



**HAL**  
open science

# Systèmes industriels soumis à de la variabilité: vers un pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques

Alexis Aubry

► **To cite this version:**

Alexis Aubry. Systèmes industriels soumis à de la variabilité: vers un pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2018. tel-01871356

**HAL Id: tel-01871356**

**<https://theses.hal.science/tel-01871356>**

Submitted on 10 Sep 2018

**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.

# Systemes industriels soumis à de la variabilité : vers un pilotage sous perturbations pour les systemes de production holoniques

## HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

présentée et soutenue publiquement le 6 juillet 2018

pour l'obtention d'une

**Habilitation de l'Université de Lorraine**

(mention Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique)

par

**Alexis AUBRY**

Maître de Conférences

Docteur de l'Institut Polytechnique de Grenoble

### Composition du jury

<i>Présidente :</i>	Mireille Jacomino	Professeur des Universités, G-SCOP, Institut Polytechnique de Grenoble
<i>Rapporteurs :</i>	Theodor Borangiu Alexandre Dolgui Sylvie Norre	Professeur, CIMR, University Politehnica of Bucharest Professeur, LS2N, IMT Atlantique Professeur des Universités, LIMOS, Université Clermont Auvergne
<i>Examineurs :</i>	Hervé Panetto André Thomas	Professeur des Universités, CRAN, Université de Lorraine Professeur des Universités, CRAN, Université de Lorraine
<i>Invité :</i>	Jean-François Pétin	Professeur des Universités, CRAN, Université de Lorraine

Mis en page avec la classe thesul.

# Remerciements

## **2004-2018 : chroniques d’une aventure en enseignement-recherche**

La partie dédiée aux remerciements dans un mémoire de thèse ou d’habilitation à diriger des recherches est, de mon point de vue, fondamentale. Cette partie reflète, pour moi, l’importance que l’auteur accorde au document qu’il a mis du temps à écrire. La tentation est grande de tirer la couverture à soi au moment de finaliser une HDR. On m’a beaucoup exhorté à dire du “Je”, là où je voulais dire du “Nous”. Mais je n’envisage pas le métier d’enseignant-chercheur autrement que comme un métier collaboratif où les résultats de recherche sont le fruit d’un travail d’équipe où chacun apporte sa pierre à l’édifice.

C’est pourquoi, je souhaite prendre le temps, ici, d’écrire afin que mes compagnons d’aventure reçoivent ici ma gratitude pour l’étincelle qu’ils m’ont offert à un moment ou à un autre de ma carrière. Ils ont ainsi contribué à ce que mon aventure dans la recherche et l’enseignement soit belle et enrichissante.

Il y a très peu d’occasions qui offrent l’opportunité de remercier ces contributeurs alors je saisis celle-ci. Que ceux qui ont l’impression d’avoir contribué mais qui ne figurent pas dans les pages suivantes acceptent de prendre cela comme un oubli plutôt que comme de l’ingratitude.

### **2004-2007 : la thèse**

La thèse est toujours un moment très particulier dans la vie d’un chercheur car elle est à la fois le début et la fin de quelque chose. C’est un tournant. Elle est le début dans la vie d’enseignant-chercheur mais aussi la fin de la vie d’étudiant. La thèse offre le luxe de faire de la recherche sur un sujet pointu pendant presque 100% de son temps. Je renvoie ici aux remerciements que j’avais écrits dans mon manuscrit de thèse afin de remercier tous ceux qui avaient fait de cette période de 3 ans, une période légère et magique : petits clins d’œil spéciaux à Eric Deschamps, Duy Long Ha, Dominique Groppi, André Rossi, Marie-Laure Espinouse, et un très particulier à Eric Zamai dont je me souviens toujours de la discussion à quelques jours de ma soutenance de thèse.

Je souhaite également profiter de l’occasion qui m’est donnée ici de remercier à nouveau une personne, Mireille Jacomino, qui fut la directrice de thèse de cette merveilleuse aventure, et qui à ce titre garde une place très particulière. Elle reste une personne vers qui je me tourne encore lorsque j’ai besoin d’un conseil. Elle fut pendant ma thèse et reste encore d’une bienveillance gratuite. Et je renouvelle ici ce que j’avais déjà écrit à l’époque : “Mireille a l’art de mettre la barre haut et plutôt que de vous aider à l’atteindre, vous aider à la dépasser”.

Je ne pouvais pas envisager ce projet d’HDR sans que Mireille fasse partie du jury, d’une manière ou d’une autre.

### **2008-2018 : les premiers pas de Maître de Conférences**

Je ne peux évoluer sereinement que dans un contexte bienveillant. Ce contexte a existé pendant ma thèse et, fort heureusement, reste vrai depuis que je suis arrivé à Nancy. À ce titre, les collègues du 6ème étage de la Faculté des Sciences et Technologies ont facilité ma vie d’enseignant-chercheur. Le fait que toutes les portes de cet étage restent constamment grandes ouvertes est la preuve matérielle de l’ambiance saine qui y règne avec cette impression forte qu’on est tous dans le même bateau (et parfois la même galère) et qu’on a tous notre part d’investissement à faire en enseignement et en recherche.

Parmi ces collègues, j'aimerais remercier particulièrement David Gouyon et Pascale Marangé avec qui je partage la plupart de mes cours. David a été pour moi un parfait intégrateur lorsqu'il m'a accueilli dans son bureau à mon arrivée. Mes premiers enseignements lui doivent beaucoup ! Pascale est une alliée précieuse qui s'investit beaucoup pour la réussite des étudiants et avec qui travailler relève du plaisir ! il nous reste à relever les manches ensemble.

J'ajoute à cette petite liste, trois "moins jeunes" dont le recul est plus que précieux : Jean-Yves Bron, Éric Levrat et Benoît Iung. Ils sont parfaits dans leur rôle de "grands frères" enseignants !

Le fait que je puisse défendre en 2018 une HDR doit beaucoup à celui qui m'a fait confiance lorsque je suis arrivé au CRAN pour co-diriger des thèses avec lui : Hervé Panetto. Il a élargi mes horizons en me faisant découvrir des méthodes et des outils qui m'étaient insoupçonnés jusque-là, autour d'une thématique dont il est l'un des meilleurs représentants : l'interopérabilité. Il m'a entraîné dans chacune de ses aventures, me permettant d'élargir encore mon ouverture sur le Monde. Nous partageons grâce à lui des amis Serbes, Italiens et Brésiliens. Je ne le remercierai jamais assez d'avoir su m'écouter lorsque je lui annonçais mon désir de réorienter mes travaux autour du pilotage de la production ! Cette aventure en "interopérabilité" a été partagée également avec Mario Lezoche. Un grand merci à lui pour son implication et sa bonne humeur toute italienne.

Nous avons co-dirigé, avec Hervé, trois thèses. Que chacun de ces petits chercheurs devenus grands reçoivent ici ma gratitude pour l'aventure qu'ils m'ont permis de vivre. Esma Yahia fut la première doctorante et garde donc une place à part. Elle a grandement facilité cette première expérience par la passion qu'elle a bien voulu y mettre. Antonio Giovannini fut le deuxième. Je crois que le couloir devant ma porte se souvient encore des cent pas qu'il faisait jusqu'à ce que je puisse enfin discuter avec lui ! Anderson Szejka fut le troisième. Il a su naviguer entre le Brésil et la France et jongler avec les attentes de ces nombreux directeurs de thèse. Je n'oublie pas les étudiants de Master Recherche qui ont aussi apporté leur pierre à l'édifice : Jing Yang, Marco Dicatorato.

Depuis 2016, je collabore avec Jean-François Pétin et Pascale Marangé sur l'utilisation des modèles SED pour le pilotage de la production. Ma réorientation leur doit beaucoup. Je les remercie de m'avoir convaincu. J'espère qu'ils me pardonnent mon scepticisme initial. Cette collaboration permet l'encadrement partagé d'une thèse personnifiée par Sara Himmiche. Son enthousiasme depuis sa première année de master est rafraichissant. Merci à elle pour son implication sans faille.

Cette HDR doit beaucoup à l'implication de mon "parrain" scientifique André Thomas. Les nombreuses discussions qui ont accompagné la rédaction de ce mémoire ont été fondatrices et ont fini d'élargir mes horizons. André est un puits de connaissances en ce qui concerne les systèmes industriels et leur pilotage ! Je lui souhaite une longue retraite bien méritée, remplie de notes joyeuses sur sa guitare ou son banjo et le remercie d'avoir accepté de m'accompagner dans cette HDR juste avant.

La procédure d'HDR est longue et a impliqué beaucoup de chercheurs qui ont pris le temps d'évaluer le résultat de mes activités d'enseignement et de recherche puis le projet de recherche et d'enseignement défendu dans ce mémoire. Il y a d'abord eu Damien Trentesaux et Nathalie Sauer. Je les remercie chaleureusement d'avoir accepté d'évaluer mon premier dossier et de m'avoir autorisé à m'inscrire à l'HDR de l'Université de Lorraine. Il y a ensuite eu Theodor Borangiu, Alexandre Dolgui et Sylvie Norre qui ont rapporté sur ce mémoire. Un grand merci à eux pour la densité de leurs rapports et la source d'amélioration qu'ils représentent. Mireille Jacomino, Hervé Panetto, Jean-François Pétin et André Thomas sont venus compléter le jury pour la soutenance.

C'est aussi pour les échanges que nous avons eus lors de la soutenance que j'ai choisi ce métier !

### **1980-2018 : la vie, la vraie !**

J'ai le privilège de faire un métier que j'ai choisi et qui me passionne. Mais tout ceci n'aurait pas de sens s'il n'y avait pas la vie, la vraie en dehors du travail.

Beaucoup de personnes ont été à mes côtés et m'ont accompagné pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui. Cette HDR leur doit tellement !

Mes parents et mes sœurs sont une source inépuisable de bonheur ! Ma grand-mère "Favières" est un modèle. Je suis tellement heureux qu'elle ait pu assister à la concrétisation de cela !

Ma belle famille est depuis longtemps devenue ma famille.

Mon Autre, Christèle, a supporté sans reproche mes journées trop longues et mes nuits trop courtes, mon travail ramené à la maison. Elle a cette faculté à voir le meilleur en moi. Mes petites crapouilles, Lucas, Baptiste et Corentin qui me partagent un peu trop avec mon travail. Ces quatre murs porteurs me permettent de me libérer de mon travail car c'est tellement facile de se laisser happer si on n'y fait pas attention. Merci de me rappeler quelles sont les priorités !



*Je dédie cette habilitation à mes soutiens indéfectibles :  
ma femme, Christèle,  
et mes 3 petites "crapouilles" : Lucas, Baptiste et Corentin.*

*Les longues journées d'absence ont permis de concrétiser ce travail.  
J'espère qu'ils estimeront que le temps que je n'ai pas passé avec eux n'a  
pas été vain.*



# Sommaire

<b>Table des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xiii</b>
<b>Avant-Propos</b>	<b>1</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>3</b>
1 Une (brève) histoire des systèmes de production . . . . .	4
1.1 L'évolution de la demande et des systèmes opérants au cours des 4 révolutions industrielles . . . . .	4
1.2 L'évolution du système de pilotage . . . . .	5
1.3 Synthèse . . . . .	7
2 Systèmes de production holoniques . . . . .	7
3 Positionnement de ma recherche . . . . .	9
3.1 Interopérabilité pour la planification et le pilotage de la production . . . . .	10
3.2 Planification et pilotage de la production sous perturbations . . . . .	11
3.3 Problématiques de recherche . . . . .	12
4 Structure du document . . . . .	13
<b>Chapitre 1</b>	
<b>Synthèse des activités liées à l'enseignement et la recherche</b>	
1.1 Curriculum Vitae . . . . .	16
1.1.1 Titres Universitaires . . . . .	16
1.1.2 Situation Administrative . . . . .	17
1.1.3 Synthèse de la carrière . . . . .	17
1.2 Activités liées à l'enseignement . . . . .	18
1.2.1 Présentation générale . . . . .	18
1.2.2 Responsabilités administratives . . . . .	19
1.2.3 Présentation synthétique des enseignements : 2008-2017 . . . . .	19
1.3 Activités liées à la recherche . . . . .	21

1.3.1	Synthèse des publications . . . . .	21
1.3.2	Activités d’encadrement de la recherche . . . . .	27
1.3.3	Rayonnement Scientifique . . . . .	29
1.3.4	Valorisation de la recherche . . . . .	30
1.3.5	Participation à des groupes de travail et sociétés savantes . . . . .	30
1.3.6	Participation à des projets de recherche . . . . .	31
1.3.7	Responsabilités Scientifiques . . . . .	31
1.3.8	Responsabilités collectives . . . . .	31

<p><b>Chapitre 2</b></p> <p><b>Synthèse des travaux de recherche 2008-2017 : Optimisation et aide à la décision pour les systèmes industriels soumis à de la variabilité</b></p> <p style="text-align: right;"><b>33</b></p>
--

2.1	Préambule : Optimisation des systèmes industriels en contexte perturbé . . . . .	35
2.2	Proposition d’un cadre d’étude pour l’optimisation robuste des systèmes industriels soumis à de la variabilité . . . . .	38
2.2.1	Notre proposition . . . . .	38
2.2.2	Positionnement de cette approche par rapport aux autres travaux . . . . .	40
2.3	Application du cadre d’étude à deux problèmes particuliers d’interopérabilité autour des informations liées au produit . . . . .	44
2.3.1	Thèse de Esmâ Yahia (2008-2011) : Contribution à l’évaluation de l’interopérabilité sémantique entre systèmes d’information d’entreprises : Application aux systèmes d’information de pilotage de la production [Yahia, 2011] . . . . .	45
2.3.2	Thèse de Antonio Giovannini (2012-2015) : A knowledge representation framework for the design and the evaluation of product variety [Giovannini, 2015] . . . . .	47
2.4	Master 2 Recherche de Sara Himmiche : Extension du cadre d’étude aux modèles stochastiques . . . . .	48
2.5	À propos de la thèse d’Anderson Szejka . . . . .	48
2.6	Conclusion . . . . .	49

<p><b>Chapitre 3</b></p> <p><b>Projet de recherche et d’enseignement</b></p> <p style="text-align: right;"><b>55</b></p>
--

3.1	Projet de recherche : Vers un pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques . . . . .	56
3.1.1	Pilotage des systèmes de production dans l’industrie 4.0 . . . . .	56
3.1.2	Pilotage hiérarchique/hétéroarchique des Systèmes de production holoniques . . . . .	58

3.1.3	Description du projet de recherche . . . . .	65
3.1.4	Justification du projet . . . . .	72
3.2	Projet d'enseignement : formation des étudiants au Pilotage pour l'Industrie 4.0 . . . . .	74
3.2.1	Objectifs du parcours INPLIC . . . . .	74
3.2.2	Maquette du parcours INPLIC . . . . .	75
3.2.3	Une plateforme pour l'enseignement mais aussi la recherche . . . . .	75

<b>Liste des publications de l'auteur</b>	<b>77</b>
---	-----------

<b>Bibliographie</b>	<b>83</b>
----------------------	-----------

<b>Annexes</b>
----------------

<b>Annexe A</b> <b>Contributions à l'interopérabilité dans les systèmes industriels : modélisation de la connaissance et des informations liées au produit</b>
---

A.1	Thèse de Antonio Giovannini (2012-2015) : A knowledge representation framework for the design and the evaluation of product variety [Giovannini, 2015] . . . . .	94
A.2	Thèse de Anderson Szejka (2013-2016) : Contribution to interoperable design and manufacturing information : application to plastic injection products manufacturing [Szejka, 2016] . . . . .	96
A.3	Thèse de Esma Yahia (2008-2011) : Contribution à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprise - Application aux systèmes d'information de pilotage de la production [Yahia, 2011] . . . . .	99



# Table des figures

1	Un système de production est constitué d'un système opérant et d'un système de pilotage . . . . .	3
2	Distribution des capacités de décision : des systèmes de pilotage centralisés aux systèmes de pilotage purement hétérarchiques [Trentesaux, 2009] . . . . .	7
3	Évolution des systèmes de production et de leur système de pilotage (inspirée de [Trentesaux, 2002] et alimentée par [Bayraktar et al., 2007, McKay, 2011, Baglin et al., 2013]) . . . . .	8
4	Cycle de vie du produit, Système Opérant, Système de pilotage et Systèmes d'information . . . . .	10
5	Problèmes liés à la mise en œuvre des fonctions de planification et de pilotage de la production . . . . .	11
1.1	Synthèse des enseignements selon la thématique, le niveau de diplôme et la nature entre 2008 et 2017 . . . . .	20
2.1	Contribution des thèses encadrées dans les problèmes d'interopérabilité et de prise en compte des perturbations . . . . .	34
2.2	Problème d'optimisation déterministe . . . . .	35
2.3	Problème d'optimisation soumis à des perturbations . . . . .	36
2.4	Représentation de la $\mathcal{L}_\lambda$ -robustesse . . . . .	39
2.5	Approche d'obtention des blocs sémantiques d'un systèmes d'information . . . . .	54
3.1	Distribution des capacités de décision : des systèmes de pilotage centralisés aux systèmes de pilotage purement hétérarchiques [Trentesaux, 2009] . . . . .	59
3.2	Modèle <i>système viable</i> dans son environnement adapté de [Herrera, 2011] . . . . .	66
3.3	Schéma de principe du projet de recherche . . . . .	67
3.4	Contributions de nos axes de recherche au système de production holonique vu comme un système viable . . . . .	68
3.5	Architecture du parcours INPLIC . . . . .	76
3.6	Schéma de principe de la plateforme ProGreSS 4.0 . . . . .	76
A.1	Contribution de nos travaux de recherche aux problèmes d'interopérabilité du point de vue de la modélisation de la connaissance et des informations liées aux produits . . . . .	94
A.2	Modèle conceptuel du cadre de modélisation de la connaissance [Giovannini, 2015] . . . . .	95
A.3	Problèmes génériques d'interopérabilité pour la conception de produits [Szejka, 2016] . . . . .	97

*Table des figures*

---

A.4	Cadre Conceptuel pour l'interopérabilité dans la conception de produits complexes [Szejka, 2016] . . . . .	98
A.5	Processus de conceptualisation et d'explicitation de la sémantique dans les systèmes d'information [Yahia, 2011] . . . . .	99

# Liste des tableaux

1.1	Synthèse des publications . . . . .	22
1.2	Synthèse des encadrements . . . . .	27
2.1	5 problèmes de robustesse . . . . .	40
2.2	Champs $\alpha \beta \gamma$ étudiés dans la littérature . . . . .	43
2.3	État de l'art sur l'ordonnancement robuste (Analyse de stabilité) . . . . .	50
2.4	État de l'art sur l'ordonnancement robuste (Analyse de sensibilité) . . . . .	51
2.5	État de l'art sur l'ordonnancement robuste (Maximisation de la stabilité) . . . . .	52
2.6	État de l'art sur l'ordonnancement robuste (Minimisation de la sensibilité) . . . . .	53
3.1	Avantages et inconvénients des différentes structures de pilotage . . . . .	58
3.2	Pilotage pour les Systèmes de production holoniques . . . . .	63



# Avant-Propos

L'Habilitation à Diriger des Recherches présentée dans ce mémoire relate des travaux réalisés au sein du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) suite à une thèse effectuée au laboratoire G-SCOP (Sciences pour la conception, l'Optimisation et la Production) de Grenoble.

