inherited)	$\text{Physical_Contact} \equiv \text{Relation} \sqcap = 2 \text{ Relation2Physical_Product}$
	Cardinality	$\text{Physical_Contact} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap = 1 \text{ has2Line}$
<i>Revolute</i>	All Values From	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \forall \text{Kinematic_Pair_has2Geometric_Entity} . (\text{Line} \sqcap \text{Plane})$
	All Values From	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \forall \text{Kinematic_Pair_has2Line} . \text{Line}$
	Some Values From	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \exists \text{Kinematic_Pair_has2Line} . \text{Line}$
	Cardinality	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap = 1 \text{ Kinematic_Pair_has2Line}$
	All Values From	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \forall \text{Kinematic_Pair_has2Plane} . \text{Plane}$
	Some Values From	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \exists \text{Kinematic_Pair_has2Plane} . \text{Plane}$
	Cardinality	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap = 1 \text{ Kinematic_Pair_has2Plane}$
	Cardinality (inherited)	$\text{Revolute} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap = 1 \text{ is_Kinematic_Pair_of2Physical_Contact}$
<i>Cylindrical</i>	Some Values From	$\text{Cylindrical} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \exists \text{Kinematic_Pair_has2Line} . \text{Line}$
	All Values From	$\text{Cylindrical} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap \forall \text{Kinematic_Pair_has2Line} . \text{Line}$
	Cardinality	$\text{Cylindrical} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap = 1 \text{ Kinematic_Pair_has2Line}$
	Cardinality (inherited)	$\text{Cylindrical} \equiv \text{Kinematic_Pair} \sqcap = 1 \text{ is_Kinematic_Pair_of2Physical_Contact}$
<i>Sub-Assembly</i>	Min Cardinality	$\text{Sub-Assembly} \equiv \text{Physical_Product} \sqcap \geq 2 \text{ is_Parent_Of}$
<i>Physical_Part</i>	Complement Of	$\text{Physical_Part} \equiv \text{Physical_Product} \sqcap \neg \text{Sub-Assembly}$

De plus, d'autres règles de type SWRL ont été introduites dans PRONOIA, afin de compléter le modèle par des relations méreotopologiques. De ce façon, les composants deviennent connectés au sein de l'ontologie et les raisonneurs SWRL et Jess peuvent générer les relations entre les composants et également entre les composants et les entités géométriques. Nous pouvons citer par exemple, la règle SWRL relative à la description méreotopologique de la liaison cinématique *Revolute*, appelée « Jess_KP_Revolute » issue du Tableau 10.10, définie de la manière suivante :

$$\text{Physical_Contact_has2Kinematic_Pair} (?pcx, ?kpx) \wedge \text{Relation2Physical_Product} (?pcx, ?ppx) \wedge \text{Relation2Physical_Product} (?pcx, ?ppy) \wedge \text{differentFrom} (?ppx, ?ppy) \wedge \text{Revolute} (?kpx) \wedge \text{Kinematic_Pair_has2Line} (?kpx, ?glx) \wedge \text{Kinematic_Pair_has2Plane} (?kpx, ?gpx) \rightarrow \text{Crosses} (?ppx, ?ppy) \wedge \text{is_Tangent_of} (?ppx, ?ppy) \wedge \text{Overlaps} (?ppx, ?glx) \wedge \text{is_Tangent_of} (?ppx, ?gpx) \wedge \text{Overlaps} (?ppy, ?glx) \wedge \text{is_Tangent_of} (?ppy, ?gpx)$$

Ce type de règle permet à l'architecte produit de raisonner sur des instances OWL et d'inférer de

nouvelles connaissances. Nous retrouvons ici un argument antécédent à gauche \rightarrow et un argument conséquent à sa droite, chaque argument est une conjonction d'assertions atomiques. Ceci signifie que cette règle peut être lue comme : si toutes les assertions dans l'argument antécédent sont vraies, alors l'argument conséquent est vrai. L'exemple proposé ci-dessus exprime les conditions nécessaires dédiées à la génération de la description méréotopologique de la liaison cinématique Revolute (i.e. $x\mathbf{K}_{\text{rev}y} := \exists x, y\{(x\mathbf{X}y \wedge x\mathbf{T}y) \wedge (x\mathbf{O}k_1 \wedge y\mathbf{O}k_1) \wedge (x\mathbf{T}k_2 \wedge y\mathbf{T}k_2)\}$) en considérant deux squelettes géométriques (i.e. k_1 comme droite et k_2 comme plan). Ce type de requête apporte donc une vision de l'influence des relations composant-composant sur la description méréotopologique du produit.

Tableau 10.10 – Extrait des règles SWRL implémentées dans PRONOIA [Demoly *et al.*, 2012].

Rule name	SWRL rule
Jess_KP_Revolute	Physical_Contact_has2Kinematic_Pair(?pcx, ?kpx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppy) \wedge differentFrom(?ppx, ?ppy) \wedge Revolute(?kpx) \wedge Kinematic_Pair_has2Line(?kpx, ?glx) \wedge Kinematic_Pair_has2Plane(?kpx, ?gpx) \rightarrow Crosses(?ppx, ?ppy) \wedge is_Tangent_of(?ppx, ?ppy) \wedge Overlaps(?ppx, ?glx) \wedge is_Tangent_of(?ppx, ?gpx) \wedge Overlaps(?ppy, ?glx) \wedge is_Tangent_of(?ppy, ?gpx)
Jess_KP_Rigid	Physical_Contact_has2Kinematic_Pair(?pcx, ?kpx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppy) \wedge differentFrom(?ppx, ?ppy) \wedge Rigid(?kpx) \wedge Kinematic_Pair_has2Point(?kpx, ?gpox) \rightarrow Crosses(?ppx, ?ppy) \wedge is_Tangent_of(?ppx, ?ppy) \wedge Overlaps(?ppx, ?gpox) \wedge Overlaps(?ppy, ?gpox)
Jess_KP_Screw	Physical_Contact_has2Kinematic_Pair(?pcx, ?kpx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppy) \wedge differentFrom(?ppx, ?ppy) \wedge Screw(?kpx) \wedge Kinematic_Pair_has2Line(?kpx, ?glx) \wedge Kinematic_Pair_has2Plane(?kpx, ?gpx) \rightarrow Crosses(?ppx, ?ppy) \wedge is_Tangent_of(?ppx, ?ppy) \wedge Overlaps(?ppx, ?glx) \wedge is_Tangent_of(?ppx, ?gpx) \wedge Overlaps(?ppy, ?glx) \wedge is_Tangent_of(?ppy, ?gpx)
Jess_KP_Spherical	Physical_Contact_has2Kinematic_Pair(?pcx, ?kpx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppx) \wedge Relation2Physical_Product(?pcx, ?ppy) \wedge differentFrom(?ppx, ?ppy) \wedge Spherical(?kpx) \wedge Kinematic_Pair_has2Point(?kpx, ?gpox) \rightarrow Straddles(?ppx, ?ppy) \wedge is_Interior_Boundary_of(?ppx, ?ppy) \wedge Overlaps(?ppx, ?gpox) \wedge Overlaps(?ppy, ?gpox)
Jess_Rel_Discreet	Relation2Physical_Product(?prex, ?ppx) \wedge Relation2Physical_Product(?prex, ?ppy) \wedge differentFrom(?ppx, ?ppy) \wedge Precedence_No_Contact(?prex) \rightarrow Discrete_from(?ppx, ?ppy)

A titre d'exemple, l'ontologie PRONOIA a été appliquée à un cas d'étude portant sur un assemblage mécanique. Celui-ci, composé de 6 pièces, est présenté à la Figure 10.7.

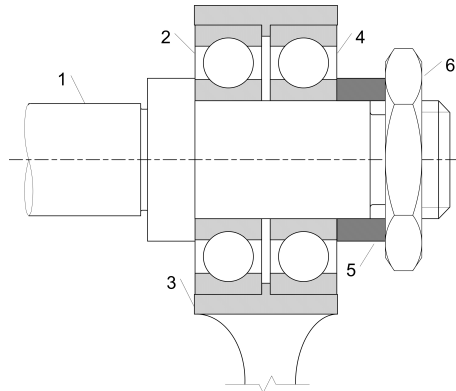


FIGURE 10.7 – Vue en coupe du cas d'étude [Demoly *et al.*, 2012].

Afin d'instancier l'ontologie, plusieurs informations ont préalablement été définies, notamment les informations affectées aux relations composant-composant (e.g. cinématiques, technologiques, précedence, etc.) et la prise en compte de la séquence d'assemblage. On peut retrouver cette étape dans les diverses approches abordées au sein des Chapitres 8 et 9. Les informations relationnelles et la eBOM ont alors

été introduites manuellement dans protégé. La Figure 10.8 permet notamment de visualiser la relations entre les diverses instances issues du cas d'étude. Les instances associées aux classes et aux attributs ont pu être générées par le moteur d'inférence Pellet.

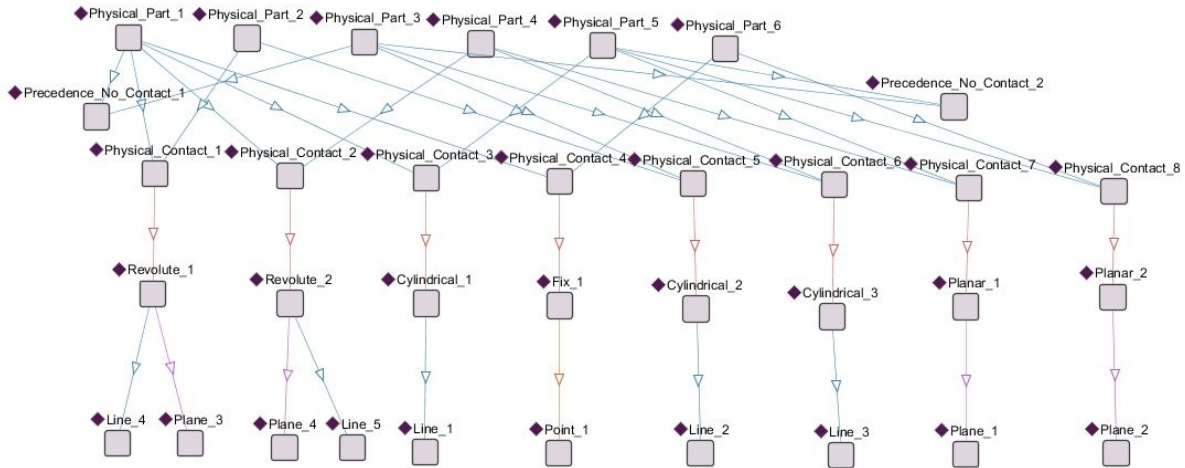


FIGURE 10.8 – Réseau des instances de l'ontologie PRONOA [Demoly *et al.*, 2012].

10.3.2 Approche ontologique ascendante : PRONOA 2

Les résultats prometteurs de PRONOA nous ont encouragés à développer davantage notre base sémantique et logique, plus particulièrement en considérant une approche descendante. Il s'agit maintenant de pouvoir étendre l'ontologie PRONOA, afin qu'elle soit véritablement alignée avec la théorie JANUS décrite précédemment. Pour dériver JANUS au sein de l'ontologie, nous avons re-structuré PRONOA en une ontologie modulaire appelée PRONOA2. Celle-ci est dorénavant composée de trois niveaux (représentés à la Figure 10.9), dont la méta-ontologie (ou également appelée ontologie fondationnelle), l'ontologie de domaine et l'ontologie d'application.

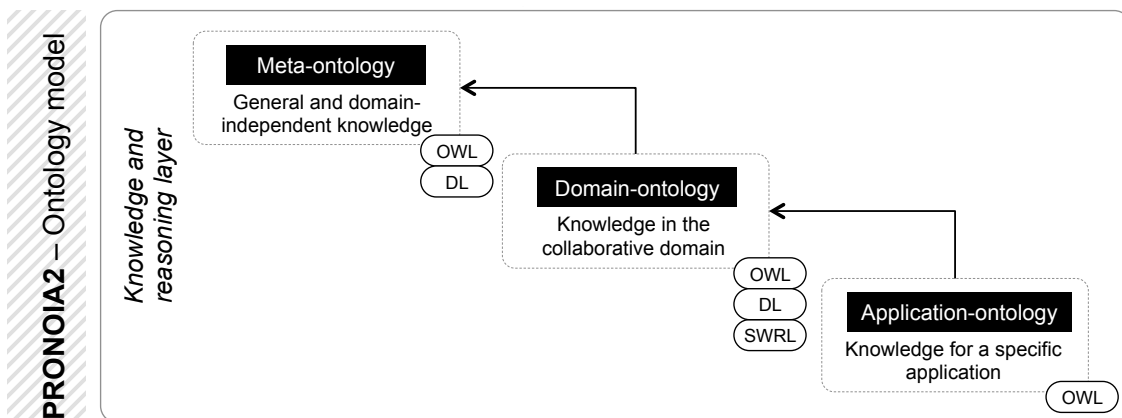


FIGURE 10.9 – Ontologie PRONOA2 modulaire basée sur JANUS [Gruhier *et al.*, 2015].

Dans notre contexte, la méta-ontologie décrit la logique régissant la structure et le comportement des ontologies sous-jacentes. En tant qu'ontologie générique et de haut niveau (*top-level ontology*), la méta-ontologie a pour objectif de formaliser des connaissances génériques et indépendantes d'un domaine métier

[Fensel *et al.*, 2007]. Cette dernière est composée de méta-classes, où les instances sont en réalité des classes elles-mêmes, de la même manière que les classes permettent la génération d'instances [Tudorache, 2006]. La seconde ontologie concerne l'ontologie de domaine. C'est le niveau d'abstraction qui se rapproche le plus de l'ontologie PRONOA développée jusqu'alors. L'ontologie de domaine capture les connaissances d'un domaine métier à interfacier, afin de fournir une compréhension partagée [Chang, 2008]. Ce type d'ontologie est généralement exploitée pour créer des bases de connaissances [Zanni-Merk *et al.*, 2011], notamment en ingénierie de conception [Darlington & Culley, 2008; Zhu *et al.*, 2012]. La troisième et dernière ontologie est une ontologie d'application, qui permet de capitaliser les connaissances nécessaires dans un domaine spécifique [Fensel *et al.*, 2007].

Positionnement de PRONOA2

Sur la base de cette articulation, une question importante consiste à considérer/intégrer notre ontologie modulaire avec les ontologies existantes dans la littérature, afin d'apporter des éléments complémentaires visant à mapper voire à articuler les domaines de connaissances. De notre point de vue, le point d'accroche doit nécessairement passer par les ontologies génériques composées de méta-concepts. Parmi les ontologies largement admises par la communauté d'ontologie appliquée, nous pouvons citer les ontologies DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering) [Gangemi *et al.*, 2002], BFO (Basic Formal Ontology) [Arp *et al.*, 2015] et SUMO (Suggested Upper Merged Ontology) [Pease *et al.*, 2002]. Hormis les domaines d'application spécifiques, il devient impératif que les ontologies génériques puissent intégrer des concepts méréotopologiques et spatio-temporels. Les ontologies citées précédemment exploitent des composants méréotopologiques, cependant il n'est pas très aisé de savoir quelles sont les hypothèses philosophiques et ontologiques qui ont permis de construire les primitives de premier ordre [Hahmann & Grüninger, 2012]. Dans ce contexte, et puisque notre théorie JANUS exploite des primitives méréotopologiques axiomatisées par [Smith, 1996], nous avons décidé de développer PRONOA en cohérence avec les ontologies SUMO et BFO, fondée par le Prof. Barry Smith et ses collègues à University at Buffalo (USA). A ce jour, une communauté récente a vu le jour, *Industry Ontology Foundry* (IOF⁸²), dont l'objectif est double, à savoir (i) réunir/centraliser les ontologies issues de la littérature – qui ont généralement été réalisées de manière *ad hoc*, avec peu de capacité de partage et d'interopérabilité, peu d'axiomes et de définitions, etc. – et (ii) harmoniser et articuler les différentes connaissances via différents niveaux d'abstractions et de dépendances aux domaines métier. L'ontologie PRONOA2, qui est présentée dans cette section, a fait récemment l'objet d'une intégration dans IOF.