Depuis 2008, je suis Maître de Conférences au CRAN, au sein d'un département dont l'objet d'étude principal est les systèmes de production. Après m'être intéressé, lors de ma thèse, à l'optimisation des systèmes industriels soumis à des perturbations, on m'a proposé lors de mon arrivée au CRAN d'étudier les problèmes d'interopérabilité dans les systèmes industriels concernant les informations liées au produit notamment lors des phases de conception et de fabrication. Le point de vue original défendu par le CRAN est que le produit est le meilleur candidat pour être acteur de cette interopération dès lors que cette interopération concerne des informations relatives au produit. Cela est notamment rendu possible dès lors que le produit et les éléments physique d'un système opérant sont munis de capacités de détection de données, de transfert et de communication des informations, puis enfin de décision les concernant.

Le seul point de vue utilisé dans ma thèse était celui de l'optimisation alors que la problématique de l'interopérabilité implique également un point de vue lié à la modélisation de la connaissance et des informations nécessitant ainsi une montée en compétences sur des outils dédiés tels que UML ou les ontologies.

Ces deux points de vue sont rarement traités de manière conjointes notamment parce que les outils utilisés sont très différents et nécessitent des connaissances très spécifiques.

J'ai fait cohabiter ces deux points de vue entre 2008 et 2017, jusqu'à ce je décide d'orienter mes activités de recherche exclusivement autour du problème du pilotage des systèmes de production en contexte perturbé...



# Introduction générale

Systèmes de production cyberphysiques, Industrie 4.0, Usine du futur sont autant de concepts qui témoignent que l'on est entré dans une phase de bouleversement en ce qui concerne les systèmes de production et leur pilotage. Cette quatrième révolution industrielle se caractérise par une digitalisation massive et par la généralisation de l'usage des Technologies de l'Information et de la Communication au sein des industries, rendant les machines, les produits, conscients de leur environnement, capables de collaborer et de prendre des décisions.

Dans un premier temps, de manière simple et classique, un système de production peut être décrit comme étant constitué (voir figure 1) :

- d'un système opérant (partie physique) qui contient l'ensemble des ressources et des humains qui permettent la transformation de matières premières en produit fini,
- et d'un système de pilotage qui contient l'ensemble des méthodes, des outils et des humains qui permettent de contraindre le fonctionnement et l'évolution du système opérant.

Ces deux sous-systèmes échangent des informations. Le système de production est traversé par un flux physique (matières premières, pièces, composants, produits semi-finis...) et par un flux d'informations (commandes, ordres de fabrication, états ressource...).

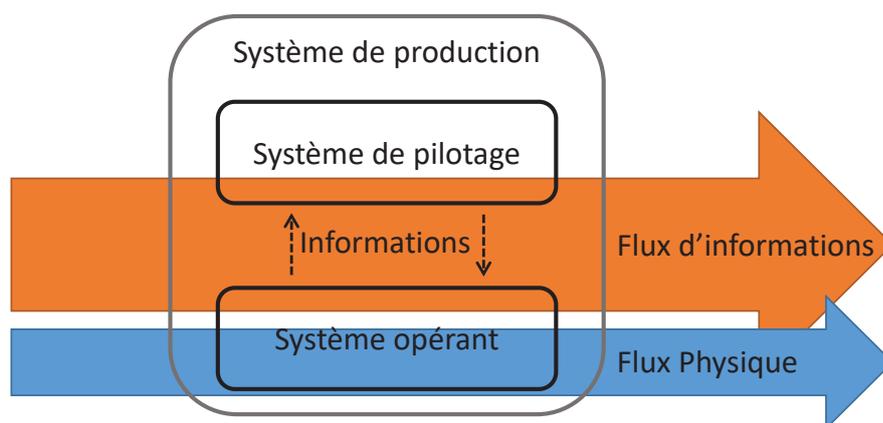


FIGURE 1 – Un système de production est constitué d'un système opérant et d'un système de pilotage

## 1 Une (brève) histoire des systèmes de production

### 1.1 L'évolution de la demande et des systèmes opérants au cours des 4 révolutions industrielles

D'après [Yin et al., 2017], les différentes révolutions industrielles peuvent se résumer de la façon suivante.

La Première Révolution Industrielle trouve sa place entre le milieu du 18ème siècle et la fin du 19ème siècle. D'un point de vue technologique, elle est caractérisée par l'invention de la machine à vapeur qui permet de remplacer certaines activités artisanales par des activités industrielles. Le marché, qui peut être qualifié de simple, est défini par une demande supérieure à l'offre pour des produits dont la variété est très faible. Ainsi la seule caractéristique de la demande est le volume. Le système de production se présente sous la forme d'ateliers spécialisés monoproduits.

La Deuxième Révolution Industrielle s'étend de la fin du 19ème siècle jusqu'aux années 1970. Elle est caractérisée par des innovations technologiques reposant principalement sur l'électricité et la mécanisation. Elle permet l'avènement du taylorisme et du fordisme avec la rationalisation des activités de production. C'est le début du travail à la chaîne et de la production de masse dont le but est d'augmenter le volume de production en minimisant les coûts. Cette période est aussi caractérisée par le fait qu'un produit fabriqué est sûr d'être vendu. On n'hésite donc pas à produire pour le stock. Le marché, qui peut être qualifié de stable, fait progressivement apparaître le besoin de variété de la part des clients : la demande est donc caractérisée par deux dimensions (volume et variété). Le système de production se présente principalement sous la forme de lignes spécialisées.

La Troisième Révolution Industrielle a démarré dans les années 1970 jusqu'aux années 2000. Elle est caractérisée par des innovations technologiques reposant sur l'informatique et l'automatisation généralisée donnant naissance à la productique. Le marché devient volatil et intègre le besoin de délais de livraison toujours plus courts. Le cycle de vie du produit se raccourcit également. La demande est caractérisée par trois dimensions (volume, variété et délai). Le système de production se présente principalement sous la forme d'ateliers flexibles de production. C'est aussi à cette période que le besoin de produits personnalisés apparaît.

La Quatrième Révolution Industrielle démarre dans les années 2010. Elle repose sur la généralisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication (telle que l'internet-des-objets, le big data, le cloud, les capteurs intelligents . . .) et sur la digitalisation massive. La personnalisation de masse (idéalement, la capacité à fabriquer des produits personnalisés avec la même efficacité que la production de masse) touche de plus en plus de domaines. Le système de production se présente sous la forme d'ateliers reconfigurables.

Les révolutions industrielles successives, l'évolution de la demande, ainsi que l'extension de la gestion de production aux fonctions support (marketing, comptabilité et finance, achats et logistique, gestion des ressources humaines, . . .) ont conduit à la multiplication des contraintes de pilotage donnant à cette activité une importance grandissante au sein des industries. Au fur et à mesure du temps, les entreprises se sont dotées de systèmes de planification et de pilotage de la production devant gérer des systèmes opérants de plus en plus complexes et des informations toujours plus nombreuses, dispersées et hétérogènes.

## 1.2 L'évolution du système de pilotage

L'APICS<sup>1</sup> définit un système de pilotage comme *un système dont la fonction principale est la collecte et l'analyse des retours d'information d'un certain type de fonctions afin de les piloter. Le pilotage peut être exécuté en surveillant ou en modifiant systématiquement les paramètres ou les règles utilisés par ces fonctions, ou en émettant des rapports de contrôle qui généreront les actions appropriées sur les écarts significatifs et les exceptions.*<sup>2</sup>

L'APICS, toujours, définit le pilotage d'atelier (Production Activity Control – PAC) comme *la fonction qui consiste à acheminer et répartir le travail à exécuter dans les unités de production et à piloter les fournisseurs. Le pilotage d'atelier recouvre les principes, méthodes et techniques nécessaires pour ordonnancer, piloter, mesurer et évaluer l'efficacité des opérations de production.*<sup>3</sup>

[McKay, 2011] propose une définition plus précise quant aux missions du système de pilotage : *un système d' "entités" qui collaborent afin de piloter ce qui est fait, où, par qui, en utilisant quel ensemble de ressources (machines, outils, matières), à quel moment, et dans quelle quantité. Piloter implique également de définir des objectifs ou de savoir quels sont les objectifs, de mesurer les performances et les résultats de fabrication réalisés, de savoir ce qui a été fait et où cela est stocké, d'évaluer et d'apporter les corrections nécessaires pour atteindre les objectifs ou à minima pour mieux les atteindre à l'avenir.*<sup>4</sup>

Cette définition introduit également la notion d'entités qui, nous le verrons dans la suite, a évolué au fur et à mesure du temps.

[Bayraktar et al., 2007, McKay, 2011, Baglin et al., 2013] s'intéressent aux pratiques de pilotage à travers le temps. Ils s'accordent pour dire que les premières méthodes analytiques de pilotage de la production n'apparaissent pas avant les années 1920 avec Harris et Wilson et leur quantité économique. Cela s'explique principalement par le fait qu'avant ces années, la demande est caractérisée par un gros volume et une faible variété. La problématique pour les industriels repose donc principalement sur l'amélioration de l'appareil productif afin de gagner en productivité. La première révolution industrielle a permis de passer de l'artisanat à l'industrie alors que la deuxième conduit à la production de masse et donc à l'amélioration de la productivité par la rationalisation des activités de production et le travail à la chaîne (par Taylor et Ford). Dans les années 1930, les cartes de contrôle proposées par Shewart permettent de surveiller et contrôler (au sens automatique du terme) l'appareil de production par l'analyse de son aptitude à produire des pièces de qualité. Le pilotage par les délais n'est pas encore une priorité. Dès les années 1950, la naissance de la recherche opérationnelle permet les premiers modèles en programmation linéaire et les méthodes associées à des graphes (PERT...).

---

1. The international Association for Supply Chain Management

2. *A system that has as its primary function the collection and analysis of feedback from a given set of functions for the purpose of controlling the functions. Control may be implemented by monitoring or systematically modifying the parameters or policies used in those functions, or by preparing control reports that initiate usefull action with respect to significant deviations and exceptions.*

3. *The function of routing and dispatching the work to be accomplished through the production facility and of performing supplier control. PAC encompasses the principles, approaches, and techniques needed to schedule, control, measure, and evaluate the effectiveness of production operations.*

4. *It is a systems of "things" that work together to control what is done, where, by who, using what set of resources (machines, tools, and materials), at what time, and in what quantity. Controlling also implies setting expectations or knowing what the expectations are, measuring the realized manufacturing performance and outcomes, knowing what is where, what has been done, providing feedback, and making necessary corrections so that the expectations and goals can be met, or at least be better met in the future [McKay, 2011].*

Entre les années 1960 et 1980, c'est l'avènement des systèmes MRP2 (Manufacturing Resources Planning) jusqu'à leur implantation dans des systèmes d'information d'entreprise de type ERP (Enterprise Resource Planning). Cela a notamment été rendu possible grâce au développement et à la démocratisation d'outils informatiques toujours plus puissants. Ces systèmes s'inscrivent dans une vision centralisée et hiérarchique du pilotage conceptualisée par la pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing) [CIM, 1989] : l'information globale est centralisée de telle sorte que les décisions de pilotage sont prises dans un but d'optimum global (grâce à des méthodes de la recherche opérationnelle) puis transmises hiérarchiquement du plus haut niveau de décision (long terme) jusqu'au plus bas niveau vers les unités de production (court terme). Le principal avantage de ces systèmes réside dans leur capacité à fournir des solutions optimales de planification et de pilotage sur le long terme, permettant un contexte industriel stable [Thomas et al., 2012].

Cependant, ces systèmes particulièrement efficaces dans un contexte de production de masse, encore en vigueur en Occident jusque dans les années 1980 (pour répondre aux besoins de premiers équipements des ménages de l'après-guerre), le sont beaucoup moins face aux besoins de diversités d'une part, et face à une demande de délais toujours plus courts d'autre part qui apparaissent dans les années 1980 [Baglin et al., 2013]. En effet, cette mutation de la demande implique plus de flexibilité et de réactivité, que les systèmes centralisés hiérarchiques n'ont pas. Des premières approches "distribuées" sont alors apparues afin de donner de la souplesse et de la réactivité au niveau des ateliers. Ces approches "Juste-à-temps" prennent leur source au Japon (chez Toyota) où elles ont été théorisées et appliquées à partir des années 1950. L'idée de ces approches est de distribuer de la décision au plus près des flux physiques par les opérateurs notamment. Une des mises en œuvre la plus connue du juste-à-temps est par le biais de la méthode kanban [Thomas et al., 2012]. [Dilts et al., 1991] ajoutent également que les systèmes centralisés et hiérarchiques, de par leur structure très rigide notamment, sont difficiles à rendre tolérants aux pannes, sont peu extensibles, et sont peu robustes.

Ce besoin de distribution de la décision dans la structure des systèmes de pilotage s'est accentué dans les années 1990 lorsque la production de masse a mué vers la personnalisation de masse afin de répondre aux enjeux de la mondialisation rendant le marché hypercompétitif et volatil. Cela s'est traduit par un fort besoin d'agilité afin que le système de pilotage soit capable de réagir aux aléas et aux incertitudes liées au marché. À partir du milieu des années 1980, des chercheurs ont proposé une alternative aux systèmes de pilotage centralisés et hiérarchiques par le biais de systèmes hétérarchiques purs pour lesquels les capacités de décision de pilotage sont distribuées sur des entités autonomes et indépendantes de même niveau de décision sans liens hiérarchiques [Hatvany, 1985, Duffie et al., 1988]. Cependant ces systèmes comportent des risques liés à leur incapacité à garantir des optimums globaux et à la totale indépendance des entités qui peuvent prendre des décisions contradictoires [Thomas et al., 2012]. C'est pourquoi des approches plus pragmatiques, proposant une structure de pilotage hybride, ont été proposées dans le but de combiner la prévisibilité du pilotage hiérarchique avec l'agilité du pilotage hétérarchique. Parmi celles-ci, nous ne citerons que les systèmes de production holoniques [Valckenaers et al., 1994, Valckenaers et al., 1998, Van Brussel et al., 1998] pour laquelle, une communauté de chercheurs reste encore très active (en France dans le GT IMS2 du GDR MACS par exemple, et autour des conférences SOHOMA et HoloMAS pour la communauté internationale). Pour d'autres tentatives d'approches, contemporaines aux Systèmes de Production Holoniques, on peut se référer à [Tharumarajah, 2003] avec les systèmes fractals et les systèmes bioniques.

### 1.3 Synthèse

[Trentesaux, 2009] propose une étude détaillée des différentes structures de pilotage et une modélisation par les graphes afin de représenter ces différents types de systèmes, définissant 4 classes : Système centralisé (classe 0), Système hiérarchique, Système hétérarchique au sens large (hybride hiérarchique/hétérarchique), Système hétérarchique pur (Classe III) (voir Figure 2).

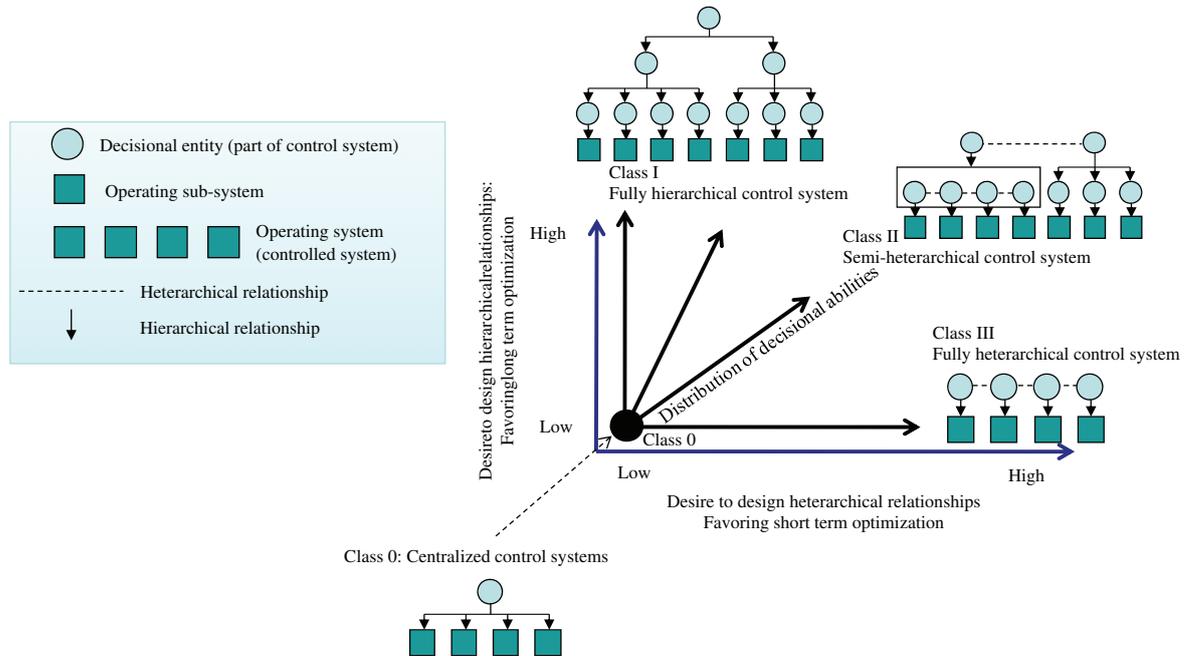


FIGURE 2 – Distribution des capacités de décision : des systèmes de pilotage centralisés aux systèmes de pilotage purement hétérarchiques [Trentesaux, 2009]

La figure 3 propose un schéma qui résume l'évolution des systèmes de production et de leur système de pilotage au fil des révolutions industrielles. Afin de garantir la lisibilité du schéma, les frontières sont représentées comme hermétiques et seuls les éléments marquants de chaque période sont représentés. À titre d'exemple, les méthodes de la recherche opérationnelle restent utiles et utilisées après 1990 même si les systèmes de pilotage hétérarchiques ont conduit à l'essor des systèmes multi-agents pour le pilotage de la production.

## 2 Systèmes de production holoniques

Dans [Van Brussel et al., 1998], les auteurs rappellent que c'est à [Koestler, 1967] que l'on doit le concept d' "holon", combinaison du mot grec *holon* (le tout) avec le suffixe *-on* (qui suggère la notion de particule ou partie comme dans les mots "protons" ou "neutrons"). Ce concept décrit donc la notion tout/partie qui existe dans les systèmes complexes où chaque sous-système peut être perçu comme un tout vis-à-vis des autres sous-systèmes mais également comme une partie, vu du système global. Les systèmes de production étant des systèmes complexes, un consortium de chercheurs a, dans les années 1990, cherché à transposer dans les systèmes de production, le concept holonique développé initialement par [Koestler, 1967] pour les organismes vivants et les sociétés.

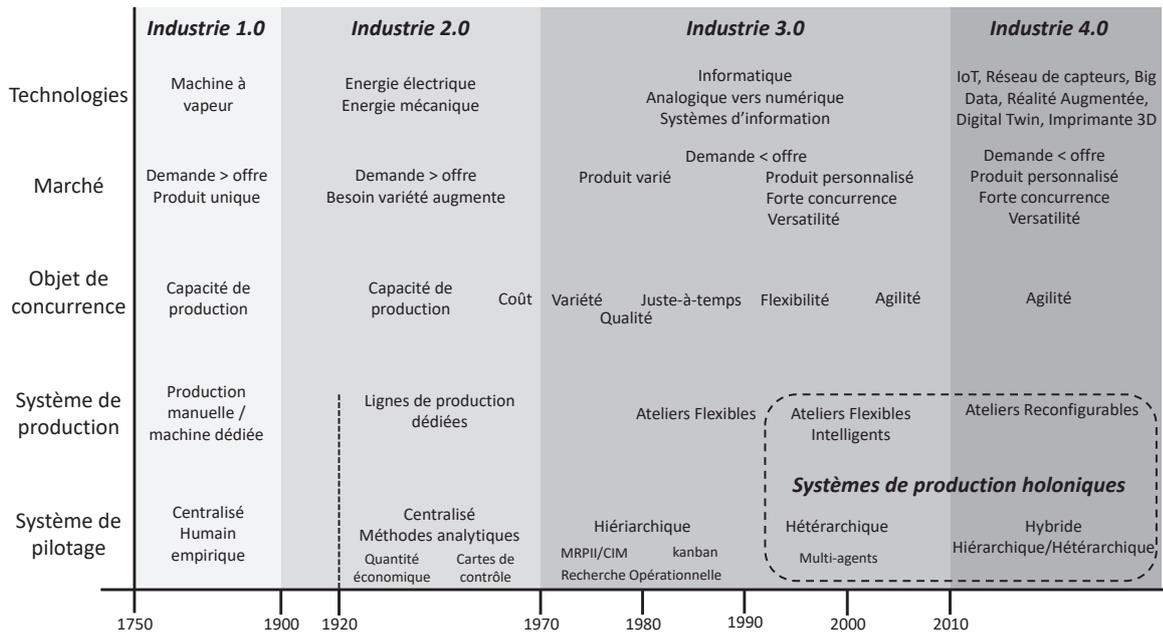


FIGURE 3 – Évolution des systèmes de production et de leur système de pilotage (inspirée de [Trentesaux, 2002] et alimentée par [Bayraktar et al., 2007, McKay, 2011, Baglin et al., 2013])

[Van Brussel et al., 1998] propose une liste de définitions pour caractériser un Système de Production Holonique (SPH) qui ont été traduites dans la définition 1.