Développement ontologique

L'ontologie modulaire PRONOA2 est illustrée dans sa totalité à la Figure 10.10, où chaque rectangle coloré représente une partie de l'ontologie. L'ontologie de domaine est décomposée en six groupes, répartis entre primitives / régions et les dimensions spatiale, temporelle et spatio-temporelle. Toutes les classes définies dans PRONOA2 sont cohérentes vis-à-vis de la théorie JANUS [Gruhier *et al.*, 2016]. Afin de dériver JANUS, nous avons utilisé une méthodologie – plus communément connue sous le nom de *Methontology* [Fernandez *et al.*, 1997] – qui apporte une assistance au développement, via les étapes de conceptualisation, formalisation, intégration et implémentation notamment. Ainsi, les classes de la méta-ontologie, telles que représentées dans au sein du rectangle rose à la Figure 10.10, sont structurées autour de deux classes principales : *Region* et *Primitive*, dans lesquelles des sous-classes sont définies : *Spatial_Region*, *Temporal_Region*, *Spatial_Primitive* et *Temporal_Primitive*. Etant donné que la dimension spatio-temporelle dépend des dimensions spatiale et temporelle, nous avons donc considéré la classe *Spatiotemporal_Primitive* en tant que sous-classe de *Spatial_Primitive* et de *Temporal_Primitive*. Cette même hypothèse a été propagée à la classe *Spatiotemporal_Region* en tant que sous-classe de *Spatial_Region* et de *Temporal_Region*.

Au niveau de l'ontologie de domaine, nous pouvons remarquer que les primitives méréotopologiques et les primitives spatio-temporelles, définies dans JANUS, ont été incorporées. Nous retrouvons donc les primitives permettant de décrire l'évolution des objets en conception ainsi que les primitives décrivant l'établissement des relations physiques entre les composants du produit au cours du temps. Cette ontologie

82. <https://sites.google.com/view/industrialontologies/home>

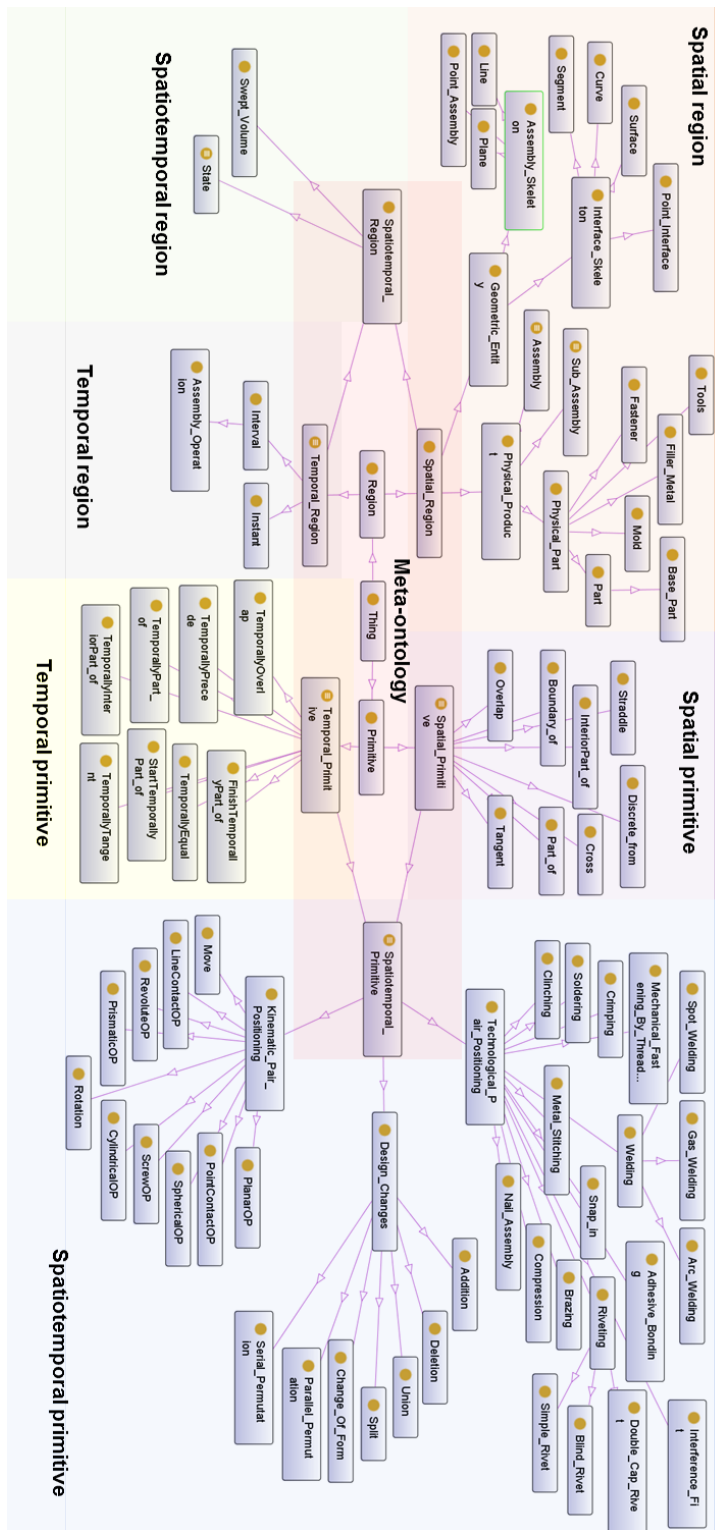


FIGURE 10.10 – Ontologie modulaire PRONOA [Gruhier *et al.*, 2015].

est également capable de décrire, à un certain état d'assemblage en conception, deux types de situation.

Le premier cas est que pour une région temporelle donnée, deux régions spatiales peuvent être reliées par une primitives spatiale ; le second concerne, quant à lui, la relation entre une région spatiale et une région spatio-temporelle portée par une primitive spatio-temporelle. La Figure 10.11 illustre ces deux situations.

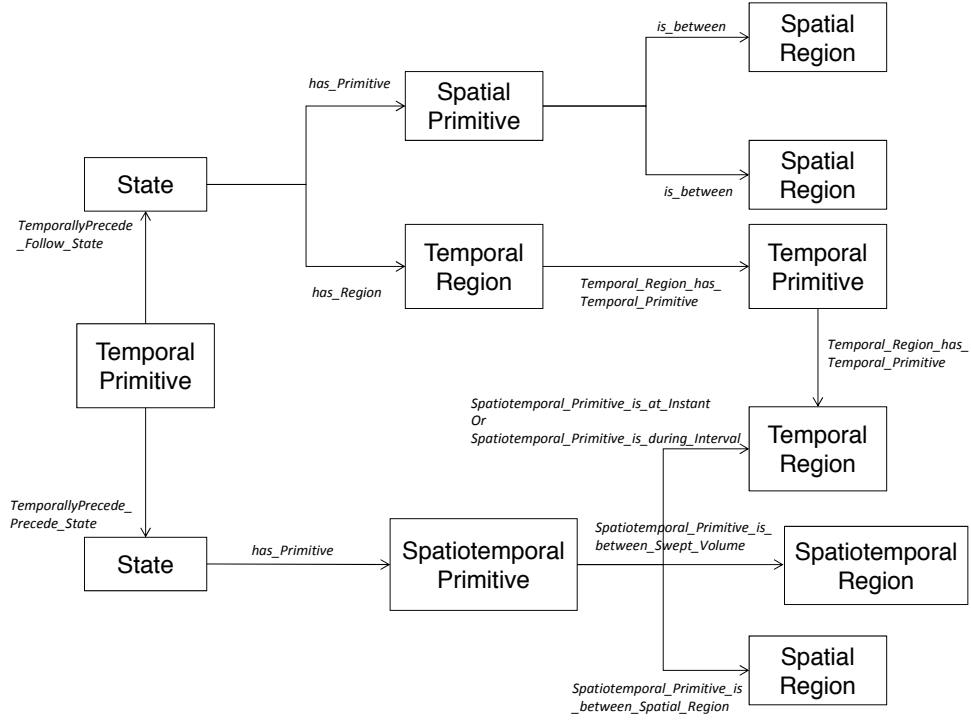


FIGURE 10.11 – Modèle d'application de l'ontologie de domaine [Gruhier *et al.*, 2015].

Sur cette base de classes, nous avons étendu les règles DL – appliquées précédemment au sein de PRONOIA – pour couvrir la complexité engendrée par l'introduction des dimensions temporelle et spatio-temporelles. Ces règles servent alors de moyens pour identifier les connaissances conflictuelles et également pour reconnaître les effets des changements informationnels [Witherell *et al.*, 2013]. En effet, les raisonnements de vérification de consistance, de subsumption, etc. assurent la qualification de l'ontologie. Les Tableaux 10.11 et 10.12 définissent une partie des règles DLM qui ont été implémentées dans PRONOIA2. Les propriétés qui sont utilisés pour établir les restrictions ont été organisées en fonction des trois ontologies. L'objectif a été notamment d'écrire les restriction de manière descendante afin d'éviter les répétitions. En conséquence, les deux première lignes du Tableau 10.11 sont destinées à restreindre les classes de la méta-ontologie ; le reste des règles DL étant adressé à l'ontologie de domaine. De plus, de nouvelles règles SWRL (de type *If... then...*) ont été mises en place pour augmenter les inférences de nouvelles connaissances [Fortineau *et al.*, 2013]. A titre d'exemple, nous avons introduit une règle SWRL ci-après afin d'illustrer que, pour comprendre que deux composants (i.e. x and y) sont en train d'être mis en position pour satisfaire une relation cinématique de type pivot, alors il faut au préalable que leur deux droites (i.e. ka and kb correspondant aux deux axes de révolution) soient en cours de chevauchement, leur deux plans (i.e. kc and kd) soient tangents, et que, à la fin de l'opération, une pièce traverse l'autre et tout en étant tangente avec le squelette d'interface f .

$\begin{aligned} & \text{Overlaps} (?ka, ?kb) \quad \wedge \quad \text{are_in_contact} (?x, ?f) \quad \wedge \quad \text{are_in_contact} (?y, ?f) \quad \wedge \quad \text{crosses} (?x, ?y) \\ & \wedge \quad \text{has_line} (?x, ?ka) \quad \wedge \quad \text{has_line} (?y, ?kb) \quad \wedge \quad \text{has_plane} (?x, ?kc) \quad \wedge \quad \text{has_plane} (?y, ?kd) \\ & \wedge \quad \text{is_Tangent_of} (?kc, ?kd) \quad \wedge \quad \text{is_Tangent_of} (?x, ?y) \quad \wedge \quad \text{DifferentFrom} (?ka, ?kb) \quad \wedge \quad \text{DifferentFrom} \\ & (?kc, ?kd) \quad \wedge \quad \text{DifferentFrom} (?x, ?y) \quad \rightarrow \quad \text{Revolutes} (?x, ?y) \end{aligned}$

Tableau 10.11 – Règles DL implémentées dans PRONOIA2 [Gruhier *et al.*, 2015].

Class name	Rule type	DL Rule
Spatial_Primitive	Cardinality	$Spatial_Primitive \equiv is_between = 2 Spatial_Region$
Temporal_Region	Some values from	$Temporal_Region \equiv has_Temporal_Primitive \exists Temporal_Primitive$
Assembly	Min cardinality	$Assembly \equiv ((is_composed_of_Physical_Part \geq 1 Physical_Part) \sqcap (is_composed_of_Sub_Assembly \geq 1 Sub_Assembly)) \sqcup (is_composed_of_Physical_Part \geq 2 Physical_Part)$
Sub_Assembly	Min cardinality	$Sub_Assembly \equiv is_composed_of_Physical_Part \geq 2 Physical_Part$
State	Min cardinality	$State \equiv ((has_Primitive = 1 Spatiotemporal_Primitive) \sqcup (has_Region = 1 Temporal_Region)) \sqcap (has_Primitive \geq 1 Spatial_Primitive)$
Spatiotemporal_Primitive	Cardinality	$Spatiotemporal_Primitive \equiv (is_at_Instant = 1 Instant) \sqcup (is_during_Interval = 1 Interval)$
Spatiotemporal_Primitive	Cardinality	$Spatiotemporal_Primitive \equiv ((is_between_Spatial_Region = 1 Spatial_Region) \sqcap (is_between_Swept_Volume = 1 Swept_Volume)) \sqcup (is_between_Spatial_Region = 2 Spatial_Region)$
Addition	Cardinality	$Addition \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
Change_Of_Form	Cardinality	$Change_Of_Form \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Surface)$
Deletion	Cardinality	$Deletion \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
Parallel_Permutation	Cardinality	$Parallel_Permutation \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Surface)$
Serial_Permutation	Cardinality	$Serial_Permutation \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Surface)$
Split	Cardinality	$Split \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Surface)$
Union	Cardinality	$Union \sqsubseteq (Other_Evolution) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Surface)$

Tableau 10.12 – Règles DL implémentées dans PRONOIA2 (bis) [Gruhier *et al.*, 2015].

Class name	Rule type	DL Rule
CylindricalOP	Cardinality	$CylindricalOP \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
LineContactOP	Cardinality	$LineContactOP \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Segment)$
Move	Cardinality	$Move \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (((has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Plane)) \sqcup ((has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Point_Assembly)) \sqcup ((has_Geometric_Entity = 1 Plane) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Point_Assembly)) \sqcup (has_Geometric_Entity = 2 Line \sqcup (has_Geometric_Entity = 2 Plane) \sqcup (has_Geometric_Entity = 2 Point_Assembly))$
PlanarOP	Cardinality	$PlanarOP \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Plane) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
PointContactOP	Cardinality	$PointContactOP \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Point_Assembly) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Point_Interface)$
PrismaticOP	Cardinality	$PrismaticOP \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
RevoluteOP	Cardinality	$RevoluteOP \sqsubseteq Kinematic_Pair \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Plane) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
Rotation	Cardinality	$Rotation \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Point_Assembly)$
ScrewOP	Cardinality	$RevoluteOP \sqsubseteq Kinematic_Pair \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Line) \sqcap (has_Geometric_Entity = 2 Curve) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$
SphericalOP	Cardinality	$SphericalOP \sqsubseteq (Kinematic_Pair) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Point_Assembly) \sqcap (has_Geometric_Entity = 1 Surface)$

Cas d'étude

Afin de tester notre ontologie modulaire PRONOIA2, nous l'avons appliquée une nouvelle fois à notre cas d'étude introduit à la Figure 10.7 de la section précédente. Cette fois-ci, la description des relations composant-composant au cours de l'assemblage a été représentée par un graphe spatio-temporel étendu (voir Figure 10.12). Pour des raisons de clarté, les relations de filiation n'ont pas été illustrées. Nous pouvons constater, par exemple, que lors de l'opération d'assemblage OP60, les pièces 1 et 4 sont en contact physique avec le volume balayé 5 (i.e. la pièce 5 est en train de se déplacer pour atteindre sa position finale). A cet effet, les régions spatio-temporelles, générées au sein de l'application CAO (voir Figure 10.13 à la page suivante), apportent de la compréhension auprès du concepteur sur la nature évolutive de l'objet au cours de l'assemblage.

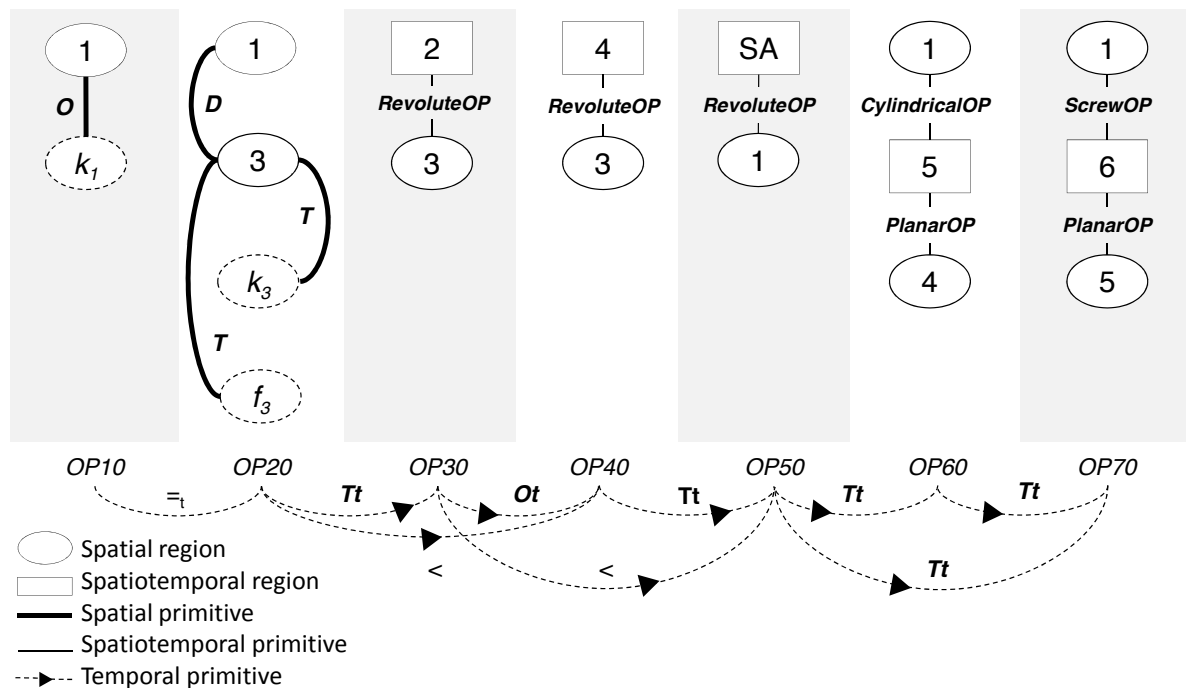


FIGURE 10.12 – Description spatio-temporelle des relations durant l'assemblage des composants du produit [Gruhier *et al.*, 2015].

Une fois l'ontologie construite et réglée par des restrictions, celle-ci a été peuplée par les informations provenant du cas d'étude. Ceci a permis de générer l'ontologie d'application, telle que présentée à la Figure 10.14, où les différentes propriétés liant les instances peuvent être identifiées. A noter également que cette ontologie est composée de sept états (i.e. *State1*, *State2*, *State3*, etc.), qui sont composés à leur tour de régions et primitives couvrant les trois dimensions (i.e. spatiale, temporelle et spatio-temporelle). Ces états, faisant référence à la Figure 10.11, apportent un moyen flexible pour représenter différentes primitives dimensionnelles avec différentes régions dimensionnelles.

Par conséquent, il s'agit donc de définir des mécanismes d'exploitation de l'ontologie modulaire avec les systèmes et applications participant à la stratégie PLM. Dans ce contexte, il convient de faire référence au concept de *hub incubator* introduit et présenté au sein du Chapitre précédent. L'ontologie modulaire a en effet un rôle à jouer, afin de réconcilier, de manière logique et sémantique, les informations et connaissances du couple produit-process. La section ci-après apportera une attention particulière sur l'articulation proposée entre les applications CAO et PRONOIA2 notamment.

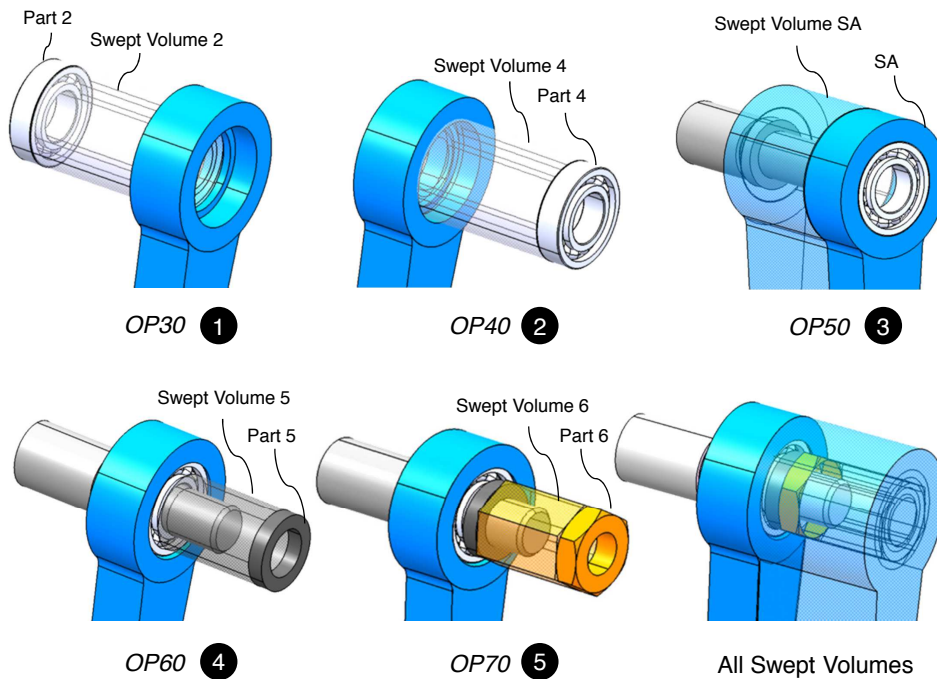


FIGURE 10.13 – Evolution des relations composant-composant représentées géométriquement à l'aide de l'outil CAO CATIA V5 [Gruhler *et al.*, 2015].

Opérationnalisation de l'ontologie

Partant de l'ontologie modulaire développée précédemment, un effort supplémentaire est en cours de réalisation, afin d'élargir l'adoption de PRONOIA2 au sein de la communauté scientifique de l'ingénierie de conception. En effet, il est important de pouvoir démontrer l'apport des ontologies en tant que support aux activités de conception et de développement des produits. Cette adoption requiert des processus d'exploitation de l'ontologie. Dans notre contexte, ceci concerne notamment des mécanismes pour recueillir, raisonner, visualiser et transmettre automatiquement des informations au sein des systèmes d'informations et des applications dédiées à la conception de systèmes mécaniques. Plus particulièrement, il s'agit de pouvoir inférer des informations spatio-temporelles – liées aux problématiques de cinématique et d'assemblage – par l'extraction d'informations spatiales enfouies dans les modèles CAO [Khan *et al.*, 2017]. Au delà de la capitalisation de connaissances « dynamiques », ce type d'interaction va permettre à PRONOIA2 de se positionner à un niveau de médiation entre des applications CAO hétérogènes [Khan *et al.*, 2019] dans un contexte de conception collaborative. D'une autre manière, ce positionnement permet également de couvrir les problématiques d'interopérabilité entre les applications CAO en mettant l'accent sur la vue dynamique au lieu de la traditionnelle vision statique portée par les applications logicielles actuelles [Bodein *et al.*, 2014].

Pour ce faire, la configuration envisagée va introduire une application tierce, afin de visualiser les informations à réconcilier et à partager qui sont considérées comme pertinentes pour comprendre la nature cinématique des systèmes mécaniques en cours de conception. Pour capitaliser les informations spatio-temporelles, il convient de pouvoir extraire les informations relationnelles « statiques » du produit en CAO, afin de pouvoir ensuite inférer des informations spatio-temporelle en utilisant les différentes primitives temporelles et spatio-temporelles de PRONOIA2. Ces informations enrichies sont ensuite visualisées ou envoyées vers une autre application CAO. La plateforme de visualisation utilisée est X3DOM⁸³ [Behr *et al.*, 2009; Mouton *et al.*, 2014] couplée au standard de représentation X3D⁸⁴.

83. <https://www.x3dom.org>

84. <http://www.web3d.org/x3d/what-x3d>

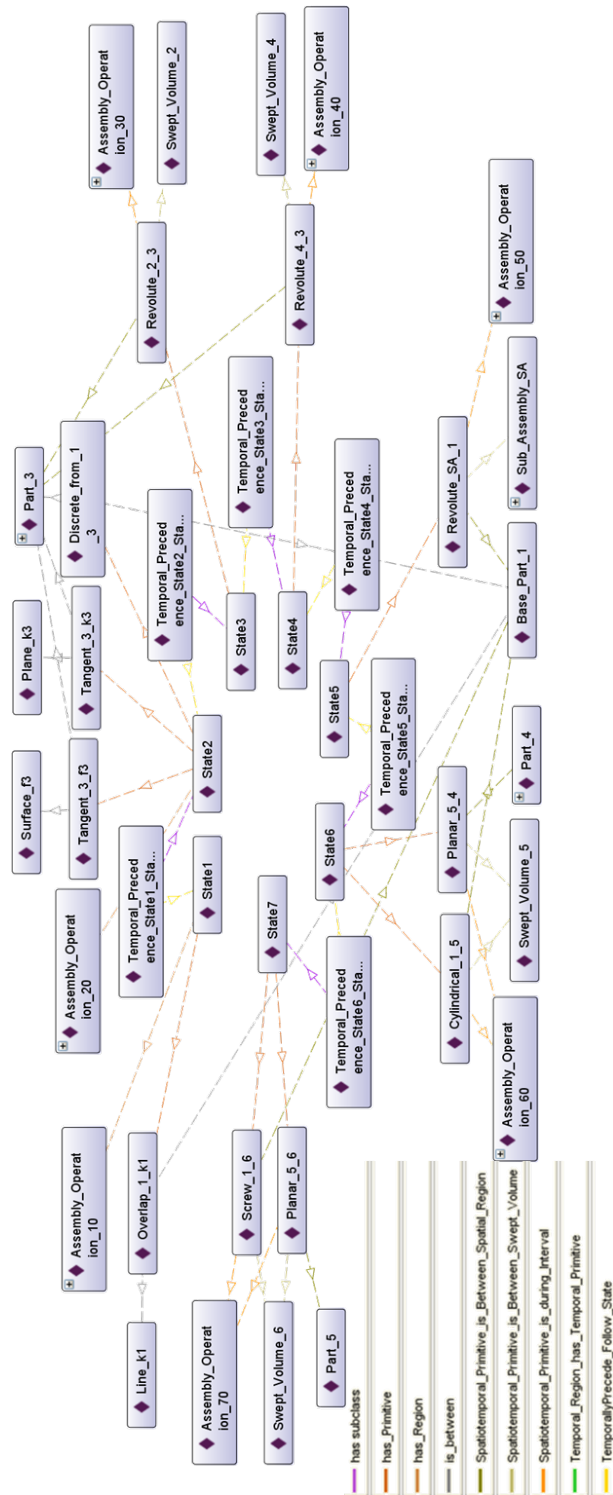


FIGURE 10.14 – Ontologie d'application associée au cas d'étude [Gruhier *et al.*, 2015].

10.4 Bilan de l'OP₃

Cette opération de recherche, principalement axée sur la formalisation et la représentation des connaissances spatio-temporelles du couple produit-process, a mis en avant une base scientifique plus théorique, à base de mathématiques, dédiée à la structuration d'ontologies support au raisonnement sémantique et logique au sein des phases de conception préliminaire et de conception détaillée. La Figure 10.15 ci-dessous traduit les différentes contributions de l'OP₃ et leurs relations au cours des différentes phases de ma carrière. Il est important de relever que ces changements au niveau théorique et ontologique nous ont permis de converger vers les avancées scientifiques réalisées au sein des OP₂ et OP₃. En conséquence, les ontologies développées présentent des structures de connaissances prometteuses, afin de couvrir les problématiques émergentes associées aux techniques d'impression 4D.

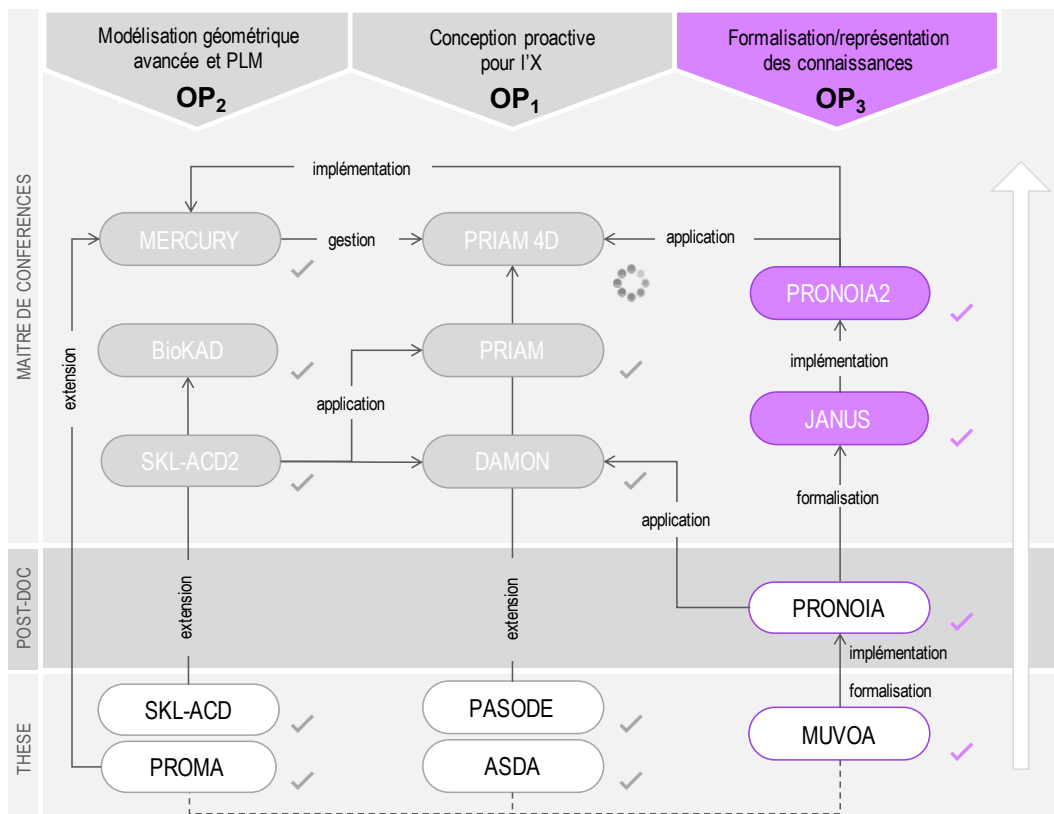


FIGURE 10.15 – Synoptique des contributions scientifiques issues de l'OP₃.

Chapitre 11

Projet de recherche

« La séparation finale, où le lien avec la source originelle apparaît complètement oublié, est souvent illustrée par un flocon de neige qui s'est cristallisé à partir de l'eau du nuage qui, à l'origine, s'était évaporé de l'océan. On a là une entité très structurée, très individuelle et séparée qui ne comporte, en apparence, aucune ressemblance avec sa source. Maintenant, on a vraiment besoin d'un savoir sophistiqué pour reconnaître que le flocon de neige est l'océan, et l'océan le flocon de neige. Et pour se réunir avec l'océan, le flocon de neige doit abandonner sa structure et son individualité ; il doit subir une mort de l'égo, en quelque sorte, pour retourner à sa source. » [Fitjof Capra]

11.1 Synthèse des opérations de recherche

Les efforts réalisés et récemment initiés – au sein des trois opérations de recherche abordées lors des chapitres précédents – ont ouvert pour chacune d'elles des perspectives de recherche prometteuses. Le synoptique des contributions scientifiques, présenté à la Figure 11.1 page suivante, met en valeur les contributions réalisées et leurs articulations depuis mes travaux de thèse et de post-doc. Ceci souligne également notre intention première de vouloir proposer des travaux de recherche en alliant cohérence, originalité et qualité.