**Définition 1** *Les concepts liés aux Systèmes de Production Holoniques sont définis de la manière suivante [Van Brussel et al., 1998].*

**Holon :** *un bloc de construction autonome et coopératif d'un système de production qui permet de transformer, transporter, stocker et/ou valider des informations et des objets physiques. L'holon est constitué à la fois d'une partie traitant des informations et d'une partie physique. Un holon peut faire partie d'un autre holon.*

**Autonomie :** *l'aptitude d'une entité à concevoir ses propres stratégies et les piloter.*

**Coopération :** *un processus dans lequel un ensemble d'entités développe des stratégies consensuelles et les exécute.*

**Holarchie :** *un système d'holons pouvant coopérer afin d'atteindre un objectif. L'holarchie définit les règles basiques de coopération entre holons et de fait contraint leur autonomie.*

**Système de production holonique :** *une holarchie qui intègre l'ensemble des activités de production, depuis la réservation des commandes, jusqu'à la conception, la production et la commercialisation, afin de réaliser l'industrie agile.*

**Attributs holoniques :** *Attributs d'une entité qui font d'elle un holon. L'ensemble des attributs doit au moins contenir l'autonomie et la coopération.*

Ces définitions permettent de mettre en évidence deux caractéristiques propres aux systèmes de production holoniques, comme le faisait déjà remarquer [Van Brussel et al., 1998] :

1. Contrairement aux approches classiques de pilotage, les SPH ne séparent pas le système opérant de son système de pilotage. En effet, l'holon contient à la fois la partie physique et la partie informationnelle : une ressource de production fait partie intégrante du holon "ressource" qui contient également la partie traitant les informations associées à la ressource physique.
2. Les SPH permettent de développer des structures hybrides de pilotage de par la gestion des mécanismes d'autonomie et de coopération entre holons. Il est tout à fait possible :
  - de développer des interactions de type maître-esclave (hiérarchie pure), ou
  - de développer des interactions sans contrainte quant à la façon de prendre en compte ces informations (hétérarchie pure), ou
  - de développer des interactions hybrides [Van Brussel et al., 1998].

Ce sont ces caractéristiques qui ont fait du paradigme SPH un très bon candidat pour répondre aux enjeux de la fin de la troisième révolution industrielle même si l'application industrielle est loin d'être généralisée aujourd'hui. Ce constat fait en 2009 par [Trentesaux, 2009] semble toujours d'actualité. Cependant la maturité technologique offerte par l'industrie 4.0, qui pouvait faire défaut dans beaucoup d'industries jusque maintenant, prouve la pertinence de ce paradigme pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0 en terme de pilotage de la production [Größler and Pöhler, 2017].

Le CRAN a participé et continue à participer à cette thématique de recherche en défendant le concept de systèmes contrôlés par le produit (SCP) [McFarlane, 2002, Gouyon, 2004] qui est une interprétation des systèmes de production holoniques où ce sont les produits intelligents qui sont les vecteurs essentiels du transport de l'information et qui sont capables de prendre des décisions en ce qui les concerne. On fait ici l'hypothèse que le produit est identifiable de manière unique, qu'il est capable de porter tout ou partie de l'information le concernant et de la mettre à jour, qu'il est capable de communiquer avec son environnement, qu'il est capable d'exprimer ses besoins, et qu'il est par suite capable de participer au processus décisionnel le concernant. Plusieurs thèses au CRAN [Gouyon, 2004, Pannequin, 2007, El Haouzi, 2008, Klein, 2008, Herrera, 2011] ont contribué à faire la preuve du concept et à démontrer l'applicabilité industrielle puisque deux de ces thèses ont été réalisées en collaboration avec deux entreprises : TRANE [El Haouzi, 2008] et Parisot Meubles [Klein, 2008].

Mon projet de recherche et d'enseignement a pour vocation de contribuer au pilotage des systèmes de production holoniques en contexte perturbé.

### 3 Positionnement de ma recherche

L'objet d'étude de ma recherche a toujours été les systèmes de production de biens ou de services et leur pilotage. Comme présenté sur la figure 1, le système de production est classiquement décomposé en un système opérant (les machines, les ressources humaines . . .) et son système de pilotage. La multiplication et la complexification des informations nécessaires pour ce pilotage ont également amené à intercaler un système d'information entre ces deux systèmes comme dans la figure 4. La partie droite de la figure représente le découpage classique en plusieurs niveaux de pilotage à travers la planification, l'ordonnancement et l'exécution.

La première section de ce chapitre introductif permet de mettre en évidence deux points importants :

- Les systèmes de production ont, depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, subi de fortes mutations d'un point de vue technologique et organisationnel offrant toujours plus de possibilités. Cependant ces nouvelles possibilités ont conduit au durcissement des exigences des clients avec une

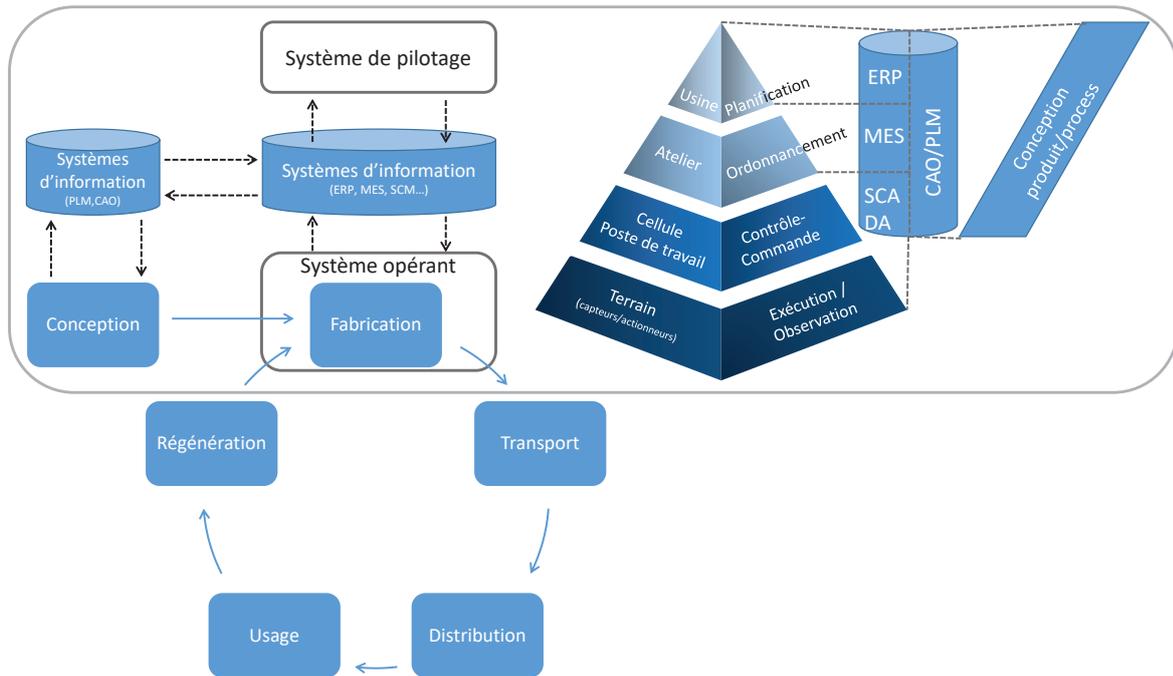


FIGURE 4 – Cycle de vie du produit, Système Opérant, Système de pilotage et Systèmes d'information

demande pour des produits individualisés, dans des délais courts, avec des cycles de vie réduits. Cela justifie que les fonctions de planification et de pilotage de la production restent un enjeu majeur et sont soumises à des contraintes toujours plus nombreuses et conflictuelles rendant leur optimisation compliquée mais nécessaire.

- Les informations nécessaires aux fonctions de planification et de pilotage de la production sont toujours plus nombreuses, plus hétérogènes, plus volatiles, plus distribuées. Cela implique depuis les années 1980, la généralisation de l'usage des systèmes d'information d'entreprise de type ERP, MES, APS, PLM, SCM ... afin de gérer l'ensemble de ces informations.

Cependant la mise en œuvre des fonctions de planification et de pilotage impliquent deux problèmes importants liés aux informations nécessaires à leur réalisation. Le premier problème concerne l'interopérabilité entre les systèmes d'information et les personnes qui manipulent ces informations. Le deuxième problème concerne les perturbations pouvant pervertir ces informations. La figure 5 propose un schéma afin de représenter ces problèmes.

### 3.1 Interopérabilité pour la planification et le pilotage de la production

L'interopérabilité peut être définie comme la capacité d'échanger de l'information spécifique et à opérer à partir de cette information, selon une sémantique commune, dans le but de réaliser une mission spécifiée dans un contexte donné [Carney et al., 2005]. Ainsi dès lors que des informations sont échangées entre systèmes et/ou entre personnes, le problème d'interopérabilité remet en cause la réalisation de la mission (planifier et piloter en sont deux). Tout au long du cycle de vie du produit, ces problèmes d'interopérabilité existent. Lors de la conception du produit, le concepteur doit traduire le besoin du client en un modèle de produit (premier risque de non-

interopérabilité). De plus la conception de produits complexes fait intervenir souvent des corps de métier très différents faisant appel à des connaissances propres (deuxième risque de non-interopérabilité). La planification et le pilotage utilisent des données techniques provenant de la conception (troisième risque de non-interopérabilité). Deux systèmes d'information différents peuvent être utilisés pour la planification et le pilotage de la production. L'ERP et le MES doivent travailler ensemble (quatrième risque de non-interopérabilité). Dans la littérature on parle alors d'interopérabilité Business to Manufacturing (B2M). Ainsi, l'interopérabilité est un prérequis pour la réalisation d'une mission et son optimisation.

### 3.2 Planification et pilotage de la production sous perturbations

En faisant l'hypothèse que les problèmes d'interopérabilité sont résolus (et donc que la réalisation de la mission n'est pas handicapée par des problèmes d'échange d'informations), les perturbations dont les sources peuvent être internes (système opérant et/ou de pilotage) ou externe (clients, fournisseurs) concernent des aléas (panne machine, nouvelle commande client urgente ...) ou des incertitudes (quantité commandée, durée opératoire, niveaux des stocks ...) qui impactent les informations nécessaires à la réalisation des fonctions qui nous intéressent et leur optimisation. En effet, ces informations sont des données d'entrée des principales fonctions de planification et de pilotage.

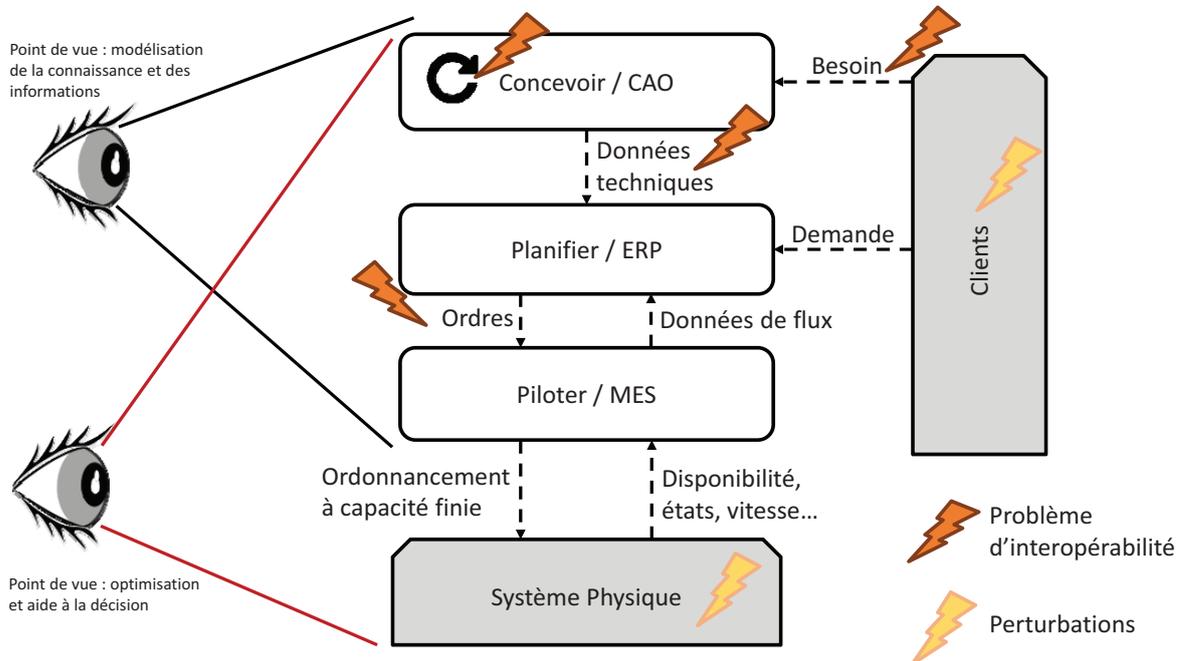


FIGURE 5 – Problèmes liés à la mise en œuvre des fonctions de planification et de pilotage de la production

### 3.3 Problématiques de recherche

Nous nous sommes intéressés à la prise en compte des perturbations pour l’optimisation des systèmes de production pendant ma thèse (avant 2008) alors que la problématique liée à l’interopérabilité a été abordée entre 2008 et 2017 suite à mon intégration au CRAN en tant que Maître de conférences.

En particulier, ces deux problématiques peuvent être abordées selon deux points de vue (voir figure 5) :

- Modélisation de la connaissance et des informations
- Optimisation et aide à la décision

Ces deux points de vue sont rarement abordés de manière conjointe. Ceci est notamment dû aux méthodes et outils auxquels ils font appel qui sont très différents dans leur niveau d’expression et qui exigent des connaissances très spécifiques. Dans le premier cas, les modèles reposent principalement sur le langage UML, les modèles de processus et les ontologies. Dans le deuxième cas, les modèles reposent principalement sur la programmation mathématique et/ou les graphes. Lors de ma thèse, c’est le deuxième point de vue qui a été abordé uniquement. Nous avons fait cohabiter ces deux points de vue entre 2008 et 2017.

Depuis 2017, j’ai décidé d’orienter mes activités de recherche exclusivement autour du problème du pilotage des systèmes de production avec prise en compte des perturbations. Mon projet de recherche s’intéresse à cette question dans le contexte de l’industrie 4.0 et des systèmes de production holoniques. Seul le point de vue de l’optimisation et de l’aide à la décision sera abordé dans mon projet de recherche. Au moins deux raisons permettent de justifier ce choix :

- Mon appétence naturelle vers les modèles, les outils et les méthodes associés à l’optimisation et l’aide à la décision
- La difficulté à utiliser des outils très différents et qui nécessitent des niveaux d’abstraction éloignés dans un même projet sur le long terme.

Dans la suite du document principal, le seul point de vue de l’optimisation et de l’aide à la décision sera détaillé. C’est un choix qui peut paraître arbitraire mais qui est guidé par le besoin de fluidité du document d’une part (éviter la gymnastique intellectuelle permanente pour basculer continuellement entre les deux points de vue) mais également le besoin de cohérence par rapport au projet de recherche que je souhaite défendre pour le futur d’autre part. L’enjeu de mon projet de recherche est de proposer un système de pilotage pour les systèmes de production holoniques où les entités (machines, produits . . .) sont rendues intelligentes (capables de capter l’information, la traiter, et décider de manière autonome et coopérative). Cette introduction générale a montré qu’un système hybride (hiérarchique/hétéroarchique) est nécessaire afin de satisfaire aux exigences de l’industrie 4.0. Ce qui m’intéresse dans mon futur projet concerne le pilotage (avec ses modèles, ses outils et ses méthodes) en faisant l’hypothèse que les problèmes d’interopérabilité (l’information peut être échangée et comprise) et que les problèmes liés à l’amélioration technologique des entités pour les rendre intelligentes sont résolus<sup>5</sup>. Le point de vue principal est donc celui de l’optimisation et aide à la décision pour le pilotage.

Cependant afin de présenter un bilan complet de mes contributions de 2008 à aujourd’hui, le point de vue “modélisation de la connaissance et des informations” sera présenté en annexe A.

---

5. D’autres chercheurs au CRAN et ailleurs s’attaquent à lever ces hypothèses

## 4 Structure du document

Le chapitre 1 de ce document présente une synthèse des activités liées à l’enseignement et la recherche. Après un bref curriculum vitae, il fait un bilan de mes activités liées à l’enseignement depuis ma nomination à la Faculté des Sciences et Technologies à travers les thématiques, les types et les niveaux de mes enseignements. Il montre également mon investissement dans cette facette de notre profession à travers les responsabilités que j’ai prises depuis 2008. Une revue détaillée de mes activités liées à la recherche finalise ce chapitre. Cette partie détaille les publications, les encadrements de la recherche auxquels j’ai participé, les éléments contribuant à mon rayonnement scientifique, et enfin les responsabilités scientifiques et collectives dont j’ai eu la charge jusqu’aujourd’hui. Ce chapitre doit permettre d’évaluer quantitativement mes activités liées à l’enseignement et à la recherche.

Le chapitre 2 détaille mes travaux de recherche depuis mon recrutement en tant que maître de conférences. Il s’attachera à démontrer comment les travaux menés pendant ma thèse autour de l’optimisation sous perturbations ont été enrichis puis appliqués sur la problématique d’interopérabilité dans les systèmes industriels concernant les informations liées au produit. Il détaille notamment un processus général pour la résolution de problèmes d’optimisation sous perturbations ainsi qu’une approche générale que nous avons proposée pour l’optimisation robuste. Cela pose un cadre dans lequel s’inscrit mon projet de recherche. Ce chapitre doit permettre d’évaluer qualitativement mes activités liées à la recherche.

Le chapitre 3 détaille tout d’abord mon projet de recherche concernant le pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques dans le contexte de l’industrie 4.0. Ce chapitre donne tout d’abord les enjeux de l’industrie 4.0 en ce qui concerne le pilotage de la production. Il résume ensuite le contexte et l’évolution des systèmes de pilotage pour les systèmes de production holoniques avec un bilan bibliographique permettant de mettre en exergue les verrous qu’il reste à traiter dans ce contexte. L’enjeu de ce projet est de conduire des recherches contribuant à la définition et au développement d’un système de pilotage hybride hiérarchique/hétéroarchique pour les systèmes de production holoniques dans le but de prendre en compte les perturbations dans un contexte d’industrie 4.0. En particulier, ce projet s’appuie fortement sur les outils et méthodes présentés dans le chapitre 2 du document autour de l’optimisation sous perturbations. Le projet est décomposé en 4 axes que je détaille à travers les verrous qu’ils cherchent à aborder. Ce projet est ensuite positionné dans son contexte local, régional, national et international. Ce chapitre se termine par la présentation de mon projet d’enseignement qui se caractérise, d’une part, par ma responsabilité d’un parcours dans la prochaine accréditation du Master “Ingénierie des Systèmes Complexes” et d’autre part par la définition d’une plateforme dédiée à l’enseignement et la recherche. Le parcours “Ingénierie Numérique et PiLotage pour l’Industrie Connectée” fait clairement écho au projet de recherche puisqu’il a notamment vocation à former des futurs cadres pour le pilotage de la production dans l’industrie 4.0.