La première opération de recherche (OP₁) nous a permis de faire évoluer les approches de conception pour l'X en considérant le métier de assemblage, puis celui de la fabrication additive avec une orientation assemblage et récemment l'impression 4D. Nous sommes alors passés d'une intégration mono-métier à multi-métier ouvrant le besoin de considérer désormais plusieurs disciplines, où les questions de compromis, de combinaisons voire d'hybridation sont à développer pour le futur, pour véritablement converger vers une solution adaptée à son cycle de vie [Thompson *et al.*, 2016 ; André, 2018]. La chronologie des domaines métier abordés en conception nous amène progressivement à considérer les phénomènes naturels comme source d'inspiration. Ceci demande par conséquent d'élargir l'intégration à d'autres disciplines pour adresser les enjeux du biomimétisme en ingénierie du couple produit-process [Kuang *et al.*, 2018].

Les avancées scientifiques, inscrites au sein de l'opération de recherche OP₂, ont apporté des démarches pour structurer des espaces de conception propices à l'intégration de connaissances métier [Harding, 2017]. Celles-ci ont également ouvert des opportunités pour développer des approches d'ingénierie générative intégrant les flux multi-physiques couplées à de l'intelligence computationnelle [Kusiak & Salustri, 2007 ; Hamel *et al.*, 2019], où le concept de voxel a un rôle à jouer [Bader *et al.*, 2018]. Sur la base de ces enjeux, les approches PLM doivent pouvoir évoluer en conséquence, afin de couvrir la gestion d'algorithmes génératifs et également la description de modèles via différentes échelles et différentes dimensions [Doubroski *et al.*, 2015 ; Bader *et al.*, 2018].

Enfin les briques, proposées dans l'opération de recherche OP₃, ont amorcé une fondation théorique et sémantique prometteuse visant à opérer une évolution dimensionnelle au niveau des approches de conception proactive pour l'X, de modélisation géométrique et de gestion d'informations techniques du couple produit-process. Sur la base de ces opportunités scientifiques dérivées de nos efforts, une thématique émergente commence à se dégager, celle-ci est décrite dans la section ci-après.

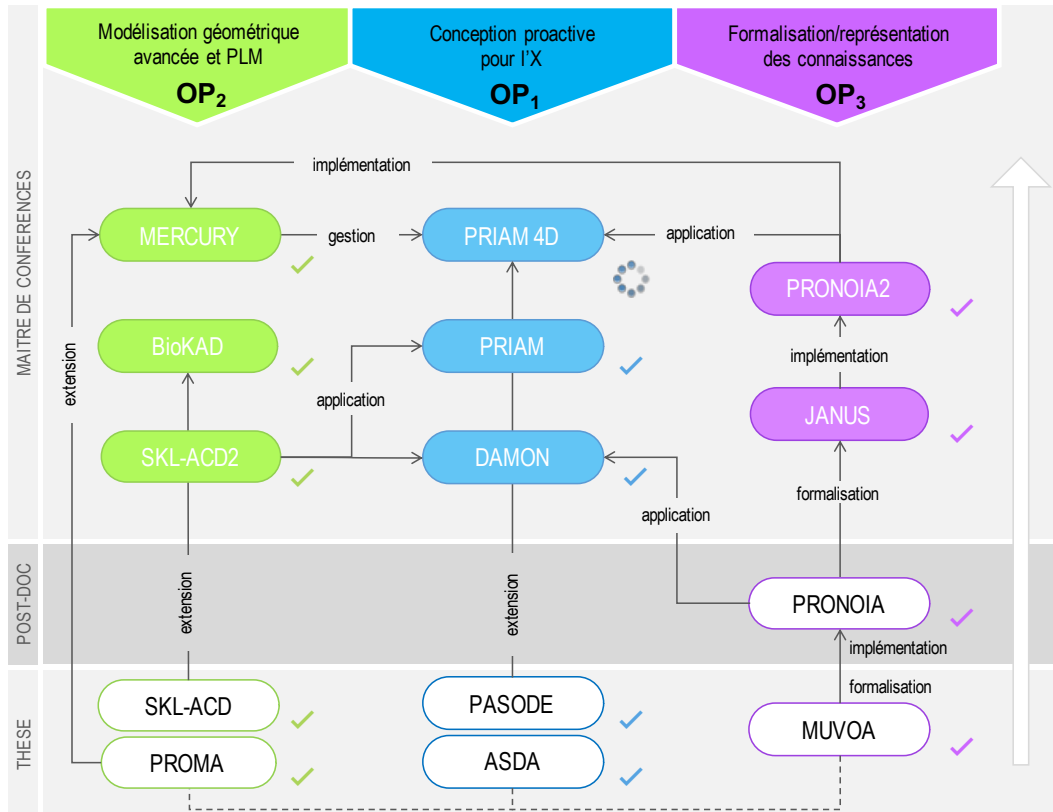


FIGURE 11.1 – Synoptique des contributions scientifiques.

11.2 La voie des systèmes transformables par impression 4D

Au cours des deux dernières décennies, l'industrie manufacturière a progressivement été contrainte à augmenter les capacités des produits/systèmes et à réduire leurs cycles de vie en garantissant un certain niveau de flexibilité et d'efficacité, notamment dans la phase de développement où les activités de conception et les décisions ont un impact important sur les processus situés en aval (i.e. fabrication, assemblage, etc.) [Demoly, 2010]. Ceci a été réalisé avec succès en considérant (i) la capture et l'intégration des contraintes et des connaissances du cycle de vie dans la conception de produits mécaniques, (ii) l'intégration d'autres disciplines telles que l'électronique dans la conception de systèmes mécatroniques et (iii) l'intégration de capacité de traitement de données à l'ère de l'Internet des objets pour les objets connectés plus récemment [Kiritsis, 2013] (voir les encadrés en gris sur la Figure 11.2).

La Figure 11.2, introduite à la page suivante, montre que de tels systèmes ont fait l'objet de résultats intéressants et fructueux en termes de théories, de modèles, d'approches et d'outils d'ingénierie avec un haut niveau de maturité⁸⁵ (niveaux 4 à 5). Une tendance prometteuse consiste à augmenter la sensibilité/réactivité et l'intelligence des systèmes/produits une fois fabriqués en fonction des besoins des

85. Level 1 : Ad-hoc ; Level 2 : Repeatable ; Level 3 : Defined ; Level 4 : Managed ; Level 5 : Optimizing.

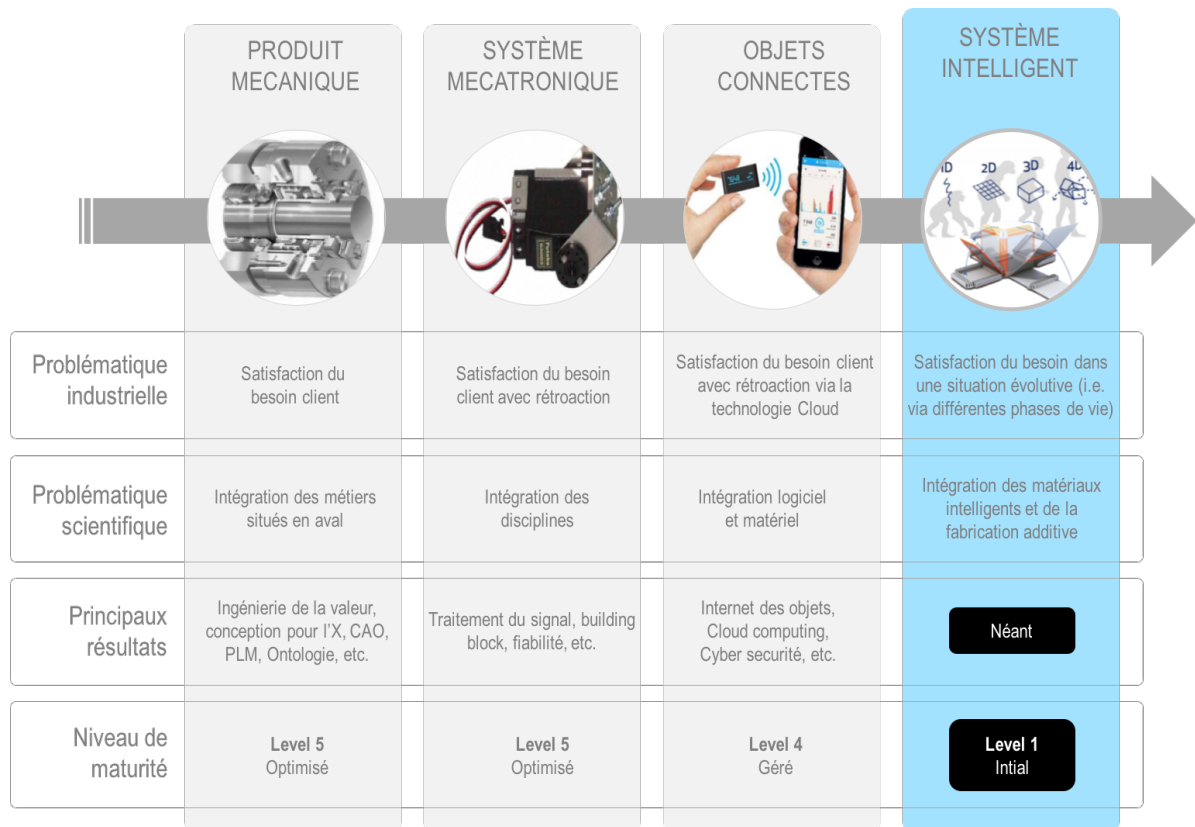


FIGURE 11.2 – Evolution des types de produit et des enjeux industriels et scientifiques associés.

utilisateurs, donc naturellement à prolonger leur durée de vie en fournissant une configuration d'utilisation appropriée dans un contexte et un environnement d'utilisation spécifiques [Burman *et al.*, 2000; Christoforou *et al.*, 2015] (voir l'encadré en bleu sur la Figure 11.2). Au cours des cinq dernières années, l'émergence des produits/systèmes intelligents (i.e. capables de s'adapter à leur environnement, de se déployer, de s'auto-assembler, de se réparer, de détecter leur environnement et de réagir de manière programmable) et des technologies innovantes de fabrication additive ont nécessité de réviser profondément les méthodes de conception et d'ingénierie actuelles, afin de fournir des définitions de produits dynamiques (i.e. géométrie du produit incorporant des matériaux fonctionnels couplée à une logique de transformation) à différents niveaux de description (e.g. bâtiment, assemblage mécanique, matériau, etc.) [Ge *et al.*, 2013]. De telles initiatives restent encore « *ad hoc* » du point de vue de la maturité et méritent d'être intensivement explorées dans les années à venir [Khoo *et al.*, 2015; Kuang *et al.*, 2018].

A ceci s'ajoute une tendance innovante – favorisée par les capacités uniques des techniques de fabrication additive – portant sur le paradigme de « 4D Printing ». Ceci concerne plus particulièrement le processus par lequel sont imprimés les assemblages et les pièces intégrant des matériaux intelligents, capables de réagir aux changements de paramètres dans leur environnement. Cette nouvelle manière de penser et de fabriquer demeure assez vierge au regard des travaux de recherche existants sur les modèles et méthodes permettant de conduire les concepteurs de l'idée jusqu'à la réalisation de systèmes intelligents. Comme le montre la Figure 11.3 portant sur l'évolution de technologies émergentes, les technologies associées aux 4D printing est mis en évidence comme un domaine de recherche prometteur (actuellement classé comme innovation amorcée) encore embryonnaire, basé sur l'interaction de la fabrication additive et des matériaux intelligents pour construire des objets actifs/vivants en fonction de stimuli externes (e.g. température, pH, lumière, électricité, force mécanique, force magnétique, etc.) [Tibbits, 2014]. En ce qui concerne les matériaux programmables, la matière a la capacité de modifier ses propriétés physiques (e.g.

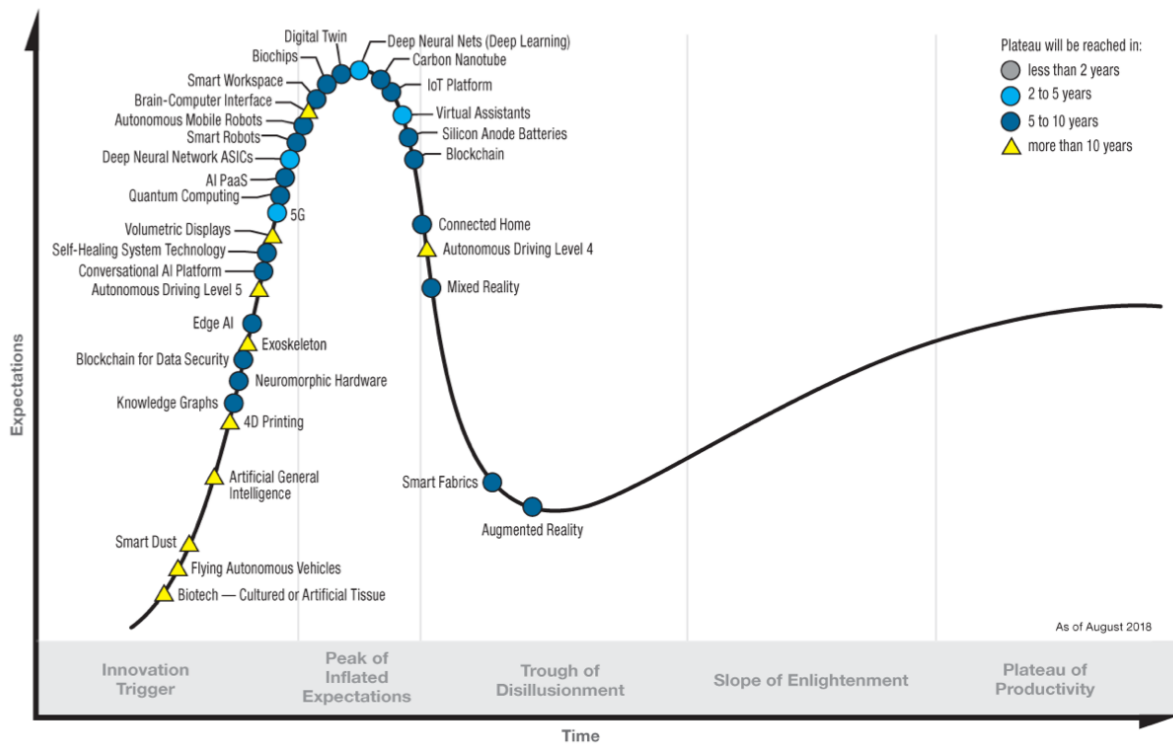


FIGURE 11.3 – « Cycle du Hype » sur l'évolution des technologies émergentes [Gartner, 2018].

forme, densité, propriétés optiques, etc.) d'une manière planifiée via une capture/détection *in situ*. A titre d'exemple, le constructeur automobile BMW a récemment célébré son dernier prototype, baptisé Vision Next 100⁸⁶, avec le concept de « *alive geometry* » ayant des propriétés dynamiques. Ce type de véhicule a notamment pu être développé et réalisé via l'utilisation des outils logiciel Rhino/Grasshopper et des opportunités offertes par l'association de la fabrication additive et des matériaux programmables.

11.3 Structuration de la thématique scientifique

Parmi les opportunités scientifiques à saisir, nous avons naturellement décidé de construire un axe scientifique plus large, afin d'adapter notre théorie, nos modèles et nos méthodes aux systèmes émergents présentés à la section précédente. Sur la base de ces éléments contextuels, il convient de constater que la transdisciplinarité inhérente au domaine émergent de l'impression 4D tend à élargir les thématiques de recherche que nous souhaitons entreprendre au cours des prochaines années. Dès lors, le projet de recherche proposé se concentre sur le développement de :

Théorie, modèles, méthodes et outils pour l'ingénierie de systèmes transformables (i.e. déployables, adaptables, reconfigurables, etc.) réalisés par l'interaction entre la fabrication additive et les matériaux intelligents (4D printing).

Dans le cadre de cette thématique, trois projets de recherche articulés – visant à structurer une équipe de recherche transversale au sein du laboratoire ICB et fédérant ainsi des chercheurs issus de disciplines différentes – sont introduits ci-après. Dans un premier temps, nous proposons de renforcer nos opérations de recherche existantes mais également d'en définir des nouvelles. Une nouvelle dimension – couverte

86. <https://www.bmwgroup.com/en/next100/brandvisions.html>

par la dynamique de ces systèmes et apportée par l'impression 4D – concerne plus particulièrement le temps. En effet, le fait de devoir développer des systèmes dynamiques et évolutifs au cours du temps va nécessiter de revoir en premier lieu les théories de description des objets aux niveaux des dimensions spatiales, temporelles et spatio-temporelles. Pour ce faire, nous exploiterons les résultats de l'opération de recherche OP₃ sur les raisonnements sémantiques et logiques en conception, afin de couvrir les changements inhérents aux systèmes transformables à différentes échelles. Cette extension de l'opération de recherche OP₃ est raisonnablement en bonne voie, de part le récent financement du projet de recherche HERMES⁸⁷ – labellisé PIA⁸⁸ dans le cadre de l'I-SITE BFC 2018 (Grant No. ANR-15-IDEX-03), et qui a pour objectifs :

- d'élaborer une théorie fondationnelle capable de décrire d'un point de vue logique et sémantique les connaissances des phénomènes dynamiques à différentes échelles (i.e. bâtiment, assemblage mécanique, matériau, etc.) associés à l'intelligence des systèmes réalisés via la fabrication additive et les matériaux intelligents ;
- de développer une ontologie active modulaire pour le raisonnement sémantique et logique ;
- d'implémenter une application prototype dédiée aux mécanismes numériques/génératifs et couplée à un système CAO pour la définition de modèles géométriques dynamiques – enrichis par la sémantique et la logique – prêts à être fabriqués par impression 4D.

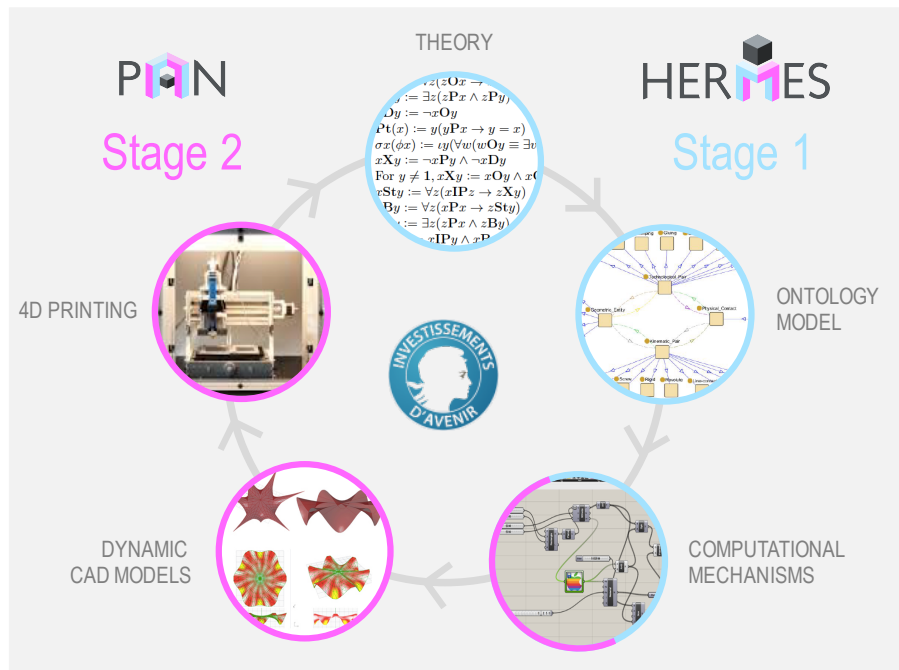


FIGURE 11.4 – Articulation des projets ISITE BFC HERMES et Région BFC PAN.

De manière articulée avec cet axe de recherche (voir cercles bleus de la Figure 11.4), nous envisageons de pouvoir initier le développement d'algorithmes génératifs de structures organiques et cellulaires bio-inspirées. Le but est d'étendre nos opérations de recherche OP₁ et OP₂ en termes de méthodologies de modélisation géométrique avancée et de créer une opération dédiée à la prise en compte du biomimétisme pour le développement des structures, des formes et des comportements des systèmes (voir cercles roses de la Figure 11.4). Cette voie est actuellement préparée via un projet de recherche, baptisé PAN⁸⁹, en

87. spatiotemporal semantics and logical knowledge description of mecHanical objEcts in the era of 4D pRinting and programmable Matter for nExt-generation of CAD systemS

88. Projet d'Investissement d'Avenir

89. ConcePtion proActive et représentation géométrique de structures transformables et actives réalisées par impressioN 4D

cours d'évaluation au niveau de la région BFC, et visant à :

- marier différentes approches de conception/modélisation utilisant des techniques mathématiques de type géométrie différentielle dédiée au « rigging » (i.e. squelette) et « skinning » (peau), permettant de considérer la structuration des organismes biologiques possédant une certaine faculté d'adaptation (e.g. reptiles, poissons, etc.);
- co-concevoir les surfaces et la structure interne des mécanismes intelligents afin de contenir les sollicitations mécaniques;
- représenter de manière dynamique les modèles bio-inspirés via les outils d'algorithmes graphiques (plugin Grasshopper) couplés à un système CAO (outil Rhinoceros 3D), notamment via des modèles prédictifs intégrant les lois de comportement des matériaux intelligents;
- fabriquer les systèmes transformables par le biais d'imprimantes *ad hoc* (e.g. technique DIW, ou technique combinée voire hybride) voire de machines industrielles exploitant le procédé Polyjet. A ce sujet, la région BFC vient de nous financer une machine Stratasys Objet Connex 260.

Enfin, un troisième axe de recherche – envisagé dans le cadre d'un projet ANR JCJC⁹⁰ récemment soumis et appelé LYRA⁹¹ – vise à étendre les opérations de recherche OP₁ et OP₂ tout en s'appuyant sur les projets HERMES et PAN. Pour ce faire, la Figure 11.5 présente les éléments principaux à développer tout en s'appuyant sur les compétences des chercheurs du laboratoire ICB mais également des chercheurs nationaux et internationaux.

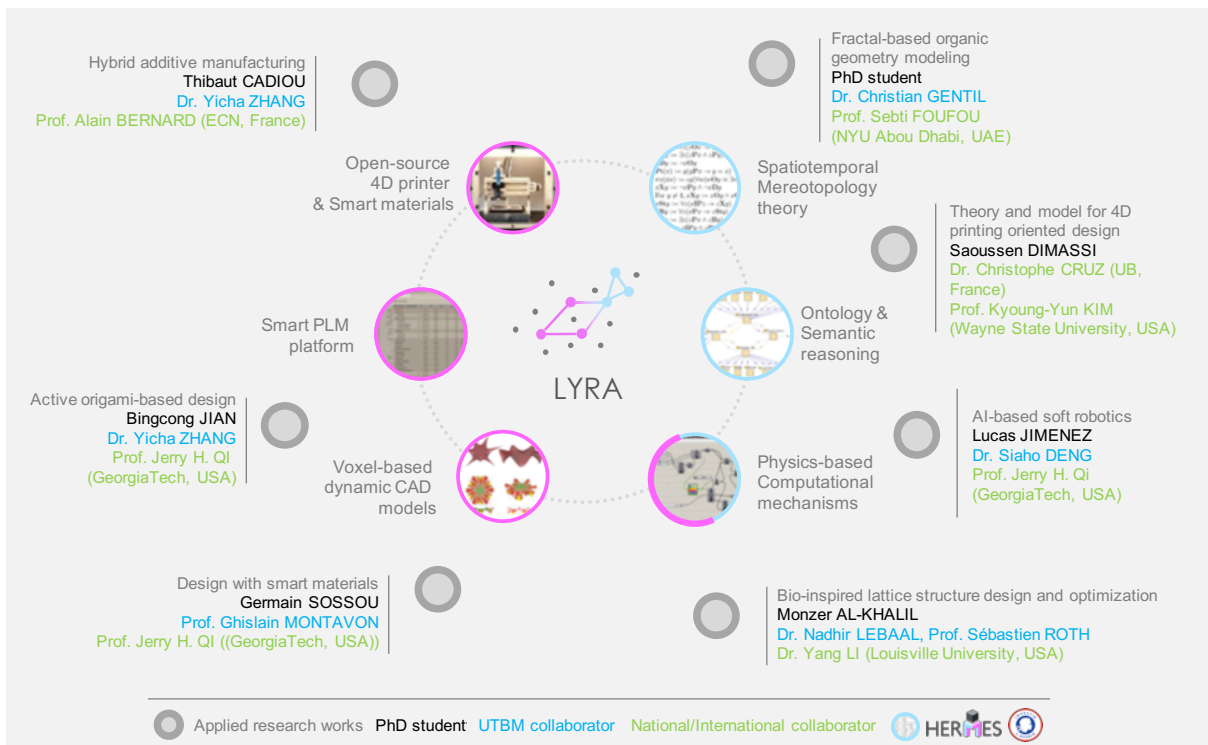


FIGURE 11.5 – Portée du projet ANR JCJC LYRA.

Les objectifs opérationnels de LYRA sont de :

- développer une stratégie de conception de la transformation guidée par des simulations numériques qualitatives et la considération de gammes de fabrication additive associées;

90. Jeune Chercheure – Jeune Chercheur

91. Integrated design and process planning strategies for transformable products by 4D printing

-
- enrichir l'écosystème PLM afin d'assurer (i) la continuité et la cohérence des informations en s'appuyant sur des ontologies et des raisonnements sémantiques, (ii) intégrer des algorithmes génératifs basés sur la physique et la planification de gammes de fabrication dans une chaîne numérique ;
 - développer des modèles CAO multi-matériau et dynamiques en se basant sur les voxels pour représenter des déformations qualitatives à différentes échelles dans l'ère des matériaux numériques ;
 - développer des équipements prototypes orientés multi-matériau (e.g. combinant les techniques DIW et FDM) accompagnés de matériaux réactifs aux stimuli [Diaz Lantada, 2017].

L'objectif général est de concevoir et de fabriquer des systèmes transformables en utilisant des plateformes et outils logiciels *open-source*. De cette manière, le projet LYRA permet d'articuler les travaux de thèse des doctorants que j'encadre et qui travaillent déjà sur ces sujets. Cela concerne plus particulièrement Saoussen DIMASSI, Bingcong JIAN, Monzer AL-KHALIL, Thibaut CADIOU, Germain SOSSOU et Lucas JIMENEZ. Ces projets de recherche visent donc à obtenir une lisibilité sur cette thématique à l'échelle du laboratoire ICB, de l'UTBM et au niveau national/international.

Bibliographie

- [Adam & Zimmer, 2014] Adam G.A.O. and Zimmer D., Design for additive manufacturing element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, 7(1), pp. 20-28.
- [AFM, 2015] AFM, Livre blanc de la recherche en mécanique – Enjeux industriels et sociétaux : recherche, innovation, formation, Edp Sciences, 2015, 276p.
- [Allen, 1983] Allen J.F., Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 1983, 26(11), pp. 832-843.
- [Alizon *et al.*, 2009] Alizon F., Shooter S.B. and Sumpson T.W., Henry Ford and the Model T : lessons for product platforming and mass customization, *Design Studies*, 30(5), 2009, pp. 588-605.
- [André, 2017] André J.-C., From additive manufacturing to 3D/4D printing 1 : From concepts to achievements. Wiley-ISTE, 2017, 355p.
- [André, 2018] André J.-C., From additive manufacturing to 3D/4D printing 3 : Breakthrough innovations : Programmable material, 4D printing and bio-printing. Wiley-ISTE, 2017, 468p.
- [Ardente *et al.*, 2003] Ardente F., Beccali G. and Cellura M., Eco-sustainable energy and environmental strategies in design for recycling : the software “ENDLESS”. *Ecological Modelling*, 163, 2003, pp. 101-118.
- [Armstrong, 2017] Armstrong R., Star Ark – A living, Self-Sustaining Spaceship, Springer Praxis Book, 2017, 492p.
- [Arp *et al.*, 2015] Arp R., Smith, B. and Spear A. D., Building Ontologies with Basic Formal Ontology. Cambridge, MA : MIT Press, 2015, ISBN : 978-0-262-52781-1, 220p.
- [Asher & Vieu, 1995] Asher N. and Vieu L., Towards a geometry of common sense : a semantics and a complete axiomatisation of mereotopology. In : Proceedings of IJCAI-95, Montréal, Québec, Canada, 1995, pp. 846-852.
- [Baader *et al.*, 2007] Baader F., Calvanese D., McGuinness D., Nardi D., Patel-Schneider P.F., The Description Logic Handbook : theory, implementation, and applications. second ed., Cambridge University Press, 2007.
- [Bader *et al.*, 2018] Bader C., Kolb D., Weaver J.C., Sharma S., Hosny A., Costa J. and Oxman N., Making data matter : voxel printing for the digital fabrication of data across scale and domains. *Science Advances*, 2018, 4, 12p.
- [Ballu *et al.*, 2006] Ballu A., Falgarone H., Chevassus N., Mathieu L., A new design method based on functions and tolerance specifications for product modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2006, 55(1), pp. 139-142.
- [Bandyopadhyay *et al.*, 2009] Bandyopadhyay A., Krishna B.V., Xue W. and Bose S., Application of laser engineered net shaping (lens) to manufacture porous and functionally graded structures for load bearing implants. *Journal of Materials Science : Materials in Medicine*, 2009, 20 Suppl 1, pp. 29-34.
- [Barnes *et al.*, 2004] Barnes C.J., Jared G.E.M. and Swift K.G., Decision support for sequence generation in an assembly oriented design environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20, 2004, pp. 289-300.