Ce document finit par l’annexe A qui résume mes contributions à la recherche sur l’interopérabilité autour des informations sur le produit du point de vue “modélisation de la connaissance et des informations”.



# Chapitre 1

## Synthèse des activités liées à l'enseignement et la recherche

### Sommaire

---

<b>1.1 Curriculum Vitae . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1.1 Titres Universitaires . . . . .	16
1.1.2 Situation Administrative . . . . .	17
1.1.3 Synthèse de la carrière . . . . .	17
<b>1.2 Activités liées à l'enseignement . . . . .</b>	<b>18</b>
1.2.1 Présentation générale . . . . .	18
1.2.2 Responsabilités administratives . . . . .	19
1.2.3 Présentation synthétique des enseignements : 2008-2017 . . . . .	19
<b>1.3 Activités liées à la recherche . . . . .</b>	<b>21</b>
1.3.1 Synthèse des publications . . . . .	21
1.3.2 Activités d'encadrement de la recherche . . . . .	27
1.3.3 Rayonnement Scientifique . . . . .	29
1.3.4 Valorisation de la recherche . . . . .	30
1.3.5 Participation à des groupes de travail et sociétés savantes . . . . .	30
1.3.6 Participation à des projets de recherche . . . . .	31
1.3.7 Responsabilités Scientifiques . . . . .	31
1.3.8 Responsabilités collectives . . . . .	31

---

## 1.1 Curriculum Vitae

Alexis AUBRY  
Né le 4 février 1980 à Saverne (67)  
Marié, 3 enfants

---

Adresse personnelle  
rue de Nancy, RD 974  
54230 Chavigny

---

Adresse professionnelle  
CRAN UMR 7039  
Campus Sciences  
BP 70239  
54506 Vandœuvre-lès-Nancy

---

Téléphone professionnel : +33 (0)3 72 74 52 19  
E-mail : alexis.aubry@univ-lorraine.fr  
Site Web : www.alexis-aubry.fr

### 1.1.1 Titres Universitaires

---

**2007** **Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble**  
Spécialité : Automatique Productique  
Titre : **Optimisation pour la configuration robuste de systèmes de production de biens et de services**

Directrice de thèse : Prof. M. Jacomino  
Co-Encadrante : Prof. M.-L. Espinouse

Composition du jury  
Président : Prof. Y. Frein  
Rapporteurs : Prof. P. Baptiste, Prof. A. Dolgui, Prof. D. Trentesaux  
Examineur : Dr. M. Ali Aloulou

**2004** **Master 2 Recherche de L'Institut National Polytechnique de Grenoble**  
Spécialité : Automatique - Productique

**2004** **Diplôme d'Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Électriciens de Grenoble (ENSIEG)**

**1998** **Baccalauréat Série S** (Lycée Jules Ferry de Saint-Dié)

---

### 1.1.2 Situation Administrative

Maître de Conférences Classe Normale Échelon 6 sur le poste 61MCF0231

- Enseignant au Collegium Sciences et Technologies, à la Faculté des Sciences et Technologies, au Département d'Automatique de l'Université de Lorraine depuis le 01/09/2008.
- Chercheur au Centre de Recherche en Automatique de Nancy, Unité Mixte de Recherche UMR 7039, Université de Lorraine, CNRS dirigée par le Pr. Didier Wolf, au sein du département Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques (animateurs Pr. B. Iung et Pr. A. Thomas), Projet Systèmes & Objets Intelligents en Interaction (animé par Pr. P. Charpentier).
- Rattaché à la 61<sup>ème</sup> section du CNU.

### 1.1.3 Synthèse de la carrière

Date	Faits marquants
09/2008	Nommé en tant que Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré Enseignant à la Faculté des Sciences et Technologies Chercheur au CRAN CNRS UMR 7039
09/2009	Titularisation
09/2011	Thèse <b>Esma Yahia</b> : "Contribution à l'évaluation sémantique entre systèmes d'information d'entreprise : Application aux systèmes d'information de pilotage de la production." Directeur : Pr. Hervé Panetto Co-encadrant : Dr. Alexis Aubry <b>1er prix de thèse de l'Université de Lorraine, pôle IAEM</b>
2013 à 2018	Référent "Productique" de la licence SPI Responsable de la spécialité "Ingénierie Système par la Pratique" du master ISC Responsable de l'alternance pour le master ISC
07/2014	Obtention de la <b>PEDR niveau A</b> (CNU 61ème section)
11/2014	Membre du comité d'organisation de MOSIM'2014
01/2015	Thèse <b>Antonio Giovannini</b> : "A knowledge representation framework for the design and the evaluation of a product variety" Directeur : Pr. Hervé Panetto Co-directeur : Dr. Alexis Aubry Co-encadrante : Dr. Hind Bril El Haouzi
10/2016	Thèse <b>Anderson Luis Szejka</b> : "Contribution to interoperable product design and manufacturing information : Application to plastic injection products manufacturing." Thèse en cotutelle avec la Pontifical Catholic University of Parana (Brésil) Directeurs : Pr. Hervé Panetto et Pr. Osiris Canciglieri Junior (Brésil) Co-directeur : Dr. Alexis Aubry Co-encadrant : Dr. Eduardo Rocha Loures (Brésil)
11/2017	Organisation des 24èmes journées STP du GDR MACS Membre du comité de pilotage – Responsable du programme
01/2018	Élu au conseil de laboratoire du CRAN Représentant des Chercheurs et Enseignants-Chercheurs Permanents

Ma carrière a commencé en 2008 comme Maître de Conférences à la Faculté des Sciences et Technologies de Vandœuvre-lès-Nancy au sein de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1. Depuis 2012, L'université Nancy 1 a fusionné dans l'Université de Lorraine avec les autres universités de la région sans que cela ne modifie mon lieu d'affectation.

Mes enseignements sont principalement effectués au sein de la licence Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) et du master Ingénierie de Systèmes Complexes (ISC). Ils seront détaillés dans la section 1.2 de ce chapitre.

D'un point de vue recherche, après un doctorat effectué au Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG), de 2004 à 2006, puis au laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble (G-SCOP) de 2006 à 2007<sup>6</sup>, j'ai eu un poste de post-doctorant (en tant qu'ATER) au sein du laboratoire G-SCOP toujours sur l'année universitaire 2007-2008. Ma thématique de recherche portait sur la prise en compte des incertitudes pour l'optimisation robuste de systèmes de production. Les outils utilisés étaient principalement ceux de la recherche opérationnelle.

Depuis mon recrutement en tant que Maître de Conférences en 2008, je suis membre du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), dirigé actuellement par le professeur Didier Wolf. J'ai contribué à plusieurs groupes thématiques (SYMPA et ISET) et co-encadre ou ai co-encadré quatre thèses sous la direction du Professeur Hervé Panetto et du Professeur Jean-François Pétin.

Suite à mon arrivée au CRAN en 2008, le domaine d'application de mes travaux de recherche s'est orienté sur les problèmes d'interopérabilité autour des informations du produit dans les systèmes industriels. Cette problématique importante dans le contexte de la généralisation des systèmes d'information a notamment impliqué de monter en compétence sur des nouveaux outils dédiés à la modélisation des informations comme UML ou les ontologies. Les activités liées à la recherche sont présentées dans la section 1.3 de ce chapitre.

## 1.2 Activités liées à l'enseignement

### 1.2.1 Présentation générale

Depuis mon recrutement en 2008, j'ai effectué toute ma carrière au sein de la Faculté des Sciences et Technologies de Vandœuvre-lès-Nancy. La majeure partie de mon service est réalisée au sein de la licence Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) et du master Ingénierie de Systèmes Complexes (ISC). Je suis intervenu également au sein d'un DUT GMP, d'un DUT QLIO et de plusieurs écoles d'ingénieurs (Telecom Nancy, ENSTIB).

Mon enseignement s'articule principalement (à 96%) autour de 3 thématiques : Management de la Production, Qualité et Génie Informatique. Pour chacun de ces enseignements, je participe aux cours magistraux (CM), aux travaux dirigés (TD) et aux travaux pratiques (TP).

Mes enseignements en management de la production vont de la définition des concepts de base en production (articles, nomenclatures, gammes... ) aux méthodes avancées pour le management de la production (Lean Management et Manufacturing, Pilotage décentralisé par Systèmes Multi-Agents) en passant par les méthodes classiques (MRP, juste-à-temps, OPT) et les systèmes d'information d'entreprise (modélisation entreprise et paramétrage ERP). Mes enseignements en qualité vont de la formation aux outils de base pour la qualité (Maîtrise Statistique des Processus, capabilités, cartes de contrôles, Plans d'Expériences) jusqu'à leur intégration dans une méthode plus complète de résolution des problèmes qualité telle que 6-Sigma. Mes enseignements en

---

6. suite à une reconfiguration des laboratoires sur Grenoble

Génie Informatique couvrent la modélisation orientée objet pour la conception de programmes informatiques et pour la définition et le développement de bases de données.

Si la pratique pédagogique est relativement classique au niveau "Licence", elle se caractérise au niveau "Master" par l'envie de dépasser les classiques enchaînements CM/TD/TP en introduisant des études de cas le plus tôt possible afin de faire de l'intégration CM/TD/mise en œuvre et favoriser ainsi l'apprentissage par projet.

J'ai construit, pour le master ISC, les enseignements autour du Lean management et du 6-sigma. Je suis actuellement en cours de certification black belt Lean 6-Sigma afin de donner plus d'assise à cet enseignement (certificat de compétences niveau black belt obtenu, il reste la partie pratique à faire certifier).

Depuis 2012, j'ai participé à la formalisation des habilitations des formations Licence SPI et Master ISC. Je participe depuis 2016 au montage de la prochaine accréditation du master ISC (2018-2022) dans laquelle je serai responsable de la spécialité Ingénierie Numérique et PiLotage pour l'Industrie Connectée (INPLIC).

Je me suis également investi dans l'accompagnement des étudiants par l'encadrement de projets en L3 SPI, M1 et M2 ISC et par le tutorat de stagiaires en M2 ISC ou alternants M2 ISC.

## 1.2.2 Responsabilités administratives

### 1.2.2.1 Direction et animation de formations

- À partir de Septembre 2018, responsable de la spécialité "Ingénierie Numérique et PiLotage pour l'Industrie Connectée" du master ISC.
- De 2013 à 2018, référent pour la partie productique en licence SPI.
- De 2013 à 2018, responsable de la spécialité "Ingénierie Système par la Pratique" du Master ISC. Spécialité réservée à la formation par l'alternance au sein du master ISC. Entre 6 et 8 étudiants par année. Animation de l'équipe pédagogique pour les UEs propres aux alternants.
- De 2013 à 2018, responsable de l'alternance pour le Master ISC.

### 1.2.2.2 Management de l'enseignement

- À partir de 2018, membre de la commission d'admission du Master ISC
- À partir de 2018, membre du conseil de perfectionnement du Master ISC
- De 2013 à 2018, membre de la commission d'admission de la licence SPI et du Master ISC
- De 2013 à 2018, membre du conseil de perfectionnement de la licence SPI et du master ISC

## 1.2.3 Présentation synthétique des enseignements : 2008-2017

L'ensemble de mes enseignements de niveau licence est en formation initiale et présentielle. Les enseignements de master sont en présentielle et peuvent être partagés entre la formation initiale et continue et la formation professionnelle : il n'y a pas de groupes distincts. En moyenne, mon service annuel s'élève à un peu plus de 277 H.Eq.TD sans compter les heures de référentiel pour des responsabilités administratives. La figure 1.1 présente la répartition de mes enseignements entre 2008 et 2017 selon la thématique (Gestion de la production, Qualité, Génie informatique, Automatique des Systèmes à Événements Discrets (SED), Ingénierie Système, Encadrement des étudiants), selon la nature de l'enseignement (CM, TD, TP) et enfin selon le niveau du diplôme.

Les heures associées à l'encadrement des étudiants sont les heures rémunérées et ne sont donc pas représentatives de l'investissement associé. C'est pourquoi elles ne sont pas prises en compte dans les diagrammes en secteurs. Le tableau de la figure 1.1 ne contient pas les heures de référentiel pour mes responsabilités au sein de la licence SPI et du master ISC.

Thématique	Niveau	CM	TD	TP	Total présentiel	Total Eq. TD	Total présentiel par thématique	Total Eq. TD par thématique	
Gestion de la production	L3	50	110	83	243	268	1104	1253	
	M1	172	212	242	626	712			
	M2	76	64	95	235	273			
Qualité	L2	28	70	155.5	253.5	267.5	557.5	627.5	
	L3	32	32	45	109	125			
	M1	60	58	42	160	190			
Génie Informatique	M2	20	14	1	35	45	411	440	
	L3	6	6	51	63	66			
Automatique des SED	M1	52	108	188	348	374	54	56	
	L2	0	3	12	15	15			
	L3	0	16	15	31	31			
Ingénierie Système	M1	4	4	0	8	10	36	36	
	M2	0	4	0	4	4			
Encadrement étudiants	Projets	M1	0	12.25	8	20.25	20.25	81.25	83.75
		M2	5	21	6	32	34.5		
	Stage	M2	0	8	0	8	8		
		Total	505	774.25	964.5	2243.75	2496.25		

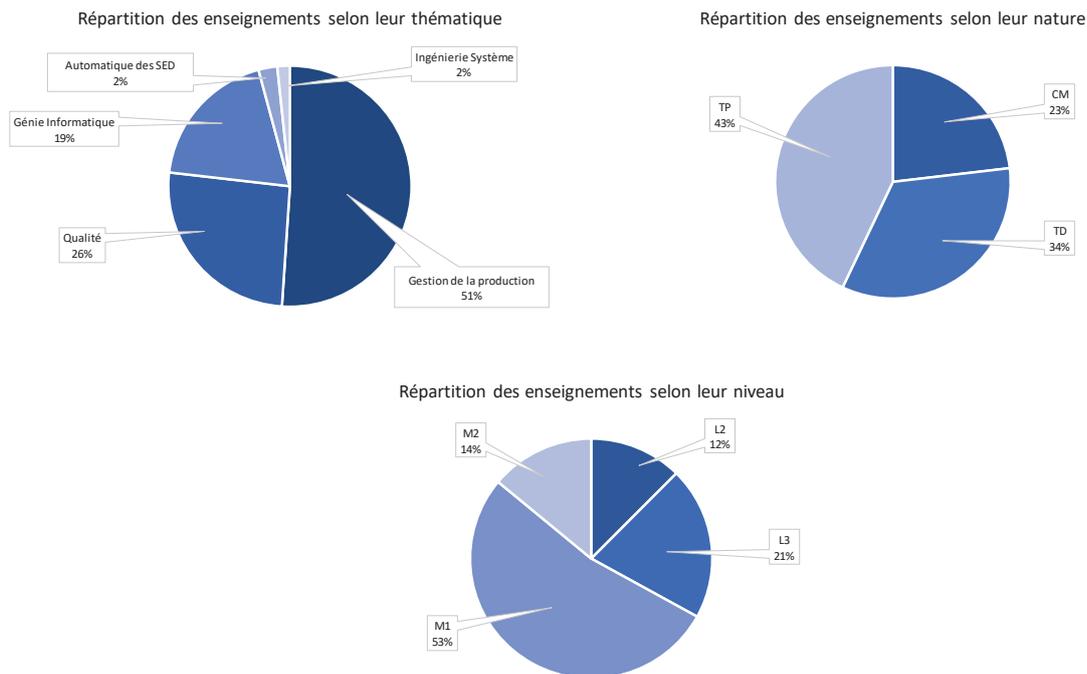


FIGURE 1.1 – Synthèse des enseignements selon la thématique, le niveau de diplôme et la nature entre 2008 et 2017

La moitié de mes enseignements (51 %) concerne le management de la production qui est également la thématique principale de mon activité de recherche. Viennent ensuite la Qualité puis le Génie Informatique qui sont souvent des activités support au management de la production.

Plus de la moitié de mes enseignements ont pour public des étudiants de niveau M1 (53%). Les matières associées au management de la production et à la qualité sont rarement enseignées

avant le niveau L3 sauf dans les formations directement professionnalisantes à bac+2 comme les DUT.

### 1.2.3.1 Participation dans les diplômes

- 2008-2009
  - Licence EEAR : L3 – Génie Informatique / Automatique des SED
  - Licence SM : L3 – Management de la production / Qualité / Automatique des SED
  - Master IS-EEAPR : M1 et M2 – Management de la production / Qualité / Génie Informatique / Automatique des SED
  - DUT QLIO : L2 – Qualité
- 2009-2013
  - Licence SPI : L3 – Management de la Production / Qualité / Génie Informatique
  - Master ISC : M1 et M2 – Management de la Production / Qualité / Génie Informatique
  - DUT GMP : L3 – Qualité
  - École d'ingénieurs ESIAL : M1 – Management de la Production
  - École d'ingénieurs des Mines de Nancy : M1 – Management de la Production
- 2013-2018
  - Licence SPI : L3 – Management de la Production / Qualité / Génie Informatique
  - Master ISC : M1 et M2 – Management de la Production / Qualité / Génie Informatique
  - DUT GMP : L2 – Qualité
  - Master Design Global : M1 – Génie Informatique
  - École d'ingénieurs Telecom'Nancy : M1 – Management de la production
  - École d'ingénieurs ENSTIB : M2 - Management de la production / Qualité
  - IAE Metz : M2 – Qualité

### 1.2.3.2 Responsabilité d'UEs

- Ingénierie Numérique du produit : de la conception à la mesure (L3 SPI)
- Du produit 3D au produit fabriqué (L3 SPI)
- Management de la production (L3 SPI)
- Gestion de production (M1 ISC)
- Systèmes de planification et de pilotage de la production (M1 ISC)
- Modélisation et Simulation des flux (M1 ISC)
- Apprendre la maîtrise d'œuvre d'un projet d'IS (M2 ISC)
- Six Sigma et Lean pour la performance (M2 ISC)

## 1.3 Activités liées à la recherche

### 1.3.1 Synthèse des publications

Le tableau 1.1 donne la synthèse des publications dans lesquelles j'ai contribué.

La section suivante dresse la liste exhaustive des publications auxquelles j'ai participé. Mon nom y figure en gras. Les publications faisant référence à des travaux avec des étudiants encadrés sont reconnaissables par le fait que ces étudiants sont soulignés. Les impacts factors JCR des revues lorsqu'ils sont connus sont donnés entre parenthèses et en gras. Il s'agit de ceux de l'année 2017. J'utiliserai les identifiants de ces références tout au long du document pour les citer.

TABLE 1.1 – Synthèse des publications

Type de publication	Nombre
Revue internationale à comité de lecture	16 (dont 15 JCR)
Direction d'ouvrages et de proceedings	2
Conférences, congrès, colloques internationaux à comité de lecture avec actes	25
Revue avec comité de lecture à diffusion nationale	1
Revue sans comité de lecture ou à vocation pédagogique	3
Conférences nationales avec comité de lecture et actes	9
Autres	1

### 1.3.1.1 Articles dans des revues internationales à comité de lecture (16)

- (R1) M. Zdravković, J. Zdravković, **A. Aubry**, N. Moalla, W. Guédria, J. Sarraipa. Domain framework for implementation of open IoT ecosystems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, accepté en 2017, A Paraître, **(2,325)**.
- (R2) A. Szejka, O. Canciglieri Jr., H. Panetto, E. Loures, **A. Aubry**. Semantic interoperability for an integrated product development process : a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, 2017, 55 (22), pp.6691-6709 **(2,325)**.
- (R3) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, H. Bril El-Haouzi, O. Canciglieri Jr, L. Pierrel. Knowledge representation, retrieval and reuse for product family design : an anti-logicist approach. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, 2016, 101, pp.391-402 **(2,623)**.
- (R4) **A. Aubry**, H. Panetto, M. Dassisti. Toward an interoperable software platform for sustainable energy. *Computer Science and Information Systems*, ComSIS Consortium, 2015, 12 (3), pp.1079-1100. **(0,837)**
- (R5) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, H. Bril El-Haouzi, L. Pierrel, M. Dassisti. Anti-logicist framework for design-knowledge representation. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, 2015, 39 (1), pp.144-157. **(2,627)**
- (R6) M. Zdravković, H. Panetto, M. Trajanović, **A. Aubry**. Explication and semantic querying of Enterprise Information Systems. *Knowledge and Information Systems (KAIS)*, Springer, 2014, 40 (3), pp.697-724. **(2,004)**
- (R7) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, M. Dassisti, H. El Haouzi. Ontology-based system for supporting manufacturing sustainability. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, 2012, 36 (2), pp.309-317. **(2,627)**
- (R8) M. Lezoche, E. Yahia, **A. Aubry**, H. Panetto, M. Zdravković. Conceptualising and structuring semantics in Cooperative Enterprise Information Systems Models. *Computers in Industry*, Elsevier, 2012, 63 (8), pp.775-787. **(2,691)**
- (R9) **A. Aubry**, M. Jacomino, A. Rossi, M.-L. Espinouse. Maximizing the configuration robustness for parallel multi-purpose machines under setup cost constraints. *Journal of Scheduling*, Springer Verlag, 2012, 15 (4), pp.457-471. **(1,281)**
- (R10) E. Yahia, **A. Aubry**, H. Panetto. Formal measures for semantic interoperability assessment in cooperative enterprise information systems. *Computers in Industry*, Elsevier, 2012, 63 (5), pp.443-457. **(2,691)**
- (R11) M. Lezoche, **A. Aubry**, H. Panetto. Formal Fact-Oriented model transformations for Cooperative Information Systems semantic conceptualisation. Enterprise Information Systems. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 2012, LNBIP 102, pp.117-131.

- (R12) E. Yahia, M. Lezoche, **A. Aubry**, H. Panetto. Semantics enactment for interoperability assessment in Enterprise Information Systems. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, 2012, 36 (1), pp.101-117. **(2,627)**
- (R13) A. Rossi, **A. Aubry**, M. Jacomino. Connectivity-and-hop-constrained design of electricity distribution networks. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, 2012, 218 (1), pp.48-57. **(3,297)**
- (R14) A. Rossi, **A. Aubry**, M. Jacomino. A sensitivity analysis to assess the completion time deviation for multi-purpose machines facing demand uncertainty. *Annals of Operations Research*, Springer Verlag, 2011, 191 (1), pp.219-249. **(1,709)**
- (R15) M. Zdravković, H. Panetto, M. Trajanović, **A. Aubry**. An Approach for Formalizing the Supply Chain Operations. *Enterprise Information Systems*, Taylor & Francis, 2011, 5 (4), pp.401-421. **(1,908)**
- (R16) **A. Aubry**, A. Rossi, M.-L. Espinouse, M. Jacomino. Minimizing setup costs for parallel multi-purpose machines under load-balancing constraints. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, 2008, 187 (3), pp.1115-1125. **(3,297)**

### 1.3.1.2 Directions d'ouvrages et de proceedings (2)

- (DO1) **A. Aubry**, W. Derigent. Numéro spécial pour le Journal Européen des Systèmes Automatisés – volume 49(3), suite à la conférence MOSIM'2014. *Modélisation, Optimisation et Simulation pour le développement durable*. France. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 49 (3). 2016.
- (DO2) I. Ciuciu, H. Panetto, C. Debruyne, **A. Aubry**, P. Bollen, R. Valencia-García, A. Mishra, A. Fensel, F. Ferri. On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2015 Workshops : Confederated International Workshops : OTM Academy, OTM Industry Case Studies Program, EI2N, FBM, INBAST, ISDE, META4eS, and MSC 2015, Rhodes, Greece, October 26-30, 2015. Proceedings. 2015.

### 1.3.1.3 Conférences, congrès et colloques internationaux à comité de lecture et actes (25)

- (C1) S. Himmiche, **A. Aubry**, P. Marangé, J.-F. Pétrin, M. Dufflot. *Using statistical-model-checking-based simulation for evaluating the robustness of a production schedule*. 7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA'17, Oct 2017, Nantes, France. 2017.
- (C2) S. Himmiche, **A. Aubry**, P. Marangé, J.-F. Pétrin. *Modeling flexible workshops scheduling problems : evaluating a timed automata based approach vs MILP*. 20th IFAC World Congress, IFAC 2017, Jul 2017, Toulouse, France. 2017.
- (C3) A. Szejka, O. Canciglieri Jr, H. Panetto, **A. Aubry**, E. Rocha Loures. *A semantic reconciliation view to support the interoperable information relationships in product design and manufacturing*. 20th IFAC World Congress, IFAC 2017, Jul 2017, Toulouse, France. 2017.
- (C4) P. Marangé, **A. Aubry**, J.-F. Pétrin. Ordonnancement d'ateliers à partir de patrons de modélisation basés sur des automates communicants. 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM'2016), Aug 2016, Montréal, Canada. 2016.

- (C5) **A. Aubry**, H. Bril, A. Thomas, M. Jacomino. *Product driven systems facing unexpected perturbations : how operational research models and approaches can be useful ?*. 6th workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA 2016, Oct 2016, Lisbonne, Portugal. 2016.
- (C6) A. Szejka, O. Canciglieri Jr., E. Loures, H. Panetto, **A. Aubry**. *Proposal of a model-driven ontology for product development process interoperability and information sharing*. 13th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, PLM16, Jul 2016, Columbia, SC, United States. 2016.
- (C7) M. Zdravković, M. Trajanović, J. Sarraipa, R. Jardim-Gonçalves, M. Lezoche, **A. Aubry**, H. Panetto. *Survey of Internet-of-Things platforms*. 6th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2016, Feb 2016, Kopaonik, Serbia. 1, pp.216-220. 2016.
- (C8) A. Szejka, O. Canciglieri Jr., E. Rocha Loures, H. Panetto, **A. Aubry**. *Requirements interoperability method to support integrated product development*. The 45th International Conference on Computers & Industrial Engineering, CIE45, Oct 2015, Metz, France. 2015.
- (C9) A. Szejka, **A. Aubry**, H. Panetto, O. Canciglieri Jr., E. Rocha Loures. *Towards a conceptual framework for requirements interoperability in complex systems engineering*. 9th International Workshop on Enterprise Integration, Interoperability and Networking (EI2N'2014), Oct 2014, Amantea, Italy. Springer, On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2014 Workshops, Amantea, Italy, October 27-31, 2014. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 8842, LNCS 8842, pp.229-240, 2014.
- (C10) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, H. El Haouzi, L. Pierrel, M. Dassisti. *Approach for the rationalisation of product lines variety*. 19th IFAC World Congress, Aug 2014, Cape Town, South Africa. 19 (1), pp.3280-3291. 2014.
- (C11) **A. Aubry**, H. Panetto. *Towards interoperability properties for tooling a software bus for energy efficiency*. 4th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2014, Mar 2014, Kopaonik, Serbia. 1, pp.285-291. 2014.
- (C12) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, H. El Haouzi, L. Pierrel. *Knowledge-based system for customer variety representation in product lines definition*. IFIP. 6th Doctoral Workshop on "Product and Asset Lifecycle Management", PALM 2014, Jan 2014, Les Diablerets, Switzerland. 2014.
- (C13) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, Hind El-Haouzi. *Mass customisation in sustainable networked enterprises*. Luis M. Camarinha-Matos ; Raimar J. Scherer. 14th Working Conference on Virtual Enterprises, (PROVE), Sep 2013, Dresden, Germany. Springer, IFIP Advances in Information and Communication Technology, AICT-408, pp.670-678, 2013, Collaborative Systems for Reindustrialization. 2013.
- (C14) **A. Aubry**, J. Noel, D. Rahon, H. Panetto. *A cross-scale models interoperability problem : the Plate-Form(E)3 project case study*. 3rd industry Applications and Standard initiatives for Cooperative Information Systems for Interoperable Infrastructures, Sep 2013, Graz, Austria. Springer, LNCS 8186, pp.57-61, 2013, Lecture Notes in Computer Science. 2013.
- (C15) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, M. Dassisti, H. El-Haouzi. *Knowledge-based system for manufacturing sustainability*. 14th IFAC Symposium on Information Control problems in Manufacturing, INCOM'2012, May 2012, Bucharest, Romania. Elsevier, 14 (1), pp.1333-1338. 2012.

- (C16) M. Zdravković, M. Trajanović, H. Panetto, **A. Aubry**, M. Lezoche. *Ontology-based supply chain process configuration*. University of Nis. 34th International Conference on Production Engineering, ICPE 2011, Sep 2011, Nis, Serbia. pp.399-402. 2011.
- (C17) E. Yahia, M. Lezoche, **A. Aubry**, H. Panetto. *Semantics enactment in Enterprise Information Systems*. IFAC. 18th IFAC World Congress, IFAC WC'2011, Aug 2011, Milan, Italy. Elsevier - IFACPapersOnline, 18 (1), pp.13064-13073. 2011.
- (C18) M. Lezoche, H. Panetto, **A. Aubry**. Conceptualisation approach for cooperative information systems interoperability. ACM. 13th International Conference on Enterprise Information Systems, ICEIS 2011, Jun 2011, Beijing, China. pp.101-110. 2011.
- (C19) E. Yahia, J. Yang, **A. Aubry**, H. Panetto. *On the Use of Description Logic for Semantic Interoperability of Enterprise Systems*. 4th IFAC/IFIP EI2N'2009 workshop on Enterprise Integration, Interoperability and Networking, Nov 2009, Vilamoura, Portugal. Springer Verlag, LNCS 5872, pp.205-215, 2009, Lecture Notes in Computer Science. 2009.
- (C20) **A. Aubry**, A. Rossi, M. Jacomino. *A generic off-line approach for dealing with uncertainty in production systems optimisation*. 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'2009, Jun 2009, Moscou, Russia. pp.1464-1469. 2009.
- (C21) **A. Aubry**, A. Rossi, M. Jacomino. *Sensitivity Analysis for the configuration of a multi-purpose machines workshop*. 17th IFAC World Congress, IFAC'08, Jul 2008, Seoul, South Korea. pp.15831-15836. 2008.
- (C22) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino. *A max-min approach to delay load-scheduling in power distribution networks despite source-capacity uncertainties*. International Network Optimization Conference (INOC'07), 2007, Spa, Belgium. 6 p. 2007.
- (C23) B. Enacheanu, B. Raison, D. Ivanova, R. Caire, **A. Aubry**, N. Hadjsaid. *Flexible Electric Infrastructures for Advanced Distribution Automation*. CRIS 2006, Third International Conference on Critical Infrastructures, Sep 2006, Alexandria, United States. 2006.
- (C24) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino, B. Raison. *About configuration under uncertainty of a power distribution network*. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'2006), May 17-19, 2006, Saint-Etienne, France. 2006.
- (C25) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino. *Robust Load-Balanced Configuration With Fixed Costs For The Parallel Multi-Purpose Machines Problem*. IEEE 2006 International Conference on Service Systems and Service Management, 25-27 octobre 2006, Troyes, France. 2006.

#### 1.3.1.4 Articles dans des revues avec comité de lecture à diffusion nationale (1)

- (RN1) E. Yahia, M. Lezoche, **A. Aubry**, H. Panetto. Extraction de la structure de la sémantique dans les modèles de système d'information d'entreprises collaboratives. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série ISI : Ingénierie des Systèmes d'Information*, Lavoisier, 2012, 17 (4), pp.49-77.

#### 1.3.1.5 Articles dans des revues sans comité de lecture ou à vocation pédagogique (3)

- (RP1) A. Szejka, **A. Aubry**, H. Panetto, O. Canciglieri Jr., E. Rocha Loures. A method for formalizing requirements interoperation in complex systems engineering. *INSIGHT - International Council on Systems Engineering (INCOSE)*, Wiley, 2015, 18 (4), pp.28-30.

- (RP2) A. Giovannini, **A. Aubry**, H. Panetto, Hind El-Haouzi. A systemic perspective for mass customization : an approach for product lines definition. *INSIGHT - International Council on Systems Engineering (INCOSE)*, Wiley, 2013, 16 (4), pp.10-12.
- (RP3) E. Yahia, **A. Aubry**, H. Panetto. Systems Interoperability Evaluation through Formalisation of Semantic Relationships. *INSIGHT - International Council on Systems Engineering (INCOSE)*, Wiley, 2011, 14 (4), pp.9-10.

#### 1.3.1.6 Communications dans des conférences nationales avec comité de lecture et actes (9)

- (CN1) S. Himmiche, P. Marangé, **A. Aubry**, M. Duflot, J.-F. Pétin. *Evaluation de la robustesse d'un ordonnancement par Automates Temporisés Stochastiques*. 11ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2017, Nov 2017, Marseille, France. 2017.
- (CN2) R. Pannequin, P. Marangé, **A. Aubry**, J.-F. Pétin. *TABS : un outil logiciel d'ordonnancement de la production basé sur les automates temporisés*. 11ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2017, Nov 2017, Marseille, France. 2017.
- (CN3) P. Marangé, **A. Aubry**, J.-F. Pétin. *Ordonnancement d'ateliers à partir de patrons de modélisation basés sur des automates communicants*. Stephan Merz and Jean-François Pétin. 10ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2015, Nov 2015, Nancy, France. 2015.
- (CN4) E. Yahia, **A. Aubry**, H. Panetto. *Explicitation de la sémantique de modèles de systèmes d'information d'entreprise*. GDR MACS. 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS, Jun 2011, Marseille, France. pp.CDR0M, 2011.
- (CN5) M. Le, **A. Aubry**, M. Jacomino. *Multiparametric programming to assess the completion time sensitivity of multipurpose parallel machines*. 10ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'2009), 2009, Toulouse, France.
- (CN6) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino. *Robustesse en optimisation : avantages et limites de quelques approches*. 9ème congrès de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'2008), 2008, France.
- (CN7) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino. *Configuration d'un réseau de distribution d'électricité en contexte incertain*. Conférence conjointe FRANCORO V/ROADEF 2007, 2007, Grenoble, France. pp 9-19, 2007.
- (CN8) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino, A. Rossi. *Minimisation des coûts liés à la configuration robuste d'un parc de machines polyvalentes*. 6ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF, Feb 2005, Tours, France. 2005.
- (CN9) **A. Aubry**, M.-L. Espinouse, M. Jacomino, P. Mrozicki. *Compromis entre robustesse et coût pour la configuration d'un parc de machines parallèles partiellement multifonctions*. Alexandre Vautier, Sylvie Saget. MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, Nov 2005, Rennes, France. pp.331-338, 2005.

#### 1.3.1.7 Thèse

- (Th) **A. Aubry**. Optimisation pour la configuration robuste de systèmes de production de biens et de services. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007.

### 1.3.1.8 Autres publications (1)

- (OP1) E. Yahia, M. Lezoche, **A. Aubry**, H. Panetto. *Extraction de la sémantique dans les modèles de systèmes d'information d'entreprises collaboratifs*. Journée Nationale du GT Easy-DIM, Apr 2011, Lyon, France. 2011.

## 1.3.2 Activités d'encadrement de la recherche

### 1.3.2.1 Synthèse des encadrements scientifiques

Depuis 2008, j'ai co-encadré 3 thèses soutenues et 1 en cours. J'ai également supervisé 1 post-doctorant et 4 Master Recherche. Le tableau 1.2 donne une synthèse de ces encadrements.

TABLE 1.2 – Synthèse des encadrements

Type Encadrement	Nombre total	Dont en cours	Pourcentage total d'encadrement
Post Doc	1	0	50%
Thèse	4 (dont 2 avec ACT <sup>7</sup> )	1	149%
Master 2 Recherche	4	0	200%

### 1.3.2.2 Liste des masters encadrés

- [MR4] **Sara Himmiche** : *Utilisation des langages et modèles SED stochastiques pour l'ordonnement de systèmes flexibles de production*. 2017. Encadrement à 50%. Co-encadrante : Dr. Pascale Marangé (50%). Production Scientifique : 2 conférences internationales et une conférence francophone (C1, C2, CN1). [Himmiche et al., 2018, Himmiche et al., 2017a, Himmiche et al., 2017b]
- [MR3] **Marco Dicorato** : *Vers une approche ontologique pour le Lean Six-Sigma*. 2012. Encadrement à 50%. Co-encadrante : Dr. Esma Yahia (50%).
- [MR2] **Antonio Giovannini** : *Conceptualisation ontologique d'un système d'information pour le partage de connaissances dans un contexte PLM*. 2011. Encadrement à 50%. Co-encadrante : Dr. Hind Bril El-Haouzi (50%). Production Scientifique : 1 revue internationale JCR (R7) et 1 conférence internationale (C15). [Giovannini et al., 2012b, Giovannini et al., 2012a]
- [MR1] **Jing Yang** : *On the use of Description Logic to formalize interoperability semantics between the product information system and enterprise applications*. 2009. Encadrement à 50%. Co-encadrante : Dr. Esma Yahia (50%). Production scientifique : 1 conférence internationale (C19). [Yahia et al., 2009]

### 1.3.2.3 Liste des thèses en cours

- [Th4] **Sara Himmiche** : *Ordonnement sous incertitudes basé sur les SED : définition d'un cadre de modélisation et de résolution stochastique, application à l'ordonnement de tâches de production et de maintenance*. 2017–2020 Contrat doctoral. Doctorat de l'Université de Lorraine. Encadrement à 33%. Co-directeur : Jean-François Pétin (34%). Co-encadrante : Dr. Pascale Marangé (33%).

7. Autorisation à Codiriger une Thèse de l'Université de Lorraine

#### 1.3.2.4 Liste des thèses soutenues

[Th3] **Anderson Luis Szejka** : *Contribution to interoperable products design and manufacturing information : Application to plastic injection products manufacturing*. 2013–2016. Doctorat en co-tutelle Université de Lorraine / PUCPR (Brésil). Bourse du gouvernement brésilien (Projet “Sciences sans Frontières”). **Prix du meilleur poster au Forum AFIS 2015**. Encadrement à 33% avec **ACT**<sup>8</sup>. Co-directeurs : Pr. Hervé Panetto (34%) et Pr. Osiris Canciglieri Jr. (33%). Production scientifique : 1 revue internationale JCR (R2) [Szejka et al., 2017a] et 4 conférences internationales (C3, C6, C8, C9) [Szejka et al., 2017b, Szejka et al., 2016, Szejka et al., 2015b, Szejka et al., 2014]. **Dépôt d'une demande de brevet d'invention** au Brésil.