- [Batres *et al.*, 2007] Batres R., West M., Leal D., Price D. and Naka Y., An Upper Ontology Based on ISO 15926. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, 31, pp. 519-534.
- [Batsakis & Petraki, 2011] Batsakis S. and Petrakis E., SOWL : a framework for handling spatio-temporal information in OWL 2.0. In : Rule-Based Reasoning, Programming, and Applications, Springer, 2011, pp. 242-249.
- [Baxter *et al.*, 2007] Baxter D., Gao J., Case K., Harding J., Young B., Cochrane S. and Dani S., An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling. *Research in Engineering Design*, 18(1), 2007, pp. 37-48.
- [Becker *et al.*, 2005] Becker R., Grzesiak A. and Henning A., Rethink assembly design. *Assembly Automation*, 2005, 25(4), pp. 262-266.
- [Behl *et al.*, 2013] Behl M., Kratz K., Zotzmann J., Nochel U. and Lendlein A., Reversible bidirectional shape-memory polymers. *Advanced Materials*, 2013, 25(32) : p. 4466-4469.
- [Behr *et al.*, 2009] Behr J., Eschler P., Jung Y. and Zöllner M., X3DOM : a DOM-based HTLM5/X3D integration model. Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology, June 16-17, 2009, Darmstadt, Germany, pp. 127-135.
- [Bergson, 1923] Bergson H., Creative Evolution. New York : H. Holt and Company, 1923.
- [Bin Maidin *et al.*, 2012] Bin Maidin S., Campbell I. and Pei E., Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. *Assembly Automation*, 2012, 32(3), pp. 235-244.
- [Biswas *et al.*, 2004] Biswas A., Shapiro V. and Tsukanov I., Heterogeneous material modeling with distance fields. *Computer Aided Geometric Design*, 2004, 21(3), pp. 215-242.
- [Bittner *et al.*, 2006] Bittner T., Donnelly M. and Smith B., A spatio-temporal ontology for geographic information integration. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, 23(6), pp. 765-798.
- [Bodein *et al.*, 2014] Bodein Y., Rose B. and Caillaud E., Explicit Reference Modeling Methodology in Parametric CAD System. *Computers in Industry*, 2014, 65(1), pp. 136-147.
- [Boothroyd *et al.*, 2002] Boothroyd G., Dewhurst P. and Knight W., Product design for manufacture and assembly, 2nd edn. Marcel Dekker, New York, 2002.
- [Borg *et al.*, 1999] Borg C.J., Yan X.-T. and Juster N., Guiding component form design using decision consequence knowledge support. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 13, 1999, pp. 387-403.
- [Bouffaron, 2014] Bouffaron P., Impression 3D : Les prémisses d'une nouvelle (r)évolution industrielle ?, Rapport d'Ambassade / Consulat Général De France à San Francisco, Californie, Septembre 2014.
- [Boujut & Laureillard, 2002] Boujut J.-F. and Laureillard P., A co-operation framework for product-process integration in engineering design. *Design Studies*, 23(6), 2002, pp. 497-513.
- [Bralla, 1999] Bralla J., The design for manufacturability handbook, 2nd edn. McGraw-Hill, New York, 1999.
- [Brissaud & Tichkiewitch, 2000] Brissaud D. and Tichkiewitch S., Innovation and manufacturability analysis in an integrated design context. *Computers in Industry*, 43, 2000, pp. 111-121.
- [Brown, 2006] Brown J., Managing product relationships : Enabling iteration and innovation in design. Business Value Research Series, June, AberdeenGroup, 2006.
- [Burman *et al.*, 2000] Burman A., Moster E. and Abrahamsson P., On the Influence of Functional Materials on Engineering Design. *Research in Engineering Design*, 2000, 12(1), pp. 39-47.
- [Camba *et al.*, 2016] Camba J.D., Contero M. and Company P., Parametric CAD modeling : An analysis of strategies for design reusability. *Computer-Aided Design*, 2016, 74, pp. 18-31
- [CETIM, 2015] CETIM, Technologies prioritaires 2020 en Mécanique, Les Ouvrages du CETIM, 2015, 143p.

-
- [Chandrasegaran *et al.*, 2013] Chandrasegaran S.K., Ramani K., Sriram R.D., Horváth I., Bernard A., Harik R.F. and Gao W., The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-Aided Design*, 45(2), 2013, pp. 204-228.
- [Chang, 2008] Chang X., Ontology development and utilization in product design, Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [Charlton & Wallace, 2000] Charlton C. and Wallace K., Reminding and context in design. Proceedings of Artificial Intelligence in Design, 2000, Massachusetts, USA, pp. 596-588.
- [Chen *et al.*, 2009] Chen Y.-J., Chen Y.-M. and Chu H.-C., Development of a mechanism for ontology-based product lifecycle knowledge integration, *Expert Systems with Applications*, 36(2), 2009, pp. 2759-2779.
- [Chen *et al.*, 2012] Chen X., Gao S., Yang Y. and Zhang S., Multi-level assembly model for top-down design of mechanical products. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(10), pp. 1033-1048.
- [Chen & Chen, 2014] Chen Y.-J. and Chen Y.-M., Demand-driven knowledge acquisition method for enhancing domain ontology integrity. *Computers in Industry*, 65, 2014, pp. 1085-1106.
- [Cheutet, 2012] Cheutet V., 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, 2012.
- [Choong *et al.*, 2017] Choong Y.Y.C., Maleksaeedi S., Eng H., Wei J. and Su P.-C., 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography. *Materials & Design*, 2017, 126, pp. 219-225.
- [Christoforou *et al.*, 2015] Christoforou E.G., Müller A., Phocas M.C., Matheou M. and Arnos S., Design and Control Concept for Reconfigurable Architecture. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137(4), 8p.
- [Chu *et al.*, 2016] Chu D., Chu X., Li Y., Lyu G. and Xue D., A multi-skeleton modelling approach based on top-down design and modular product design for development of complex product layouts. *Journal of Engineering Design*, 2016, 27(10), pp. 725-750.
- [Ciocoiu *et al.*, 2001] Ciocoiu M., Nau D.S. and Gruninger M., Ontologies for integrating engineering applications. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, 1(1), 12p.
- [Clare *et al.*, 2008] Clare A.T., Chalker P.R., Davies S., Sutcliffe C.J. and Tsopanos S. Selective Laser Melting of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures two way trained for MEMS applications. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2008, 4(2), pp. 181-187.
- [Clément *et al.*, 1994] Clément A., Rivière A. and Temmerman M., Cotation tridimensionnelle des systèmes mécaniques. PYC Edition 1994.
- [CGET, 2015] Commissariat Général à l'Égalité des Territoires (CGET), Synthèse des stratégies régionales de l'innovation en vue des la spécialisation intelligente des régions, Europ'Act, 112p.
- [Darlington 2008] Darlington M.J. and Culley S.J., Investigating ontology development for engineering design support. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 2008, pp. 112-134.
- [Descartes, 1647] Descartes R., Méditations métaphysiques, in F. Alquié (ed.) Oeuvres, vol. II, Paris : Garnier, 1647.
- [DATAR, 2012] Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale (DATAR), Guide pour la préparation des stratégies de spécialisation intelligente des régions françaises, Europ'Act, République française et Union européenne, 2012, 48p.
- [Del Mondo *et al.*, 2010] Del Mondo G., Stell J.G., Claramunt C. and Thibaud R., A Graph Model for Spatiotemporal Evolution. *Journal of Universal Computer Science*, 2010, 16 (11), pp. 1452-1477.
- [Del Mondo, 2011] Del Mondo G., Un modèle de graphe spatio-temporel pour représenter l'évolution d'entités géographiques. Thèse de l'Université de Brest, 2011.
- [Demoly, 2010] Demoly F., Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2010.

- [Demoly *et al.*, 2010a] Demoly F., Monticolo D., Eynard B., Rivest L., Gomes S., Multiple viewpoint modelling framework enabling integrated product-process design, *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 2010, 4(4), pp. 269-280.
- [Demoly *et al.*, 2010b] Demoly F., Eynard B., Rivest L., Gomes S., PLM-based approach for assembly process engineering, *International Journal of Manufacturing Research*, 2010, 5(4), pp. 414-428.
- [Demoly *et al.*, 2011a] Demoly F., Troussier N., Eynard B., Falgarone H., Fricero B., Gomes S., Proactive assembly oriented design approach based on the deployment of functional requirements, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2011, 11(1), 014501-1.
- [Demoly *et al.*, 2011b] Demoly F., Yan X.-T., Eynard B., Rivest L., Gomes S., An Assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1), pp. 33-46.
- [Demoly *et al.*, 2011c] Demoly F., Toussaint L., Eynard B., Kiritsis D., Gomes S., Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning, *Computer-Aided Design*, 2011, 43(12), pp. 1654-1673.
- [Demoly *et al.*, 2012a] Demoly F., Yan X.-T., Eynard B., Kiritsis D., Gomes S. Integrated product relationships management : a model to enable concurrent product design and assembly sequence planning, *Journal of Engineering Design*, 2012, 23(7), pp. 544-561.
- [Demoly *et al.*, 2012b] Demoly F., Matsokis A., Kiritsis D., A mereotopological product relationship description approach for assembly oriented design, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(6), pp. 681-693.
- [Demoly *et al.*, 2013a] Demoly F., Dutartre O., Yan X.-T., Eynard B., Kiritsis D., Gomes S., Product relationships management enabler for concurrent engineering and product lifecycle management, *Computers in Industry*, 2013, 64(7), pp. 833-848.
- [Demoly *et al.*, 2013b] Demoly F., Pels H.J. and Gomes S., Proactive Engineering and PLM : Current Status and Research Challenges. 10th Product Lifecycle Management for Society (PLM), July 2013, Nantes, France. Springer, IFIP Advances in Information and Communication Technology, AICT-409, pp.170-181, 2013, Product Lifecycle Management for Society.
- [Demoly & Roth, 2017] Demoly F. and Roth S., Knowledge-based parametric CAD models of configurable biomechanical structures using geometric skeletons, *Computers in Industry*, 2017, 92-93, pp. 104-117.
- [Desai & Mital, 2003] Desai A. and Mital A., Evaluation of disassembly in mass production. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 32(4), 2002, pp. 265-281.
- [Dey, 2000] Dey A.K., Providing architectural support for building context-aware applications. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2000.
- [Diaz Lantada, 2017] Diaz Lantada A., Systematic development strategy for smart devices based on shape-memory polymers. *Polymers*, 2017, 9(10), pp. 496-515.
- [Doubroski *et al.*, 2015] Doubroski E.L., Tsai E.Y., Dikovsky D., Geraedts J.M.P., Herr H., Oxman N., Voxel-based fabrication through material property mapping : A design method for bitmap printing. *Computer Aided Design*, 2015, 60, pp. 3-13.
- [Dhuieb *et al.*, 2016] Dhuieb M.A., Florent L. and Alain B. Context-awareness : a key enabler for ubiquitous access to manufacturing knowledge. *Procedia CIRP* Proceedings of the 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 41, 2016, pp. 484-489.
- [Eckert *et al.*, 2016] Eckert C.M., Wynn D.C., Maier J.F., Albers A., Bursac N., Xin Chen H.L., Clarkson P.J. Gericke K. Gladysz B. and Shapiro D., On the integration of product and process models in engineering design. *Design Science*, 2017, 3(3), pp. 1-41.
- [EFFRA, 2013] European Factories of the Future Research Association (EFFRA), Factories of the future – Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020, 2013, 128p.
- [El Kadiri *et al.*, 2016] El Kadiri S., Grabot B., Thoben K.-D., Hribernik K., Emmanouilidis C., von Cierninski G. and Kiritsis D., Current trends on ICT technologies for enterprise information systems, *Computers in Industry*, 79, 2016, pp. 14-33.

-
- [Endsley, 1995] Endsley M.R., Towards a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 1995, pp. 32-64.
- [Espalin *et al.* 2014] Espalin D., Alberto Ramirez J., Medina F. and Wicker, R. Multi-material, multi-technology FDM : exploring build process variations. *Rapid Prototyping Journal*, 2014, 20(3), pp. 236-244.
- [Esther *et al.*, 2014] Esther L., Piselli A., Faucheu J., Delafosse D. and Del Curto B., Smart materials : development of new sensory experiences through stimuli responsive materials, Proceedings of the 5th STS Italia Conference, June 2014, Milan, Italy, pp. 367-382.
- [Fabian *et al.*, 2012] Fabian B., Kunz S., Konneggen M., Müller S. and Günther O., Access control for semantic data federations in industrial product-lifecycle management. *Computers in Industry*, 2012, 63, pp. 930-940.
- [Feigl, 2002] Feigl H., *Le « mental » et le « physique »*(1958), Paris, L'Harmattan, 2002.
- [Fensel *et al.*, 2007] Fensel D., Lausen H., Polleres A., de Bruijn J., Stollberg M., Roman D. and Domingue J., *Enabling Semantic Web Services. The Web Service Modeling Ontology*, Springer Verlag, 2007.
- [Fernandez *et al.*, 1997] Fernandez M., Gomez-Perez A. and Juristo N., *Methontology : from ontological art towards ontological engineering*. Technical report, 1997.
- [Filos, 2009] Filos E. Four years of 'Factories of the Future' in Europe : achievements and outlook. *International Journal of Computer of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 30(1), pp. 15-22.
- [Fortineau *et al.*, 2013] Fortineau V., Paviot T. and Lamouri S., Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models – the state of the art. *Computers in Industry*, 2013, 64(4), pp. 363-375.
- [Gagné, 1985] Gagné E.D., *The cognitive psychology of school learning*, Boston : Little, Brown and Company, 1985, 374 p.
- [Gallois, 2012] Gallois L., Lubin C. and Thiard P.-E., *Pacte pour la compétitivité de l'industrie française. Rapport au Premier ministre*. 5 Novembre 2012.
- [Gangemi *et al.*, 2002] Gangemi A., Guarino N., Masolo C., Oltramari A. and Schneider L., *Sweetening ontologies with DOLCE*. In Proceedings of the European Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling, and Management, (2002).
- [Gao *et al.*, 2016] Gao B., Yang Q., Zhao X., Jin G., Ma Y. and Xu F., 4D bioprinting for biomedical applications. *Trends Biotechnol.*, 2016.
- [Garland & Fadel, 2015] Garland A. and Fadel G., Design and manufacturing functionally gradient material objects with an off the shelf three-dimensional printer : Challenges and solutions. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137(11), 11p.
- [Gartner, 2018] 143 Gartner, *Gartner's 2018 Hype cycle highlight digital business ecosystems*, 2018, Report, August.
- [Ge *et al.*, 2013] Ge Q., Qi H.J. and Dunn M.L., Active materials by four-dimension printing. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(13), 131901.
- [Ge *et al.*, 2014] Ge Q., Dunn C.K., Qi J.H. and Dunn M.L., Active origami by 4D printing. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(9), 094007.
- [Gero & Smith, 2009] Gero J.S. and Smith G.J., Context, situations, and design agents. *Knowledge-Based System*, 2009, 22, pp. 600-609.
- [Ghazy, 2012] Ghazy M.M.S.A., *Development of an Additive Manufacturing Decision Support System (AMDSS)*. University of Newcastle upon Tyne, 2012.
- [Gibson *et al.*, 2009] Gibson I., Rosen D.W. and Stucker B., *Additive manufacturing technologies : rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2009.
- [Goffman, 1974] Goffman E., *Frame Analysis : An Essay of the Organization of Experience*, New York : Harper and Row, 1974.

- [Gomes, 2008] Gomes S., Ingénierie à base de connaissances pour une conception, productive, optimisée, collaborative et innovante du système Projet-Produit-Process-Usage. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne, 2008.
- [Gopsill *et al.*, 2013] Gopsill J.A., McAlpine H.C. and Hicks B.J., A social media framework to support engineering design communication. *Advanced Engineering Informatics*, 27(4), 2013, pp. 580-597.
- [Gruhier, 2015] Gruhier E., Spatiotemporal description and modeling of mechanical products and its assembly sequence based on mereotopology : Theory, model and approach, PhD Thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2015.
- [Gruhier *et al.*, 2016] Gruhier E., Demoly F., Kim K.-Y. and Gomes S., A theoretical framework for product relationships description over space and time in integrated design. *Journal of Engineering Design*, 2016, 27(4-6), pp. 269-305.
- [Gruhier *et al.*, 2017] Gruhier E., Demoly F. and Gomes S., A spatiotemporal information management framework for product design and assembly process planning reconciliation. *Computers in Industry*, 2017, 90, pp. 17-41.
- [Guarino, 1995] Guarino N., Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 1995, 43(5-6), pp. 625-640.
- [Haddad, 2009] Haddad H., Une approche pour supporter l'analyse qualitative des suites d'actions dans un environnement géographique virtuel et dynamique. PhD thesis, Université Laval, Département d'informatique, 2009.
- [Hadjieleftheriou *et al.*, 2002] Hadjieleftheriou M., Kollios G., Tsotras V. and Gunopulos D., Efficient Indexing of Spatiotemporal Objects. In *Advances in Database Technology*, edited by Jensen C.S., Jeffery K.G., Pokorny J., Saltenis S., Bertino E., Böhm K. and Jarke N., Prague : Springer, 2002, pp. 251-268.
- [Hallot, 2012] Hallot P., L'identité à travers l'espace et le temps. Vers une définition de l'identité et des relations spatio-temporelles entre objets géographiques. Thèse de l'Université de Liège, 2012.
- [Hahmann & Grüninger, 2012] Hahmann T. and Grüninger M., Region-based theories of space : Mereotopology and beyond. In *Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning : Trends and Future Directions*. IGI Publishing, 2012, pp. 1-62.
- [Hamel *et al.* 2019] Hamel C.M., Roach D.J., Long K.N., Demoly F., Dunn M.L. and Qi H.J., Machine-learning based design of active composites for 4D printing. *Smart Materials and Structures*, Under Review, 2019.
- [Harbelot *et al.*, 2015] Harbelot B., Arenas H. and Cruz C., LC3 : A spatio-temporal and semantic model for knowledge discovery from geospatial datasets. *Journal of Web Semantics*, 2015, 35(1), pp. 3-24.
- [Harik *et al.*, 2008] Harik R., Derigent W. and Ris G., Computer aided process planning in aircraft manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, 2008, 5(1-4), pp. 953-62.
- [Heidegger, 1927] Heidegger M., *Being and Time.*, 1927, State University of New York Press edition, 978-1-4384-3276-2, 589p.
- [Helms, 2002] Helms R.W., Product Data Management as enabler for Concurrent Engineering. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2002.
- [Hiller & Lipson, 2009] Hiller J. and Lipson H., Design and analysis of digital materials for physical 3D voxel printing, *Rapid Prototyping Journal*, 15(2), 2009, pp. 137-149.
- [Hiller & Lipson, 2010] Hiller J. and Lipson H., Tunable Digital Material Properties for 3D Voxel Printers. *Rapid Prototyping Journal*, 2010, 16(4), pp. 241-247.
- [Hirtz *et al.*, 2002] Hirtz J., Stone R.B., McAdams D.A., Szykman S. and Wood K.L., A functional basis for engineering design : Reconciling and evolving previous efforts. *Research in Engineering Design*, 2002, 13(2), pp. 65-82.
- [Holt & Barnes, 2010] Holt R. and Barnes C., Towards an integrated approach to "Design for X" : an agenda for decision-based DFX research. *Research in Engineering Design*, 21, 2010, pp. 123-136.