[Th2] **Antonio Giovannini** : *A knowledge representation framework for the design and the evaluation of product variety*. 2012–2015. Doctorat de l'Université de Lorraine en convention CIFRE. **Prix du meilleur papier étudiant à INCOM'2014**. Encadrement à 33% avec **ACT**. Co-directeurs : Pr. Hervé Panetto (34%) et Dr. Hind Bril El-Haouzi (33%). Production scientifique : 2 revues internationales JCR (R3 et R5) [Giovannini et al., 2016, Giovannini et al., 2015] et 3 conférences internationales (C10, C12, C13) [Giovannini et al., 2014c, Giovannini et al., 2014b, Giovannini et al., 2013].

[Th1] **Esma Yahia** : *Contribution à l'Évaluation de l'Interopérabilité Sémantique entre Systèmes d'Information d'Entreprises : Application aux Systèmes d'Information de Pilotage de la Production*. 2008–2011. Doctorat de l'Université de Lorraine en contrat doctoral. **1<sup>er</sup> prix de thèse de l'Université de Lorraine, Pôle IAEM, 2011-2012**. Encadrement à 50%. Co-directeur : Pr. Hervé Panetto (50%). Production scientifique : 3 revues internationales JCR (R8, R10, R12) [Lezoche et al., 2012b, Yahia et al., 2012a, Yahia et al., 2012c] et 2 conférences internationales (C17, C19) [Yahia et al., 2011d, Yahia et al., 2009].

#### 1.3.2.5 Liste des Post Doc supervisés

[PD1] **Mario Lezoche** : *Explicitating semantics in Enterprise Information Systems Models*. 2010–2011. Diplôme d'Université de Recherche Post-doctorale, Université Henri Poincaré Nancy I, soutenu le 7 novembre 2011, mention TH. Encadrement à 50%. Co-directeur : Pr. Hervé Panetto (50%). Production scientifique : 3 revues internationales JCR (R8, R11, R12) [Lezoche et al., 2012b, Lezoche et al., 2012a, Yahia et al., 2012c] et 3 conférences internationales (C17, C18) [Yahia et al., 2011a, Lezoche et al., 2011].

#### 1.3.2.6 Devenir des docteurs encadrés

- Anderson Luis Szejka : Associate Professor à la PUCPR (Brésil), chercheur au PPGEPS (Brésil).
- Antonio Giovannini : Ingénieur de recherche dans l'entreprise InResLab (Italie), Consultant pour le financement de l'Innovation
- Esma Yahia : Maître de Conférences à l'ENSAM Aix-en-Provence

---

8. Autorisation à codiriger une thèse de l'Université de Lorraine

### 1.3.3 Rayonnement Scientifique

#### 1.3.3.1 Participation à des comités de sélection McF

**2018** : Membre du comité de sélection MCF0611. Grenoble INP / Laboratoire G-SCOP. CNU 27/61. Profil “Ingénierie des flux dans les chaînes de valeur”.

#### 1.3.3.2 Participation à des jurys de thèse

**2016** : *Examineur* pour la thèse de Milan Trifunovic – University of Nis / Faculty of Mechanical Engineering in Nis (Serbie). Titre de la thèse : “Geometric modelling of objects with free-form elements supported by analysis of their semantic features”.

**2014** : *Examineur* pour la thèse de Cosmin Dumitrescu – Université Paris I Panthéon – Sorbonne. Titre de la thèse : “Formalization and exploitation of the coupling between systems engineering and product line methods”.

#### 1.3.3.3 Invitations

**2015** : Chercheur Invité : Séminaire au PUCPR (Brésil) en Septembre 2015 dans le cadre du projet “Sciences sans Frontières”. Invitation par M. le Professeur Osiris Canciglieri. Titre de l’intervention : “Information Systems : Foundations and Perspectives”

**2011** : Chercheur Invité : Séminaire d’une semaine au Politecnico di Bari (Italie) en décembre 2011. Invitation de M. le Prof. Michele Dassisti.

#### 1.3.3.4 Expertise projet

**2013** : Expert auprès de l’ANR pour l’évaluation d’un projet de recherche dans le cadre de l’appel à projets Blanc – Accords bilatéraux 2013 - SIMI 2 - Science informatique et applications.

#### 1.3.3.5 Comité de programme de conférences

**Depuis 2014** : Membre de l’International Programme Committee de la conférence internationale annuelle “International Conference on Information Society and Technology” (ICIST).

**De 2013 à 2015** : Co-chair du workshop annuel EI2N “Enterprise Integration, Interoperability and Networking”. 3 éditions.

#### 1.3.3.6 Responsabilité éditoriale

**2016** : **A. Aubry**, W. Derigent. Numéro spécial pour le Journal Européen des Systèmes Automatisés – volume 49(3), suite à la conférence MOSIM’2014. *Modélisation, Optimisation et Simulation pour le développement durable*. France. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 49 (3). 2016. [Aubry and Derigent, 2016]

**2015** : I. Ciuciu, H. Panetto, C. Debruyne, **A. Aubry**, P. Bollen, R. Valencia-García, A. Mishra, A. Fensel, F. Ferri. On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2015 Workshops : Confederated International Workshops : OTM Academy, OTM Industry Case Studies Program, EI2N, FBM, INBAST, ISDE, META4eS, and MSC 2015, Rhodes, Greece, October 26-30, 2015. Proceedings. 2015. [OTM, 2015]

### 1.3.3.7 Organisation colloques, conférences, journées d'étude

- 2017** Membre du comité de pilotage pour l'organisation des 24èmes journées STP du GDR MACS.
- 2017** Co-organisateur d'une session commune entre les GT SED et Bermudes du GDR MACS dans le cadre des 24èmes journées STP du GDR MACS : "Coopération Bermudes/SED pour répondre aux nouvelles problématiques d'ordonnements".
- 2017** Co-organisateur d'une journée scientifique de la Fédération Charles Hermite<sup>9</sup> le 8 juin 2017 : "Approches à base de modèles Systèmes à Événements Discrets (SED) pour l'ordonnement de tâches manufacturières ou informatiques".
- 2014** Membre du comité d'organisation de la 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM 2014).
- 2009** Membre du comité d'organisation de la 10ème conférence de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'2009).
- 2007** Membre du comité d'organisation de la conférence conjointe FRANCORO V / ROADEF'2007 (5ème Conférence Francophone de Recherche Opérationnelle et 8ème conférence de la Société Française de Recherche Opérationnelle)

### 1.3.3.8 Relecture pour des journaux ou des conférences

**Revue :** Relecteur pour les revues suivantes : CEP, ComSIS, EAAI, EIS, EJOR, Facta Universitatis, IJPR, JESA, JIM

**Conférences :** Relecteur pour les conférences nationales et internationales suivantes : AICCSA, BPMN, CIE, COOPIS, CSDM, EI2N, EMMSAD, ICIST, IESA, IESM, IFAC World Congress, INCOM, IPSSC, IWEI, MCPL, LSS, MED, MIM, MOSIM, ODBASE, PAASC, PRO-VE, ROADEF.

### 1.3.3.9 Publications avec des chercheurs étrangers

Plus de la moitié de mes articles de revues internationales sont le fruit d'une collaboration avec des collègues chercheurs d'une université étrangère (9/16). Ces universités sont de 6 pays différents : Brésil, Italie, Luxembourg, Portugal, Serbie et Suède.

### 1.3.4 Valorisation de la recherche

- 2017 :** Dépôt auprès de l'Institut National de propriété industrielle au Brésil d'une demande de brevet d'invention suite aux travaux de la thèse d'Anderson Szejka.
- 2017 :** TABS : prototype logiciel pour l'ordonnement d'ateliers flexibles de production basé sur les automates communicants (SED). Développement interne au CRAN. TRL 3-4. 1 papier dans une conférence francophone (CN2) [Pannequin et al., 2017].

### 1.3.5 Participation à des groupes de travail et sociétés savantes

**Depuis 2017 :** Membre actif du GT IMS2 du GDR MACS.

---

9. [www.fr-hermite.univ-lorraine.fr](http://www.fr-hermite.univ-lorraine.fr) : Fédération de Recherche du CNRS (FR 3198) qui regroupe les laboratoires CRAN, IECL (mathématiques) et LORIA (Informatique)

**2012-2016** : Membre actif du Groupement d'Intérêt Scientifique Interop-GR de la Grande Région.

**2008-2016** : Membre actif du GT Easy-DIM du GDR MACS.

### 1.3.6 Participation à des projets de recherche

#### 1.3.6.1 À l'échelle nationale

**2013-2015** : Projet ANR Plate-Form(E)3 "Plateforme numérique de calcul et d'optimisation de l'efficacité énergétique et environnementale à différentes échelles pour l'industrie (Composant/Procédé/Usine/Territoire)". **Responsable scientifique pour la Fédération Charles Hermite (CRAN, LORIA, IECL) et responsable d'une tâche.**

#### 1.3.6.2 À l'échelle internationale

**2016-2017** : Projet PHC Pavle Savic avec l'Université de Nis (Serbie) : "Runtime Model-Driven Software for Smart Cyber Physical Systems". **Chef de projet** côté France.

**2015-2019** : Action COST "Innovation in Intelligent Management of Heritage Buildings (i2MHB)". **Membre suppléant du comité de gestion pour la France.**

**2014-2016** : Projet PICS CNRS avec Politecnico di Bari (Italie) "Interoperability assessment for production systems sustainability (IA4PSS)". Chercheur. Porteur : Hervé Panetto.

**2013-2015** : Projet "Sciences sans frontières" avec PUCPR (Brésil) "Model and Formal Approach on Interoperability Engineering applied to the Systems Life Cycle". Chercheur. Porteur : Hervé Panetto.

**2013-2014** : Projet PICS CNRS avec l'Université de Nis (Serbie). "Semantic interoperability approach for Computer Integrated Manufacturing". Chercheur. Porteur : Hervé Panetto.

**2011-2012** : Projet PHC Galilée avec Politecnico di Bari (Italie). Chercheur. Porteur : Hervé Panetto.

### 1.3.7 Responsabilités Scientifiques

**2016-2017** : *Chef de projet* (côté France) du projet PHC Pavle Savic avec l'Université de Nis (Serbie) : "Runtime Model-Driven Software for Smart Cyber Physical Systems".

**Depuis 2015** : *Membre suppléant du comité de gestion pour la France* de l'action COST "Innovation in Intelligent Management of Heritage Buildings (i2MHB)".

**2013-2015** : *Responsable scientifique* pour la Fédération Charles Hermite (CRAN/LORIA/IECL) dans le cadre du projet ANR Plate-Form(E)3, (janvier 2013 – juin 2015) : financement ANR dans le cadre du programme SEED 2012.

**Depuis 2012** : Membre du Conseil Scientifique du Groupement d'Intérêt Scientifique INTEROP-GR

### 1.3.8 Responsabilités collectives

**Depuis janvier 2018** : *Membre élu* du Conseil de laboratoire du CRAN, Représentant des Chercheurs et Enseignants-Chercheurs Permanents.



## Chapitre 2

# Synthèse des travaux de recherche 2008-2017 : Optimisation et aide à la décision pour les systèmes industriels soumis à de la variabilité

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Préambule : Optimisation des systèmes industriels en contexte perturbé . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>2.2</b>	<b>Proposition d'un cadre d'étude pour l'optimisation robuste des systèmes industriels soumis à de la variabilité . . . . .</b>	<b>38</b>
2.2.1	Notre proposition . . . . .	38
2.2.2	Positionnement de cette approche par rapport aux autres travaux . . . . .	40
<b>2.3</b>	<b>Application du cadre d'étude à deux problèmes particuliers d'interopérabilité autour des informations liées au produit . . . . .</b>	<b>44</b>
2.3.1	Thèse de Esmâ Yahia (2008-2011) : Contribution à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprises : Application aux systèmes d'information de pilotage de la production [Yahia, 2011] . . . . .	45
2.3.2	Thèse de Antonio Giovannini (2012-2015) : A knowledge representation framework for the design and the evaluation of product variety [Giovannini, 2015] . . . . .	47
<b>2.4</b>	<b>Master 2 Recherche de Sara Himmiche : Extension du cadre d'étude aux modèles stochastiques . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>2.5</b>	<b>À propos de la thèse d'Anderson Szejka . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>2.6</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>49</b>

---

Je souhaiterais présenter mes travaux de recherche dont la thématique pourrait se résumer à la prise en compte de la variabilité dans l'optimisation et l'aide à la décision pour les systèmes industriels. Les contributions proviennent principalement de l'extension de travaux de ma thèse de doctorat (Th) [Aubry, 2007] et des 2 thèses de doctorat encadrées et soutenues [Th1] [Yahia, 2011] et [Th2] [Giovannini, 2015]. **Les outils manipulés sont des outils issus de la recherche opérationnelle (programmation mathématique, théorie des graphes ...) mais également des outils pour la modélisation des données et de la connaissance tels que UML ou les ontologies (non détaillés ici).**

La figure 2.1 rappelle les deux types de problèmes qui sont rencontrés dès lors qu'on s'intéresse aux systèmes de production et leur pilotage comme cela avait été présenté dans le chapitre introductif de ce document. Cette figure positionne les contributions des thèses encadrées pour la résolution des problèmes identifiés mais également la contribution de ma thèse.

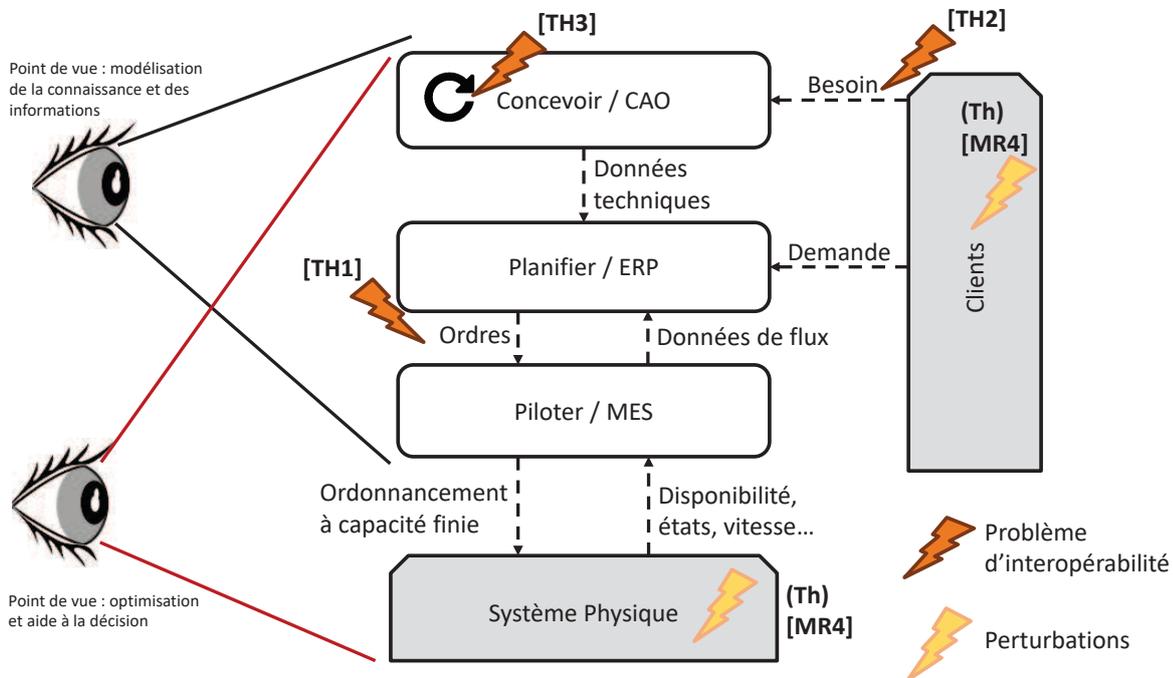


FIGURE 2.1 – Contribution des thèses encadrées dans les problèmes d'interopérabilité et de prise en compte des perturbations

La thèse d'Esma Yahia [Th1] [Yahia, 2011] a contribué à la résolution du problème d'interopérabilité en général mais en montrant une application au problème d'interopérabilité particulier B2M (Business 2 Manufacturing) qui concerne classiquement les ERP et MES.

La thèse d'Antonio Giovannini [Th2] [Giovannini, 2015] a contribué à la résolution du problème d'interopérabilité entre le service conception d'une entreprise et les clients.

La thèse d'Anderson Szejka [Th3] [Szejka, 2016] s'est intéressé au problème d'interopérabilité lors de la conception du produit (multimétiers).

Enfin ma thèse (Th) [Aubry, 2007] et le master 2 recherche de Sara Himmiche [MR4] se sont intéressés au problème de l'optimisation des systèmes de production en contexte perturbé.

## 2.1 Préambule : Optimisation des systèmes industriels en contexte perturbé

Afin de situer nos travaux de recherche dans un contexte clairement défini, je souhaiterais tout d'abord introduire quelques notations qui seront utiles pour bien comprendre la suite et présenter le processus de résolution dans lequel nous nous sommes volontairement inscrits pour traiter du problème de l'optimisation des systèmes industriels soumis à des perturbations.

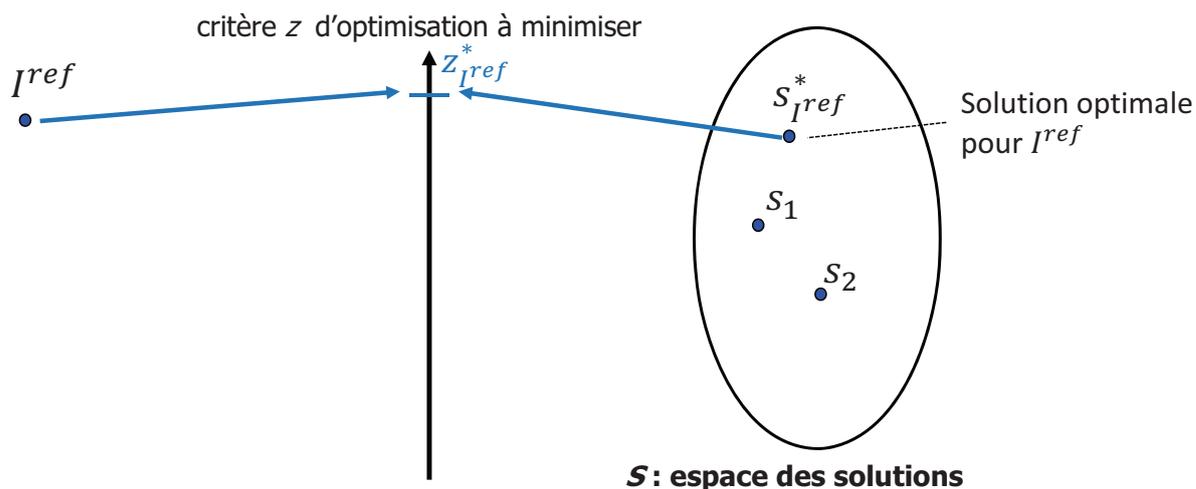


FIGURE 2.2 – Problème d'optimisation déterministe

Les systèmes industriels sont des systèmes complexes multicontraints, dont l'assurance de leur pérennité peut être vue comme un problème d'optimisation (maximiser les bénéfices par exemple).

Classiquement (voir figure 2.2), résoudre un problème d'optimisation consiste à chercher une solution  $s$  parmi un ensemble  $S$  de solutions qui optimise un critère  $z$  (que nous considérerons comme un critère à minimiser lorsque ce n'est pas précisé, sans que cela ne remette en cause la généralité des propos) et qui satisfait diverses contraintes. De plus, l'hypothèse est classiquement faite que les données du problème sont sûres et certaines : il s'agit donc d'un problème d'optimisation déterministe. Ces données d'entrée particulières peuvent être vues comme un scénario prévisionnel  $I^{ref}$  utilisé pour chercher  $s$ . Chercher une solution optimale est souvent un problème difficile.

Une solution optimale au problème déterministe pour le scénario  $I^{ref}$  est notée comme  $s_{I^{ref}}^*$  et sa performance associée selon le critère  $z$  est notée comme  $z_{I^{ref}}^*$ . De manière plus générale, la performance d'une solution  $s$  appliquée à un scénario  $I$ , évaluée selon le critère  $z$  est notée comme  $z(s, I)$ .

L'approche classique pour résoudre un problème déterministe sans perturbation est l'approche prédictive. Dans le meilleur des cas, un algorithme hors-ligne fournit une solution optimale  $s_{I^{ref}}^*$  pour le scénario prévisionnel  $I^{ref}$ , et garantit une performance optimale pour ce scénario seulement, évaluée par  $z_{I^{ref}}^*$ . Si le problème est difficile à résoudre, l'algorithme hors-ligne peut être une heuristique retournant une bonne solution à défaut de l'optimale.

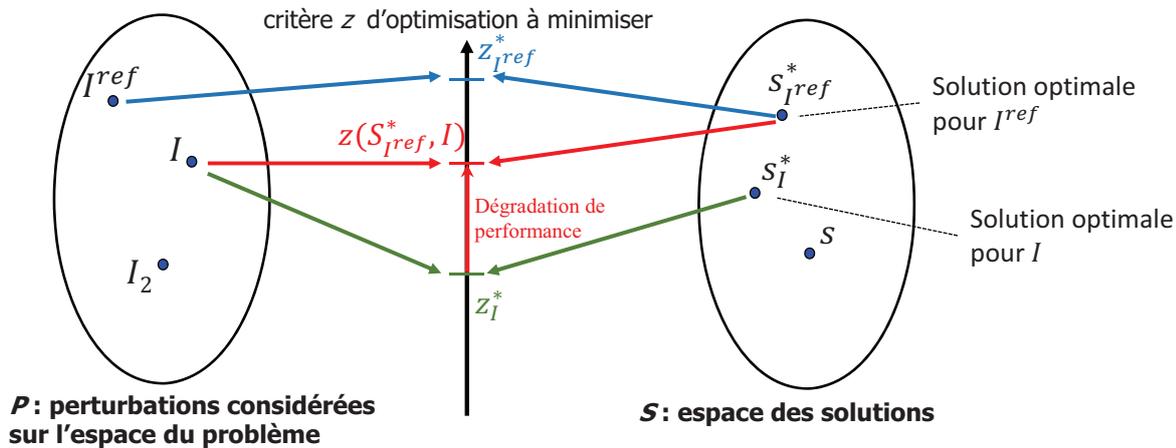


FIGURE 2.3 – Problème d’optimisation soumis à des perturbations

Cependant, en pratique (voir figure 2.3), le système étudié évolue dans un contexte soumis à des perturbations de telle sorte que la solution  $s_{I_{ref}}^*$  est en fait appliquée à un scénario réel  $I$  qui risque fortement d’être différent du scénario prévisionnel  $I_{ref}$ , et  $s_{I_{ref}}^*$  peut éventuellement ne plus être admissible. Dans le cas le plus optimiste (lorsque la solution reste admissible pour  $I$ ), la performance réalisée  $z(S_{I_{ref}}^*, I)$  peut être “très éloignée” de la performance prévisionnelle  $z_{I_{ref}}^*$ , et également “très éloignée” de la valeur optimale pour le scénario  $I$  notée comme  $z_I^*$ . Dans ce cas là, un nouveau calcul en-ligne, et parfois coûteux, est nécessaire et peut retourner une solution de moins bonne qualité que lors de la phase hors-ligne car moins de temps est disponible pour réaliser le calcul.

La prise en compte des perturbations en optimisation n’est pas nouvelle pour les chercheurs. Si nous prenons le cas de la France, le Groupe de recherche en Ordonnancement Théorique et Appliqué (GOTHA)<sup>10</sup> a, dans les années 2000, créé un groupe de recherche autour de la question de l’ordonnancement en contexte incertain qui regroupait des chercheurs de toute la France. Les résultats de ce groupe de recherche ont contribué à la publication d’un ouvrage de référence sur la flexibilité et la robustesse en ordonnancement [Billaut et al., 2010a]. En particulier, cet ouvrage propose un processus complet de résolution d’un problème d’ordonnancement avec perturbations parfaitement généralisable à tout problème d’optimisation soumis à des perturbations. Il est redonné ici avec quelques adaptations et enrichissements :

**Étape 0 :** Définition du problème déterministe. Cette définition comprend en plus des spécifications classiques en optimisation déterministe ( $s, z$ ), la spécification des perturbations et leur modélisation comme un risque à couvrir (l’ensemble  $P$  de la figure 2.3). La notion de qualité d’une solution malgré les perturbations doit être également précisée à cette étape.

**Étape 1 :** Calcul d’une famille de solutions admissibles, par un algorithme proactif en tenant compte des perturbations modélisées à l’étape 0. Au lieu de chercher une solution optimale pour un scénario prévisionnel, une performance globale est recherchée. Cette performance globale peut être une capacité à résister aux perturbations et on parlera alors de solutions robustes, ou bien une capacité à s’adapter aux perturbations et on parlera alors de solutions flexibles.

10. <http://gotha.lcoms.univ-lorraine.fr>

**Étape 2 :** Lors de l'exécution, calcul d'une solution unique, celle qui sera mise en œuvre, issue ou non de l'ensemble calculé à l'étape 1, par un algorithme dynamique.

En pratique, il s'agit de mettre en œuvre tout ou partie de ce processus. On peut également noter que lorsqu'il n'y a pas de perturbation, l'étape 0 et l'étape 1 peuvent être exécutées. L'algorithme appliqué dans l'étape 1 sera alors l'algorithme prédictif et l'ensemble  $P$  se réduira au seul scénario prévisionnel  $I^{ref}$ .

Ce processus bien que très général permet de mettre en évidence les verrous scientifiques suivants :

**Verrou 1** Comment prendre en compte les perturbations ? Comment les modéliser ?

**Verrou 2** Qu'est-ce qu'une solution robuste ?

**Verrou 3** Qu'est-ce qu'une solution flexible ?

**Verrou 4** Face à un problème donné, comment construire une solution robuste ou flexible ? Quel est le bon algorithme proactif ?

**Verrou 5** Comment réagir en ligne face à une perturbation ?

Lorsqu'on s'intéresse au premier verrou, cela implique d'être capable de définir ce qu'est une perturbation (en théorie, toutes les données d'entrée d'un problème peuvent être concernées) et ensuite de proposer un modèle pour appréhender correctement ces perturbations.

Concernant la définition de ce qu'est une perturbation, [Roy, 2010] préfère parler d'*à peu près* et de zones d'ignorance définies de la manière suivante :

- les "à peu près" peuvent se rapporter à la façon de modéliser, au caractère restrictif de certaines hypothèses, au mode d'attribution de valeurs à des données et/ou paramètres,.....
- les « zones d'ignorances » peuvent concerner la complexité de certains phénomènes et celle des systèmes de valeurs mais aussi et surtout le futur : évolutions tendanciennes, aléas, comportements d'autrui,.....

Modéliser ces perturbations pose la question suivante : comment, pour un paramètre d'entrée du problème, passer d'une valeur unique, déterministe et stable à un ensemble de valeurs représentant l'ensemble des perturbations ? Plusieurs propositions ont été faites dans la littérature : les paramètres d'entrée soumis à des perturbations peuvent être modélisés comme des variables aléatoires [Dauzères-Pérès et al., 2010] ou comme des intervalles flous [Dubois et al., 2003], ou enfin comme des ensembles de scénarios (discrets ou continus) [Kouvelis and Yu, 1997].

Les sections suivantes présentent nos principales contributions autour de l'optimisation de systèmes soumis à de la variabilité<sup>11</sup>. Ces contributions peuvent être définies de la manière suivante :

**Contribution 1** Proposition d'un cadre d'étude pour l'optimisation robuste des systèmes industriels soumis à de la variabilité.

**Contribution 2** Application de ce cadre d'étude à des problèmes particuliers d'interopérabilité :

- Interopérabilité des systèmes d'information d'entreprise [Th1]
- Conception et rationalisation de familles de produits dans un contexte de personnalisation de masse [Th2]

**Contribution 3** Extension du cadre d'étude aux modèles stochastiques [MR4].

Aborder les deux problèmes traités dans [Th1] et [Th2] comme des problèmes d'optimisation et d'aide à la décision est suffisamment original pour ce que soit noté.

---

11. Nous verrons dans la section suivante pourquoi et comment je suis passé du concept de "perturbation" à celui de "variabilité"

## 2.2 Proposition d'un cadre d'étude pour l'optimisation robuste des systèmes industriels soumis à de la variabilité

Dans cette section, nous sommes passés du concept de perturbations au concept de variabilité. Ce glissement sémantique a été fait dans un but d'être plus général. En effet, la variabilité (sémantiquement, l'aptitude à varier) lorsqu'elle n'est pas désirée comme dans le cas de données d'entrée d'un problème d'optimisation, peut être considérée comme une perturbation.

L'interopérabilité sémantique est définie comme la capacité à *échanger de l'information spécifique et à opérer à partir de cette information, selon une sémantique commune, dans le but de réaliser une mission spécifiée dans un contexte donné* [Carney et al., 2005]. Un problème d'interopérabilité est donc le fruit d'une variabilité trop importante dans la compréhension et l'usage d'une information échangée entre deux systèmes. Il est donc possible de voir le problème d'interopérabilité comme un problème d'optimisation de systèmes industriels soumis à de la variabilité.

Je ne vois pas de limites à ce que le processus présenté à la section précédente puisse être parfaitement généralisé à la notion de variabilité.

Une définition que je qualifierais de consensuelle pour le concept de robustesse pourrait être celle proposée par [Billaut et al., 2010b] : *Une solution est robuste si sa performance est peu sensible aux incertitudes et aux aléas*. L'inconvénient de cette définition est qu'elle ne spécifie pas ce que veut dire être "peu sensible".

Dans (CN6) [Aubry et al., 2008a], nous nous étions intéressés aux différentes définitions et approches de robustesse existantes dans la littérature afin de dresser les limites et avantages de quelques unes d'entre elles (lorsque la variabilité est modélisée comme un ensemble de scénarios). Suite à ma thèse, et en collaboration avec Mireille Jacomino (Grenoble INP) et André Rossi (Université d'Angers), nous avons proposé une approche générale afin d'étudier un problème d'optimisation sous perturbations lorsque ces perturbations sont modélisées comme un ensemble de scénarios. Cette approche a été présentée dans (C20) [Aubry et al., 2009].

### 2.2.1 Notre proposition

L'approche de robustesse que nous proposons repose sur la définition suivante de robustesse.

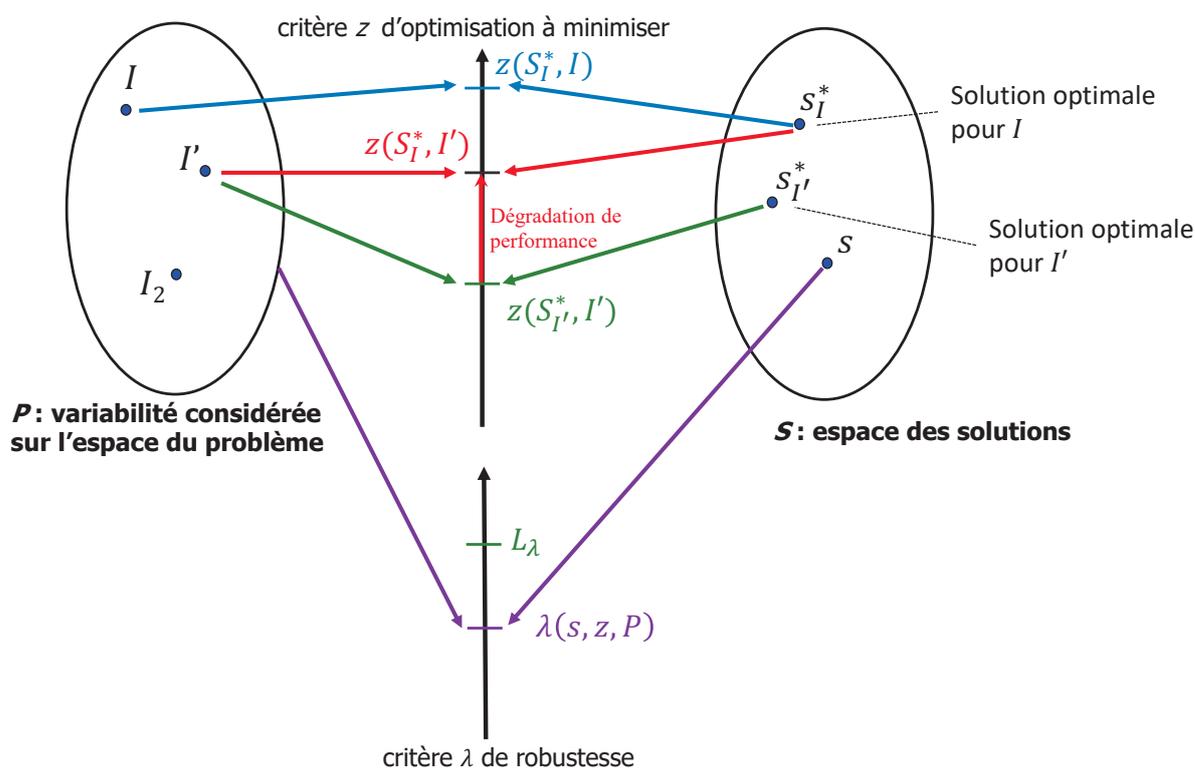
**Définition 2 ( $\mathcal{L}_\lambda$ -robustesse)** *Une solution  $s$  est  $\mathcal{L}_\lambda$ -robuste si elle est capable ne de pas dépasser un niveau de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$ , selon un critère de robustesse  $\lambda$ , pour tout scénario  $I$  d'un risque à couvrir  $P$  (un ensemble de scénarios).  $s$  doit alors satisfaire l'inéquation suivante :*

$$\lambda(s, z, P) \leq \mathcal{L}_\lambda \quad (2.1)$$

La figure 2.4 permet de visualiser ce qu'est une solution  $\mathcal{L}_\lambda$ -robuste. Dans cette définition,  $z$  est le critère d'optimisation pour le problème déterministe.  $z$  mesure en quelque sorte une performance locale sur un seul scénario  $I$  alors que  $\lambda$  mesure une performance globale sur le risque à couvrir  $P$ .

Il n'y a *a priori* pas de restriction sur le critère de robustesse  $\lambda$  pourvu qu'il mesure une performance globale sur  $P$ . Cependant, on peut citer au moins les 3 plus couramment utilisés dans la littérature. Ceux-ci ont été définis dans [Kouvelis and Yu, 1997] de la façon suivante :

- Le critère du *coût maximal* :  $\lambda_1(s, z, P) = \max_{I \in P} (z(s, I))$
- Le critère du *regret maximal* :  $\lambda_2(s, z, P) = \max_{I \in P} (z(s, I) - z_I^*)$
- Le critère du *regret relatif* :  $\lambda_3(s, z, P) = \max_{I \in P} \left( \frac{z(s, I) - z_I^*}{z_I^*} \right)$


 FIGURE 2.4 – Représentation de la  $\mathcal{L}_\lambda$ -robustesse

[Roy, 2002] se posait la question : “Robustesse de quoi et vis-à-vis de quoi mais aussi robuste pourquoi en aide à la décision?”. Je partage parfaitement le point de vue de l’auteur sur l’importance cruciale de cette question. Trop souvent, le terme même de “robuste” est utilisée pour affirmer le caractère robuste d’une solution (au moins cela répond à la question “robustesse de quoi”) sans préciser vis-à-vis de quoi. La définition 2 oblige à fixer cela par le paramètre  $P$  qui fait partie intégrante de la définition et qui spécifie le risque à couvrir (et donc répond à la question vis-à-vis de quoi). La question du pourquoi est abordée par la spécification du niveau de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$ . Cela donne la possibilité au décideur de pouvoir définir ce qu’il attend d’une solution face à de la variabilité à travers la fixation du niveau de sensibilité attendu  $\mathcal{L}_\lambda$ .

Par ailleurs cette définition permet de réaliser l’étape 0 du processus de résolution présenté dans la section précédente. En effet, définir  $s$  et  $z$  permet de spécifier le problème d’optimisation déterministe. La définition de  $P$  permet de définir la variabilité attendue comme un risque à couvrir. Et enfin, la définition de  $\mathcal{L}_\lambda$  permet de spécifier le niveau de qualité attendu par la solution malgré la variabilité.

La définition 2 de la  $\mathcal{L}_\lambda$ -robustesse permet également de mettre en évidence cinq problèmes de robustesse pertinents que nous avons présentés dans (C20) [Aubry et al., 2009]. Ils sont une autre façon de répondre à la question du pourquoi. Nous verrons plus loin que ces cinq problèmes donnent son caractère très général à cette définition. Ils sont définis comme suit.

**Définition 3 (Analyse de stabilité)** *Étant donné une solution  $s$  et un niveau de sensibilité maximum autorisé  $\mathcal{L}_\lambda$  malgré la variabilité, le problème d’analyse de stabilité consiste à répondre à la question “quel est le risque  $P$  qui peut être couvert par  $s$  sans remettre en cause le niveau*

de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$  ?” Autrement dit, connaissant  $s$  et  $\mathcal{L}_\lambda$ , quel est l’ensemble stable de scénarios  $P$  tel que  $\lambda(s, z, P) \leq \mathcal{L}_\lambda$  ?

**Définition 4 (Analyse de sensibilité)** *Étant donné une solution  $s$  et un risque à couvrir  $P$ , le problème d’analyse de sensibilité consiste à répondre à la question suivante “quel est le niveau de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$  maximum atteint par  $s$  sur  $P$  ?” Autrement dit, connaissant  $s$  et  $P$ , quelle est le niveau de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$  telle que  $\lambda(s, z, P) \leq \mathcal{L}_\lambda$  ?*

**Définition 5 (Recherche de solution robuste)** *Étant donné un risque à couvrir  $P$  et un niveau de sensibilité maximum autorisé  $\mathcal{L}_\lambda$ , le problème de recherche de solution robuste consiste à répondre à la question “Quelle est la solution  $s$  qui peut garantir le niveau de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$  sur  $P$  ?” Autrement dit, connaissant  $\mathcal{L}_\lambda$  et  $P$ , quelle est la solution  $s$  telle que  $\lambda(s, z, P) \leq \mathcal{L}_\lambda$  ?*

**Définition 6 (Maximisation de la stabilité)** *Étant donné un niveau de sensibilité maximum autorisé  $\mathcal{L}_\lambda$  malgré la variabilité, le problème de maximisation de la stabilité consiste à répondre à la question “quels sont la solution  $s^*$  et le risque maximal qui peut être couvert  $P_{max}$  associé qui ne remettent pas en cause le niveau de sensibilité  $\mathcal{L}_\lambda$  ?” Autrement dit, connaissant  $\mathcal{L}_\lambda$ , quels sont  $s^*$  et  $P_{max}$  tels que  $\lambda(s^*, z, P_{max}) \leq \mathcal{L}_\lambda$  et  $P_{max} = \max(P)$  ?*

**Définition 7 (Minimisation de la sensibilité)** *Étant donné un risque à couvrir  $P$ , le problème de minimisation de la sensibilité consiste à répondre à la question “Quelles sont la solution  $s^*$  et la sensibilité minimum  $\mathcal{L}_\lambda^{min}$  associée ?” Autrement dit, connaissant  $P$ , quelles sont  $s^*$  et  $\mathcal{L}_\lambda^{min}$  telles que  $\lambda(s^*, z, P) \leq \mathcal{L}_\lambda^{min}$  et  $\mathcal{L}_\lambda^{min} = \min(\mathcal{L}_\lambda)$  ?*

Ces problèmes dépendent en fait des données d’entrée connues ou non et peuvent être résumés dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – 5 problèmes de robustesse

Ce que l’on connaît	Ce que l’on cherche	Type de problème
$s, \mathcal{L}_\lambda$	$P$	Analyse de stabilité
$s, P$	$\mathcal{L}_\lambda$	Analyse de sensibilité
$P, \mathcal{L}_\lambda$	$s$	Recherche de solution robuste
$\mathcal{L}_\lambda$	$s^*, \max_s(P)$	Maximisation de la stabilité
$P$	$s^*, \min_s(\mathcal{L}_\lambda)$	Minimisation de la sensibilité

## 2.2.2 Positionnement de cette approche par rapport aux autres travaux

### 2.2.2.1 Analyses de stabilité et de sensibilité

Les deux premiers problèmes (Analyse de stabilité et analyse de sensibilité) sont souvent regroupés dans la littérature sous le seul terme “analyse post-optimale” (surtout en programmation linéaire) ou même “analyse de sensibilité”. [Mahjoub et al., 2005] proposent la définition suivante d’analyse de sensibilité.