-
- [Hong *et al.*, 2009] Hong J., Suh E.-H., Kim J. and Kim S., Context-aware system for proactive personalized service based on context history. *Expert Systems with Applications*, 36, 2009, pp. 7448-7457.
- [Horrocks, 2007] Horrocks I., Semantic web : the story so far. In : ACM international conference proceedings. Proceedings of the 2007 international cross-disciplinary conference on web accessibility (W4A), Banff, Canada, 2007, 225, pp. 120-125.
- [Horváth, 2004] Horváth I., A treatise on order in engineering design research. *Research in Engineering Design*, 15(3), 2004, pp. 155-181.
- [Huang *et al.*, 1999] Huang, G.Q., Lee, S.W. and Mak, K.L., Web-based product and process data modeling in concurrent "design for X". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15, 2009, pp. 53-63.
- [Huang *et al.*, 2015] Huang Y., Leu M.C., Mazumder J. and Donmez A., Additive manufacturing : current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137(1), 10p.
- [Huisman *et al.*, 2003] Huisman J., Boks C.B. and Stevels A.L.N., Quotes for environmentally weighted recyclability (QWERTY) : concept of describing product recyclability in terms of environmental value. *International Journal of Production Research* 41, 2003, pp. 3649-3665.
- [Hull, 1986] Hull W. C., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US Patent 4575330 A, 1986.
- [Ishii *et al.*, 2012] Ishii H., Lakatos D., Bonanni L. and Labrune J.-B., Radical atoms : Beyond tangible bits, toward transformable materials, *Interactions*, 19(1), 2012, pp. 38-51.
- [ISO 159262, 2003] ISO 159262, Integration of lifecycle data for process plant including oil and gas production facilities. Part 2. Data model, 2003.
- [Jacobson *et al.*, 2014] Jacobson A., Deng Z., Kavan L. and Lewis J.P., Skinning : Real-time Shape Deformation. ACM SIGGRAPH 2014 Courses, August 10-14, 2014, Vancouver, Canada.
- [Jess Rule Engine, 2019] The Jess rule engine : <http://herzberg.ca.sandia.gov>. January 2019.
- [Jian *et al.*, 2018] Jian B., Demoly F., Zhang Y. and Gomes S., A design framework for multifunctional shape memory polymer by 4D printing, ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS), 2018, September 10-12, San Antonio, TX, USA.
- [Johnstone, 1983] Johnstone P., The point of pointless topology. *Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society*, 1983, 8(1), pp. 41-53.
- [Jun *et al.*, 2007] Jun H.-B., Kiritsis D. and Xirouchakis P., Research issues on closed-loop PLM. *Computers in Industry*, 2007, 58, pp. 855-868.
- [Jung *emphet al.*, 2016] Jung J.P., Bhuiyan D.B. and Ogle B.M., Solid organ fabrication : comparison of decellularization to 3D bioprinting, *Biomaterials research*, 2016, 20, 27.
- [Kataria & Rosen, 2001] Kataria A. and Rosen D.W., Building around inserts : methods for fabricating complex devices in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 2001, 7(5), pp. 253-262.
- [Kaufman *et al.*, 1993] Kaufman A., Cohen D. and Yagel R., Volume graphics. *Computer*, 1993, 26(7), pp. 51-64.
- [Khan *et al.*, 2017] Khan M.T.H., Demoly F. and Kim K.-Y., Formal ontology and CAD integration with macro parametric approach. *Computer-Aided Design and Applications*, 2017, 14, pp. 24-32.
- [Khan *et al.*, 2019] Khan M.T.H., Demoly F. and Kim K.-Y., A formal ontology-based framework for capturing dynamic assembly design information in heterogeneous CAD systems. *Journal of Engineering Design*, 2019, Accepted.
- [Khoo *et al.*, 2015] Khoo Z.X., Teoh J.E.M., Liu Y., Chua C.K., Yang S., An J., Leong K.F. and Yeong W.Y., 3D printing of smart materials : A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, 10(3), pp. 103-122.

- [Kohler & Weisz, 2015] Kohler D. and Weisz J.-D., Industrie 4.0 : quelles stratégies numériques ? La numérisation de l'industrie dans les entreprises du Mittelstand allemand, Publication Bpifrance Industrie 4.0, Novembre 2015 – Paris - Berlin.
- [Kim *et al.*, 2004] Kim K.-Y., Wang Y., Muogboh O.S. and Nanaji B.O., Design formalism for collaborative assembly design. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(9), pp. 849-871 ;
- [Kim *et al.*, 2006] Kim K.-Y., Manley D.G. and Yang H., Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development. *Computer-Aided Design*, 2006, 38, pp. 1233-1250.
- [Kim *et al.*, 2008] Kim K.-Y., Yang H. and Kim D.W., Mereotopological assembly joint information representation for collaborative product design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 24, pp. 744-754.
- [Kim & Kim, 2016] Kim K.-Y. and Kim Y. S., Causal design knowledge : Alternative representation method for product development knowledge management. *Computer-Aided Design*, 43(9), 2016n pp. 1137-1153.
- [Kimura *et al.*, 2007] Kimura, F., Matoba, Y. and Mitsui, K., Designing Product Reliability based on Total Product Lifecycle Modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 2007, pp. 163-166.
- [Kiritsis, 2013] Kiritsis D., Closed-loop PLM intelligent products in the era of the Internet of things. *Computer-Aided Design*, 2013, 43(5), pp. 479-501.
- [Kiritsis, 2013] Kiritsis D., Semantic technologies for engineering asset life cycle management, *International Journal of Production Research*, 2013, 51(23-24), pp. 7345-7371.
- [Knight & Curtis, 2002] Knight W. and Curtis M., Measuring your ecodesign. *Manufacturing Engineer*, 81(2), 2002, pp. 64-69.
- [Kranz *et al.*, 2015] Kranz J., Herzog D. and Emmelmann C., Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in tial6v4. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S1), p. S14001.
- [Kuang *et al.*, 2018] Kuang X., Roach D.J., Wu J. Hamel C.M., Ding Z., Wang T., Dunn M.L. and Qi H.J., Advanced in 4D printing : Materials and application. *Advanced Functional Materials*, 2018, 1805290.
- [Kumke *et al.*, 2016] Kumke M., Watschke H. and Vietor T., A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11(1), pp. 3-19.
- [Kuo *et al.*, 2001] Kuo, T.C., Huang, S.H.H. and Zhang, H.C., Design for manufacture and design for X : concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(3), 2001, pp. 241-260.
- [Kusiak & Salustri, 2007] Kusiak A. and Salustri F.A., Computational intelligence in product design engineering : review and trends. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 37(5), 2007, pp. 766-778.
- [Landers & Khurana, 2004] Landers D.M. and Khurana P., Horizontally-Structured CAD/CAM Modeling for Virtual Concurrent Product and Process Design, US Patent 6,775,581, 2004.
- [Lao Tseu, 1842] Lao Tseu (trad. Stanislas Julien), Le livre de la voie et de la vertu « Tao Te King », Paris, Imprimerie royale, 1842, 307 p.
- [Leahy, 2013] Leahy K., Promoting best practice design intent in 3D CAD for engineers through a task analysis. *American Journal of Engineering Research*, 2013, 2(5), pp. 71-77.
- [Lee & Kim, 2012] Lee H.J. and Kim J.H., Mining knowledge demands from information flow. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(8), pp. 6799-6806.
- [Lee *et al.*, 2017] Lee A.Y., An J. and Chua C.K., Two-way 4D printing : A review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials. *Engineering*, 2017, 3(5), pp. 663-674.
- [Leresche *et al.*, 2009] Leresche J.-P., Larédo P. and Weber K. Recherche et enseignement supérieur face à l'internationalisation : France, Suisse et Union européenne. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009, 408 p., ISBN 978-2-88074-818-0.

-
- [Leśniewski, 1982] Leśniewski S., On the foundations of mathematics, *Topoi*, 1982, 2, pp.7-52.
- [Lewis, 1986] Lewis D., On the Plurality of Worlds, Oxford, Blackwell, 1986.
- [Lin *et al.*, 2007] Lin C.-Y., Wirtz T., LaMarca F. and Hollister S.J., Structural and mechanical evaluations of a topology optimized titanium interbody fusion cage fabricated by selective laser melting process. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2007, 83A(2), pp. 272-279.
- [Lipson *et al.*, 2004] Lipson H., Moon F.C., Hai J. and Paventi C., 3-d printing the history of mechanisms. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 127(5), pp. 1029-1033.
- [Lipson & Kurman, 2013] Lipson H. and Kurman M., *Fabricated : The new world of 3D printing*, John Wiley & Sons (2013).
- [Lipton *et al.*, 2009] Lipton J., Cohen D., Heinz M., Lobovsky M., Parad W., Bernstien G., Li T., Quartiere J., Washington K., Umaru A., Masanoff R., Granstein J., Whitney J. and Lipson,H., *Fab@Home Model 2 : Towards Ubiquitous Personal Fabrication Devices*. Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF'09), August 3-5 2009, Austin, TX, USA.
- [Louihichi & Rivest, 2014] Louihichi B. and Rivest L., Maintening consistency between CAD elements in collaborative design using association management and propagation. *Computers in Industry*, 2014, 65(1), pp. 124-135.
- [Loux, 2017] Loux M.J. and Crisp T.M., *Metaphysics : A Contemporary Introduction*. Routledge, 2017.
- [Lu *et al.*, 2007] Lu S.C.Y., Elmaraghy W.H., Schuh G. and Wilhelm R.G., A scientific foundation of collaborative engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, 56(2), pp. 605-634.
- [Lucas, 1993] Lucas Engineering Systems Ltd, *Design for manufacture and assembly practitioners manual*, Version 10. University of Hull, 1993.
- [Madhusudan, 2005] Madhusudan, T., An intelligent mediator-based framework for enterprise application integration. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2005, 4, pp. 294-304.
- [Malone and Lipson, 2006] Malone E., Lipson H., *Fab@Home : The Personal Desktop Fabricator Kit*, Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium, August 2006, Austin, TX, USA.
- [Mao *et al.*, 2015] Mao, Y., Yu K., Isakov M.S., Wu J. Dunn M.L. and Qi J.K., Sequential Self-Folding Structures by 3D Printed Digital Shape Memory Polymers. *Scientific Reports*, 2015, 5,13616.
- [Marconnet, 2017] Marconet B., *Contexte augmenté basé sur les prédictions pour une réutilisation efficace des connaissances métier en conception – Application à la conception proactive pour l'assemblage*, Thèse de Doctorat, UBFC, UTBM, 2017.
- [Maropoulos & Ceglarek, 2010] Maropoulos, P.G. and Ceglarek, D., Design verification and validation in product lifecycle, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(2), 2010, pp. 740-759.
- [Masanet *et al.*, 2002] Masanet E., Auer R., Tsuda D. et al., An assessment and prioritization of “design for recycling?” guidelines for plastic components. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 6-9 May 2002, pp. 5-10.
- [Masclé & Balasoïu, 2003] Masclé C. and Balasoïu B.-A., Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19(5), 2003, pp. 439-448.
- [Matsokis & Kiritsis, 2010] Matsokis A., Kiritsis D., An ontology-based approach for Product Lifecycle Management, *Computers in industry*, 2010, 61(8), pp. 787-797.
- [Maute *et al.*, 2015] Maute K., Tkachuk A., Wu J., Qi H.J., Ding Z. and Dunn M.L., Level Set Topology Optimization of Printed Active Composites. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137(11), 13p.
- [McKay *et al.*, 2015] McKay A., Stiny G., de Pennington A., Principles for the Definition of Design Structures, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(3), pp. 237-250.
- [McKinney *et al.*, 1996] McKinney K., Kim J., Fischer M. and Howard C., Interactive 4d-CAD. Proceedings of the Third Congress on Computing in Civil Engineering, Anaheim, June 17-19, 1996, pp. 383-389.

- [McKinnon, 2002] McKinnon N., The Endurance/Perdurance Distinction. *The Australasian Journal of Philosophy*, 2002, 80(3), pp. 288-306.
- [McMahon *et al.*, 2004] McMahon C., Lowe A. and Culley S., Knowledge management in engineering design : personalization and codification. *Journal of Engineering Design*, 15(4), 2004, pp. 307-325.
- [Mejia *et al.*, 2007] Mejia R., Lopez A. and Molina A., Experiences in developing collaborative engineering environments : An action research approach. *Computers in Industry*, 2007, 58, pp. 329-346.
- [Miyakawa & Ohashi, 1986] Miyakawa S. and Ohashi T., The Hitachi assemblability evaluation method (AEM). Proceedings of the first international conference on product design for assembly, Newport, RI, April 1986.
- [Motschnig-Pitrik, 2000] Motschnig-Pitrik R. A generic framework for the modeling of contexts and its applications, *Data & Knowledge Engineering*, 2000, 32(2), pp. 145-180.
- [Mouton, 2014] Mouton C., Parfouru S., Jeulin C., Dutertre C., Goblet J.-L., Paviot T., Lamouri S., Limper M., Stein C., Behr J., and Jung Y., Enhancing the plant layout design process using X3DOM and a scalable web3D service architecture. Proceedings of the 19th International ACM Conference on 3D Web Technologies, Vancouver, British Columbia, Canada, August 8-10, 2014, pp. 125-132.
- [Nealen *et al.*, 2006] Nealen A., Mller M., Keiser R., Boxerman E. and Carlson M., Physically based deformable models in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, 2006, 25(4), pp.809-836.
- [O'Brien *et al.*, 2017] O'Brien B., Weafer F.M. and Bruzzi M.S., Shape memory alloys for use in Medecine. *Comprehensive Biomaterials II*, 2017, 1, pp. 50-78.
- [Okereke & Keates, 2018] Okereke M. and Keates S., Direct Stiffness Method. Finite Element Applications : A Practical Guide to the FEM Process. 2018, Springer International Publishing : Cham. pp. 47-106.
- [Peachavanish *et al.*, 2016] Peachavanish R., Karimi H.A., Akinci B. and Boukamp F., An ontological engineering approach for integrating CAD and GIS in support of infrastructure management. *Advanced Engineering Informatics*, 2006, 20(1), pp. 71-88.
- [Pease *et al.*, 2002] Pease A., Niles I. and Li J., The Suggested Upper Merged Ontology : A large ontology for the Semantic Web and its applications. In Working Notes of the AAAI-2002 Workshop on Ontologies and the Semantic Web, 2002.
- [Pellet, 2019] Pellet Reasoner : <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Pellet/>. January 2019.
- [Peng *et al.*, 2017] Peng G., Wang H., Zhang H. Zhao Y. and Johnson A.L., A collaborative system for capturing and reusing in-context design knowledge with an integrated representation model. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 2017, pp. 314-329.
- [Petersen, 2012] Petersen T., Explicating eternalism - A study in metaontology. *Philosophia Naturalis*, 2012, 49(1), pp. 137-161.
- [Petrazoller *et al.*, 2013] Petrazoller N., Demoly F., Deniaud S. and Gomes S., Towards a knowledge-intensive framework for top-down design context definition, Advances Production Management Systems Conference, September 2013, Penn State, USA.
- [Plutarque, 1853] Plutarque, Vie des hommes illustres. Traduction par Pierron A., Charpentier, 1853.
- [Ponche *et al.*, 2014] Ponche R., Kerbrat O., Mognol P. and Hascoet J.-Y., A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(4), pp. 389-398.
- [Popescu *et al.*, 2006] Popescu G.A., Mahale T. and Gershenfeld N., Digital Material for Digital Printing. Proceedings of Digital Fabrication, 2006, September 17-22, Denver, CO, USA, pp. 55-57.
- [Prasad, 1996] Prasad B., Concurrent Engineering fundamentals : Integrated Product and Process Organization, Prentice Hall, 1996, p. 502.
- [Prasad, 1999] Prasad B., Enabling principles of concurrency and simultaneity in concurrent engineering. *Artificial for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing*, 1999, 13, pp. 185-204.

-
- [Pschetz & Bastian, 2017] Pschetz L. and Bastian M., Temporal Design : Rethinking time in design. *Design Studies*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.10.007>
- [Rachuri *et al.*, 2006] Rachuri S., Han Y.-H., Fofoufou S., Fend S.C., Roy U., Wang F. and Sriram R.D., A model for capturing product assembly information. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2006, 6(1), pp. 11-21.
- [Rehman & Yan, 2007] Rehman F.U. and Yan X.T., Supporting early design decision making using design context knowledge. *Journal of Design Research*, 6(1-2), 2007, pp. 169-189.
- [Ren *et al.*, 2007] Ren Z., Anumba C.J., Hassan T.M., Augenbroe G. and Mangini M., Collaborative project planning : a case study of seismic risk analysis using an e-engineering hub. *Computers in Industry*, 2007, 57, pp. 218-230.
- [Renolen, 1999] Renolen A., Concepts and Methods for Modelling Temporal and Spatiotemporal Information. Technical Report, NTNU, 1999.
- [Rodier *et al.*, 2010] Rodier X., Saligny L., Lefebvre B. and Pouliot J., ToToPI a GIS for Understanding Urban Dynamics Based on the OH FET Model. In *Computer Application and Quantitative Methods in Archaeology*, edited by Fricher B., Crawford J. and Koler D., Williamsburg, NY : BAR International Series, 2010, pp. 337-349.
- [Roucoules, 2007] Roucoules L., Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin : des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Troyes, 2007.
- [Salustri, 2002] Salustri F.A., Mereotopology for product modeling. A new framework for product modeling based on logic. *Journal of Design Research*, 2002, 2(1), 27-40.
- [Salustri *et al.*, 2008] Salustri F.A., Eng N.L. and Weerasinghe J.S., Visualizing information in the early stages of engineering design, *Computer-Aided Design and Applications*, 2008, 5(1-4), pp. 697-714.
- [Sampson *et al.*, 2002] Sampson D., Karagiannidis C., Schenone A. and Cardinali F., Knowledge-on-demand in e-learning and e-working Settings. *Journal of International Forum of Educational Technology & Society*, 5(2), 2002.
- [Sapuan *et al.*, 2006] Sapuan S.M., Osman M.R. and Nukman Y., State of the art of the concurrent engineering technique in the automotive industry. *Journal of Engineering Design*, 17(2), 2006, pp.143-157.
- [Sartre, 1946] Sartre J.-P., L'existentialisme est un humanisme. Editions Nagel, Paris, 1946, 144p.
- [Savitt, 2006] Savitt S.F., Presentism and eternalism in perspective. *Philosophy and Foundations of Physics*, 2006, 1, pp. 111-127.
- [Schaffer, 2009] Schaffer J., Spacetime the one substance. *Philosophical Studies*, 145, 2009, pp. 131-148.
- [Sider, 2001] Sider T. Four Dimensionalism : An Ontology of Persistence and Time. Oxford : Clarendon Press, 2001.
- [Shah, 2001] Shah J.J., Designing with Parametric CAD : Classification and comparison of construction techniques. In : Kimura F. (eds) *Geometric Modelling. GEO 1998. IFIP ? The International Federation for Information Processing*, vol 75. Springer, Boston, MA, 2001.
- [Shah *et al.*, 2001] Shah J.J., Anderson D., Kim Y.S. and Joshi S., A discourse on geometric feature recognition from cad models. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, 1(1), pp. 41-51.
- [Shahare & Gurumoorthy, 2007] Shahare M. and Gurumoorthy B., Towards Defining Context ?, Proceedings of International Conference on Engineering Design, ICED07, 2007, pp. 175-176.
- [Shu *et al.*, 2011] Shu L.H., Ueda K., Chiu I. and Cheong H., Biologically inspired design, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), 2011, pp. 673-693.
- [Skander *et al.*, 2008] Skander A., Roucoules L. and Klein Meyer J.-S., Design and manufacturing interface modeling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(5-6), 2008, pp. 443-454.

- [Singh *et al.*, 2009] Singh, V., Skiles S.M., Krager J.E., Wood K.L., Jensen D. and Sierakowski R., Innovations in Design Through Transformation : A Fundamental Study of Transformation Principles. *Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(8), 18p.
- [Smith, 1996] Smith B. Mereotopology : a theory of parts and boundaries, *Data & Knowledge Engineering*, 1996, 20, pp. 287-303.
- [Smith, 2005] Smith B., Against Fantology. Experience and Analysis. Proceedings of the 27th International Wittgenstein Symposium, 2005, 6, pp. 153-170.
- [Sossou *et al.*, 2018] Sossou G., Demoly F., Montavon G., Gomes S. Design for 4D printing : rapidly exploring the design space around smart materials. *Procedia CIRP*, 2018, 70(1), pp. 120-125.
- [Sossou *et al.*, 2019a] Sossou G., Demoly F., Montavon G., Gomes S., A proactive and computational design framework for additive manufacturing of mechanical assemblies, *Journal of Mechanical Design*, Under review, 2019.
- [Sossou *et al.*, 2019b] Sossou G., Demoly F., Belkebir H., Qi J.H., Gomes S. and Montavon G., Design for 4D printing I : A voxel-based modeling and simulation of smart materials. *Materials & Design*, Under review, 2019.
- [Sossou *et al.*, 2019c] Sossou G., Demoly F., Belkebir H., Qi J.H., Gomes S. and Montavon G., Design for 4D printing II : Modeling and computation of smart materials distributions. *Materials & Design*, Under review, 2019.
- [Spitzer, 2016] Spitzer M., Outsourcing the mental? From knowledge-on-demand to Morbus Google. *Trends in Neuroscience and Education*, 5, 2016, pp. 34-39.
- [Studart, 2016] Studart, A.R., Additive manufacturing of biologically-inspired materials, *Chemical Society Review*, 45(2), 2016, pp. 359-376.
- [Stell & West, 2016] Stell J.G. and West M., A Four-Dimensionalist Mereotopology. In Formal Ontology in Information Systems, edited by A. C. Varzi and L. Vieu, 2004, pp. 261-272. Torino : IOS Press.
- [Su *et al.*, 2013] Su X., Yang Y., Wang D. and Chen Y. Digital assembly and direct fabrication of mechanism based on selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 19(3), 166-172.
- [Swift & Booker, 2003] Swift K.G. and Booker J.D., Process selection : from design to manufacture, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- [SWRL, 2019] SWRL : a semantic web rule language combining OWL and RuleML : <https://www.w3.org/Submission/SWRL>. January 2019.
- [SWRLTab, 2019] SWRL protégé plug-in : <https://protegewiki.stanford.edu/wiki/SWRLTab>. January 2019.
- [Tardif, 1992] Tardif J., Pour un enseignement stratégique, l'apport de la psychologie cognitive. Logiques, 474 p.
- [Technologies clés 2020, 2016] Technologies clés 2010, Rapport de prospective, Mai 2016.
- [Thomas, 2009] Thomas D., The development of design rules for selective laser melting. PhD thesis, University of Wales, UK, 2009.
- [Thompson *et al.*, 2016] Thompson M.K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R.I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B. and Martina F., Design for additive manufacturing : trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Manufacturing Technology*, 2016, 65(2), pp. 737-760.
- [Tibbits, 2014] Tibbits S. 4D Printing : Multi-Material Shape Change, *Architectural Design*, 2014, 84(1), pp. 116-121.
- [Tichkiewitch, 1994] Tichkiewitch S., De la CFAO à la conception intégrée, *International Journal of CAD/CAM and Computer Graphics*, 1994, 9(5), pp. 609-621.
- [Tichkiewitch, 1996] Tichkiewitch S., Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model, 3rd Biennial Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA 1996), 1996, pp. 101-108.

-
- [Tormey & Hardebolle, 2017] Tormey R., Hardebolle C., Apprendre à étudier – Guide à l’usage des étudiants en sciences et ingénierie, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2017, 144p.
- [Tudorache, 2006] Tudorache T., Employing ontologies for an improved development process in collaborative engineering, Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin, 2006.
- [Uschold, 2015] Uschold M., Ontology and database schema : What’s difference ?. *Applied Ontology*, 2015, 10, pp. 243-258.
- [Varzi, 1996] Varzi A., Parts, wholes, and part-whole relations : the prospects of mereotopology. *Data and Knowledge Engineering*, 1996, 20, pp. 259-286.
- [Vernier, 2014] Vernier C., Ingénierie à base de connaissances métier pour une conception semi-automatisée de systèmes mécaniques et des procédés de fabrication associés – Application à la ligne d’échappement. Thèse de Doctorat, UTBM, 2014.
- [Vielhaber *et al.*, 2004] Vielhaber M., Burr H., Deubel T., Weber C., Assembly-oriented Design in automotive engineering, International Design Conference, Dubrovnik, May 2004, pp. 1-8.
- [Wang *et al.*, 2016] Wang G., Yao L., Wang W., Ou J., Cheng C.-Y. and Ishii H., xPrint : A Modularized Liquid Printer for Smart Materials Deposition. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’16), ACM, 2016, pp. 5743-5752.
- [Wang *et al.*, 2017] Wang Y., Blache R. and Xu X., Selection of additive manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(2), pp. 434-447.
- [Wei *et al.*, 2017] Wei H., Zhang Q., Yao Y., Liu L., Liu Y. and Leng J., Direct-write fabrication of 4D active shape-changing structures based in shape memory polymer and its nanocomposite. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(1), pp. 876-883.
- [Westbrook & Qi, 2008] Westbrook K.K. and Qi H.J., Actuator Designs using Environmentally Responsive Hydrogels. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2008, 19(5), pp. 597-607.
- [Whitney *et al.*, 1999] Whitney D.E. et al., Designing Assemblies. *Research in Engineering Design*, 11, 1999, pp. 229-253.
- [Wilson & Shin, 2012] Wilson J.M. and Shin Y.C., Microstructure and wear properties of laser-deposited functionally graded inconel 690 reinforced with tic. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 207, pp. 517-522.
- [Wilson *et al.*, 2012] Wilson S.A., Jourdain R.P.J., Zhang Q., Dorey R.A., Bowen C.R., Willander M., Ul Wahab Q., Al-hili S., Nur O., Quandt E., Johansson C., Pagounis E., Kohl M., Matovic J., Samel B., van der Wijngaart W., Jager E.W.H., Carlsson D., Djinnovic Z., Wegener M., Moldovan C., Iosub R., Abad E., Wendlandt M., Rusu C. and Persson K., New materials for micro-scale sensors and actuators : An engineering review, *Materials Science and Engineering : R : Reports*, 56(1-6), 2007, pp. 1-129.
- [Witherell *et al.*, 2013] Witherell P., Gross I.R., Krishnamurty S. and Wileden J.C., AIERO : An algorithm for identifying engineering relationships in ontologies. *Advanced Engineering Informatics*, 2013, 27, pp. 555-565.
- [Wohlert, 2018] Wohlert T., Wohlert Report 2018. Wohlert Associates, Inc. : Fort Collins, CO, USA, 2018 ; p. 344. ISBN 978-0- 9913332-4-0.
- [Wu *et al.*, 2018] Wu J., Zhao Z., Kuang X., Hamel C.M., Fang D. and Qi J.H., Reversible shape change structures by grayscale pattern 4D printing. *Multifunctional Materials*, 2018, 1, 015002.
- [Xu *et al.*, 2016] Xu S., Shen J., Zhou S., Huand X. and Min Xie Y., Design of lattice structures with controlled anisotropy. *Materials and Design*, 2016, 93, pp. 443-447.
- [Yang *et al.*, 2015] Yang S., Tang Y. and Zhao Y.F., A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20(3), pp. 444-449.
- [Yao & Lin, 2016] Yao X. and Lin Y., Emerging manufacturing paradigm shifts for the incoming industrial revolution. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 65(5), pp. 1665-1676.

-
- [Yokota *et al.*, 1996] Yokota T., Gen M. and Li Y.-X., Genetic algorithm for non-linear mixed integer programming problems and its applications. *Computers & Industrial Engineering*, 1996, 30(4), pp. 905-917.
- [Zamenopoulos & Alexious, 2007] Zamenopoulos T. and Alexious K., Towards an Anticipatory View of Design. *Design Studies*, 28(4), 2007, pp. 411-36.
- [Zanni-Merk *et al.*, 2011] Zanni-Merk C., Cavallucci D. and Rousselot F., Use of formal ontologies as a foundation for inventive design studies. *Computers in Industry*, 2011, 62(3), pp. 323-336.
- [Zarek *et al.*, 2016] Zarek, M., Layani M., Cooperstein I., Sachyani E., Cohn D. and Magdassi S., 3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices. *Advanced Materials*, 2016, 26(22), pp. : pp. 449-4454.
- [Zhang, 2014] Zhang Y., Aide à la décision multi-critères à base de connaissance pour la planification en fabrication additive, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2014.
- [Zheng *et al.*, 2017] Zheng C., Hehenberger P., Le Duigou J., Bricogne M. and Eynard B., Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*, 2017, 28(3), pp. 333-356.
- [Zhu *et al.*, 2012] Zhu L., Jayaram U. and Kim O., Semantic Applications Enabling Reasoning in Product Assembly Ontologies – Moving Past Modeling. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2012, 12(1) 011009.
- [Zeng & Horvath, 2012] Zeng Y. and Horvath I., Fundamentals of next generation CAD/E systems, *Computer-Aided Design*, 2012, 44(10), pp. 875-878.
- [Zhu *et al.*, 2016] Zhu W., Ma X., Gou M., Mei D., Zhang K. and Chen S., 3d printing of functional biomaterials for tissue engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, 40, pp. 103-112.
- [Zimmer & Adam, 2011] Zimmer D. and Adam G., Direct Manufacturing Design Rules. CRC Press, 2011, pp. 545-551.
-