**Définition 8 (Analyse de sensibilité selon [Mahjoub et al., 2005])** *Étant donné un scénario prévisionnel  $I$ , soient  $s^*$  et  $z^*$  une solution optimale pour  $I$  et sa valeur. Une analyse de sensibilité consiste à répondre (en partie au moins) aux questions suivantes :*

- (QAS1) Dans quel voisinage de  $I$ ,  $s^*$  (resp.  $z^*$ ) reste-t-elle optimale ?
- (QAS2) Dans quel voisinage de  $I$ ,  $s^*$  reste-t-elle réalisable avec une performance acceptable ?
- (QAS3) Étant donné  $I'$  voisin de  $I$ ,  $s^*$  reste-t-elle réalisable et, si oui, quelle est sa dégradation de performance ?
- (QAS4) Étant donné  $I'$  voisin de  $I$ , quelle est la nouvelle solution (resp. valeur) optimale ?
- ainsi qu'aux variantes obtenues en remplaçant  $s^*$  par une solution quelconque dans les questions (QAS2) et (QAS3).

Les deux premières questions (QAS1 et QAS2) proposées par cette définition sont plutôt relatives de ce que nous avons appelé le problème d'analyse de stabilité. C'est aussi le point de vue de [Sotskov et al., 1995] qui est une référence dans le domaine. Dans (QAS3) et (QAS4), on cherche bien à évaluer la sensibilité d'une solution (de combien sa valeur varie) lorsque les entrées du problème subissent une déviation.

Pour essayer de résumer mon point de vue :

- l'analyse de stabilité s'intéresse à la mesure des variations autorisées sur les entrées du problème (mesurées par  $P$ ) sans qu'elles n'engendrent de variations trop importantes sur la sortie du problème (contraintes par  $\mathcal{L}_\lambda$ )
- l'analyse de sensibilité s'intéresse à la mesure des variations engendrées sur la sortie du problème (mesurées par  $\mathcal{L}_\lambda$ ) lorsque les entrées du problème varient dans un voisinage défini (par  $P$ ).

On peut d'abord remarquer que l'approche proposée dans ce chapitre inclut les questions (QAS1) à (QAS3).

1. Si nous fixons  $s = s^*$ ,  $\lambda = \lambda_2$  et  $\mathcal{L}_\lambda = 0$  alors résoudre le problème défini par la définition 3 revient à répondre à (QAS1). En effet,  $P$  est le voisinage de  $I$  dans lequel  $\forall I' \in P, z(s^*, I') = z_I^*$  car  $P$  est tel que  $\lambda_2(s, z, P) = \max_{I' \in P} (z(s, I') - z_I^*) \leq 0$ .
2. Si nous fixons  $\lambda = \lambda_1$  et  $\mathcal{L}_\lambda$  comme la performance acceptable désirée alors résoudre le problème défini par la définition 3 revient à répondre à (QAS2). En effet,  $P$  est le voisinage de  $I$  dans lequel  $\forall I' \in P, z(s^*, I') \leq \mathcal{L}_\lambda$  car  $P$  est tel que  $\lambda_1(s, z, P) = \max_{I' \in P} (z(s^*, I')) \leq \mathcal{L}_\lambda$ .
3. Si nous fixons  $s = s^*$ ,  $\lambda = \lambda_3$  et  $P = \{I'\}$ , alors résoudre le problème défini par la définition 4 revient à répondre à (QAS3). En effet  $\mathcal{L}_\lambda$  mesure alors la dégradation de  $s^*$  sur  $I'$  en pourcentage par rapport à la performance optimale  $z_{I'}^*$ .

Ainsi, seule la question (QAS4) ne peut pas être abordée dans notre approche (mais (QAS4) ne serait-elle pas une question liée à la réoptimisation plutôt qu'à la sensibilité?). Pour les autres, on peut voir qu'elles sont des cas particuliers des deux premiers problèmes mis en évidence dans notre approche.

En pratique, une façon de répondre à la question (QAS1) consiste à calculer un rayon de stabilité au sens de [Sotskov et al., 1998].

**Définition 9 (Rayon de stabilité)** . Étant donné un scénario  $I$  et une solution optimale  $s_I^*$  pour  $I$ , le rayon de stabilité  $\rho(s_I^*, I)$  est le rayon maximum d'une boule centrée sur  $I$  à l'intérieur de laquelle  $s_I^*$  reste optimale.

Cette définition est intéressante car elle permet d'ajouter une métrique à l'ensemble  $P$  que nous avons utilisé dans notre approche.

### 2.2.2.2 Minimisation de la sensibilité

Dans la littérature, un ouvrage fondateur en ce qui concerne l'optimisation sous perturbations modélisées comme des scénarios est l'ouvrage de [Kouvelis and Yu, 1997]. Outre la définition des trois critères  $\lambda_1$  à  $\lambda_3$  qui ont été présentés précédemment, les auteurs donnent trois définitions de la robustesse liées à ces critères. L'approche proposée par [Kouvelis and Yu, 1997] peut être définie comme la Min-Max robustesse.

**Définition 10 (Min-Max Robustesse)** *Une solution  $s$  est min-max robuste si elle minimise un critère de robustesse  $\lambda$  sur un risque à couvrir  $P$  pour un critère  $z$  à minimiser.*

- Si  $\lambda = \lambda_1$  on parle de **robustesse absolue**.  $s$  est robuste absolue si elle vérifie :  $\lambda_1(s, z, P) = \min_{s' \in S} \max_{I \in P} (z(s', I))$
- Si  $\lambda = \lambda_2$  on parle de **déviati on robuste**.  $s$  est déviati on robuste si elle vérifie :  $\lambda_2(s, z, P) = \min_{s' \in S} \max_{I \in P} (z(s', I) - z_I^*)$
- Si  $\lambda = \lambda_3$  on parle de **robustesse relative**.  $s$  est robuste relative si elle vérifie :  $\lambda_3(s, z, P) = \min_{s' \in S} \max_{I \in P} \left( \frac{z(s', I) - z_I^*}{z_I^*} \right)$

En fait, résoudre le problème de minimisation de la sensibilité en fixant  $\lambda = \lambda_1$  ou  $\lambda = \lambda_2$  ou  $\lambda = \lambda_3$  revient à chercher une solution min-max. En effet minimiser  $\mathcal{L}_\lambda$  revient bien à chercher  $s$  telle que  $\lambda(s, z, P) = \mathcal{L}_\lambda = \min_{s' \in S} (\lambda(s', z, P))$ .

Donc notre approche inclut la définition de [Kouvelis and Yu, 1997] qui reste une définition très utilisée encore aujourd'hui.

### 2.2.2.3 Maximisation de la stabilité

À ma connaissance, peu de travaux de recherche s'intéresse au problème de maximisation de la stabilité. Une première explication tient peut-être au fait que les chercheurs ont tendance à ne considérer les perturbations que par rapport à leur impact sur  $z$  (et s'intéresse donc plus facilement à la minimisation de cet impact pour des perturbations considérées : le problème de minimisation de la sensibilité). Prendre le problème inverse et chercher la solution qui maximise les perturbations supportables par une solution sans trop dégrader les performances est peut-être une position moins naturelle.

Afin de s'attaquer à ce problème, il est nécessaire d'avoir une métrique permettant de mesurer  $P$  et de le maximiser. Le rayon de stabilité au sens de [Sotskov et al., 1998] (voir définition 9) fait partie des métriques utilisables. Nous l'avons par exemple utilisé dans (R9) [Aubry et al., 2012] et (C25) [Aubry et al., 2006a].

### 2.2.2.4 Un état de l'art sur l'ordonnancement robuste (proactif) de la production

L'ordonnancement est une activité fondamentale intégrante du pilotage. De plus, cette activité peut être vue comme un processus de résolution d'un problème d'optimisation. C'est pourquoi je propose ici de montrer comment l'approche présentée précédemment permet d'intégrer les travaux dans la littérature s'intéressant à l'ordonnancement avec perturbations des problèmes classiques. Les références sélectionnées sont celles dans lesquelles les perturbations sont modélisées comme des scénarios appartenant à un ensemble fini et discret ou un ensemble continu de scénarios défini comme le produit cartésien d'intervalles bornés auxquels appartient chaque paramètre incertain.

Nous utilisons la notation en trois champs  $\alpha|\beta|\gamma$  de Graham [Graham et al., 1979] pour caractériser le problème d'ordonnancement déterministe associé au problème de robustesse étudié. On peut noter que la notation de Graham a été enrichie au fur et à mesure de l'évolution de l'étude des problèmes d'ordonnancement par la communauté (prenant en compte des nouvelles contraintes, définissant des problèmes hybrides). Cette notation reste aujourd'hui très utilisée pour identifier un problème d'ordonnancement.

Le champ  $\alpha$  permet de spécifier la structure du système opérant (1 machine, machines parallèles, atelier de type flowshop . . .). De manière basique, il se décompose en deux sous-champs  $\alpha = \alpha_1\alpha_2$ . La valeur de  $\alpha_1$  définit le type du système opérant et la valeur de  $\alpha_2$  définit le nombre de machines.

Le champ  $\beta$  permet de spécifier les contraintes que doit respecter l'ordonnancement pour être qualifié d'admissible (préemption autorisée, dates d'exigibilité requises. . .).

Le champ  $\gamma$  permet de spécifier le critère d'optimisation considéré (c'est-à-dire  $z$ ).

Chaque référence qui a été identifiée dans la littérature est une combinaison des champs  $\alpha|\beta|\gamma$  présentés et définis dans le tableau 2.2.

TABLE 2.2 – Champs  $\alpha|\beta|\gamma$  étudiés dans la littérature

Champ $\alpha$	Champ $\beta$	champ $\gamma$
1 : machine unique	<i>prec</i> : Contraintes de précédence entre opérations	$C_{\max}$ : durée totale de l'ordonnement
P : atelier de machines parallèles identiques	$ST_{SD}$ : temps de réglage dépendant de la séquence	$\sum C_i$ : moyenne des dates de fin des opérations
Q : atelier de machines parallèles uniformes	$p_i = 1$ : les durées opératoires sont identiques égales à 1	$\sum w_i C_i$ : délai moyen pondéré des opérations
R : atelier de machines parallèles hétérogènes	$r_i = r$ : les dates de lancement sont identiques égales à $r$	$L_{\max}$ : retard maximum
F : atelier de type flowshop	<i>pmtn</i> : la préemption est autorisée	$\sum U_i$ : nombre de jobs en retard
$HF2(1^{(1)}, Pm^{(2)})$ : atelier de type flowshop hybride à deux étages avec machine unique et machines parallèles identiques		$\max w_i L_i$ : retard maximal
G : atelier généralisé		

Je propose ici une synthèse basée sur un ensemble de références qui ont été identifiées. La liste de ces références est présentée dans les tableaux 2.3, 2.4, 2.5 et 2.6 qui présentent respectivement les références relatives au problème d'analyse de stabilité, au problème d'analyse de sensibilité, au problème de maximisation de la stabilité, et enfin au problème de minimisation de la sensibilité.

Les perturbations considérées sont associées au job  $i$  :

- $p_i$  lorsque les durées opératoires sont incertaines
- $w_i$  lorsque les poids associés aux jobs sont incertains
- $d_i$  lorsque les dates d'exigibilité sont incertaines
- $r_i$  lorsque les dates de lancement sont incertaines
- $ST_{ij}$  lorsque les temps de réglage entre opérations sont incertains

Les modèles associés à ces perturbations peuvent être :

- un ensemble discret et fini de scénarios  $P$  : si  $x_i$  est le paramètre incertain alors le vecteur  $X = (x_1, \dots, x_n)$  appartient à cet ensemble discret de scénarios. Ce cas est noté  $P = EDS$  dans les tableaux,
- un ensemble continu de scénarios  $P$  : il est défini comme le produit cartésien des intervalles

$[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ . Chacun de ces intervalles borne les incertitudes sur le paramètre  $x_i$ . Ce cas est noté  $P = ECS$  dans les tableaux.

Les références sont rangées arbitrairement dans l'ordre décroissant de leur année de parution.

**Trois constats peuvent être faits à partir de l'analyse de cet état de l'art :**

- Une très grande majorité de travaux traitent du problème d'ordonnancement sur une machine et par suite une minorité traite des problèmes d'ordonnancement dans des ateliers plus complexes.
- Une très grande majorité de travaux traitent du problème de minimisation de la sensibilité : les autres travaux sont plus marginaux.
- Les incertitudes considérées concernent majoritairement les durées opératoires.

En ce qui concerne le problème de stabilité (analyse et maximisation), afin de montrer que ce problème est pertinent dans le contexte du pilotage de la production, il est intéressant ici de citer des travaux sur un problème connexe à l'ordonnancement à savoir le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage (Simple Assembly Line Balancing Problem) dans lequel des incertitudes sur les durées opératoires existent. Le problème d'analyse de stabilité a été traité de manière intense autour de Yuri Sotskov et Alexandre Dolgui dans [Sotskov et al., 2005, Sotskov et al., 2006, Gurevsky et al., 2012, Gurevsky et al., 2013] où ils s'intéressent à l'évaluation du rayon de stabilité. C'est dans [Rossi et al., 2016] qu'ils s'intéressent à la maximisation de ce rayon de stabilité.

Dans ma thèse, je m'étais également intéressé à la maximisation de la stabilité pour la configuration d'un atelier de machines parallèles partiellement multi-fonction (multipurpose) face à des incertitudes sur la demande. L'enjeu était de trouver la configuration (décision sur les qualifications des machines) qui permet de maximiser l'ensemble des demandes pour lesquelles un ordonnancement admissible garantissant une deadline existe (voir références (R9) [Aubry et al., 2012], (C25) [Aubry et al., 2006a]).

## 2.3 Application du cadre d'étude à deux problèmes particuliers d'interopérabilité autour des informations liées au produit

L'utilisation conjointe du processus de résolution et de l'approche de robustesse définis à la section précédente permet la définition d'un cadre de résolution suffisamment général pour pouvoir mettre en évidence 5 problèmes de robustesse pertinents, là où la plupart des approches proposées dans la littérature n'étudient que le seul problème de la "Minimisation de la sensibilité". Dans ma thèse, j'avais montré comment l'approche présentée ici pouvait être efficacement appliquée à deux systèmes de production particuliers :

- un système de production de biens : atelier de machines parallèles partiellement multi-fonctions soumis à des incertitudes sur la demande de clients (voir références (R9,R14, R16) [Aubry et al., 2012, Rossi et al., 2011, Aubry et al., 2008b] et (C21,C25) [Aubry et al., 2008c, Aubry et al., 2006a] ).
- un système de production de services : réseau de distribution d'électricité soumis à des incertitudes sur la charge des usagers et sur la capacité des sources de production (voir références (R13) [Rossi et al., 2012] et (C22 C24) [Aubry et al., 2007a, Aubry et al., 2006b]).

Cette section a pour objectif de montrer comment le cadre d'étude présenté dans la section précédente a pu être appliqué à deux problèmes particuliers étudiés dans les thèses de Esma

Yahia [Th1] et de Antonio Giovannini [Th2]. Nous verrons également les problèmes particuliers qui ont été résolus afin d'appliquer ce cadre d'étude.

### 2.3.1 Thèse de Esma Yahia (2008-2011) : Contribution à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprises : Application aux systèmes d'information de pilotage de la production [Yahia, 2011]

La thèse d'Esma Yahia a abordé le problème de l'interopérabilité au sein des systèmes d'information d'entreprise (ERP, MES . . .) qui manipulent les informations relatives au produit.

Le contexte de ces travaux concerne la collaboration entre entreprises en réseau. Ce type d'organisation nécessite l'interconnexion et la collaboration d'une multitude de systèmes d'information d'entreprises, hétérogènes que ce soit par les fonctions qu'ils assurent ou par leur conception (modèles, architectures, . . .). Dans ce cadre-là, l'interopérabilité sémantique – vue comme la capacité d'échanger de l'information spécifique et à opérer à partir de cette information, selon une sémantique commune, dans le but de réaliser une mission spécifiée dans un contexte donné [Carney et al., 2005] apparaît comme une performance clé qu'il faut garantir malgré les éventuelles incertitudes sur les informations. Dans ce contexte, la solution  $s$  à trouver est le Système-de-Systèmes d'Information (SdSI) pour lequel Esma Yahia a cherché à évaluer le niveau d'interopérabilité sémantique  $z$  (à maximiser) dans le cas où de l'information doit circuler au sein du SdSI et être utilisée pour réaliser une mission. De plus il convient qu'un niveau d'interopérabilité puisse être garanti malgré une incertitude sur la quantité d'informations présente effectivement dans le Système d'Information émetteur lors d'un échange avec un système d'information récepteur devant comprendre cette information et l'utiliser pour réaliser sa mission.

L'instanciation de la définition 2 à la problématique de la thèse d'Esma Yahia peut être décrite de la façon suivante :

- $s$  : Système-de-Systèmes d'Information
- $z$  : Niveau d'interopérabilité en % (100% = interopérabilité complète)
- $I$  : informations présentes dans les systèmes d'information du SdSI au moment d'un échange
- $P$  : Ensemble des scénarios de quantité d'informations présentes dans les Systèmes d'Information
- $\lambda(s, z, P) = \lambda_1(s, z, P) = \min_{I \in P} (z(s, I))$  : niveau d'interopérabilité dans le pire des cas.
- $\mathcal{L}_\lambda$  : On cherche à maximiser  $\mathcal{L}_\lambda$ . C'est-à-dire qu'on cherche à atteindre le niveau d'interopérabilité maximum malgré les incertitudes sur les quantités d'informations présentes.

Donc le SdSI est qualifié de robuste si il est capable de garantir l'interopérabilité totale malgré les incertitudes sur la quantité d'informations disponibles.

Définir le problème d'interopérabilité sémantique dans les systèmes d'information d'entreprise comme un problème d'optimisation robuste est clairement original. Cela est notamment lié au fait que c'est un problème d'optimisation récent puisqu'il fait suite au déploiement important des systèmes d'information (de type ERP et MES par exemple) au sein des systèmes industriels. De ce fait, le critère  $z$  si il est parfaitement défini reste difficile à mesurer.

En fait, une des premières contributions de la thèse d'Esma Yahia a été de montrer, suite à un état de l'art argumenté, qu'il était nécessaire de définir un critère quantitatif afin d'évaluer l'interopérabilité entre deux systèmes d'information. Ce critère quantitatif est justement le critère  $z$ .

Une deuxième contribution a donc concerné l'évaluation de l'interopérabilité (la définition de  $z$  et de son système de mesure).

Afin d'atteindre cet objectif, il a fallu considérer un premier sous-problème qui concerne l'identification de la structure de l'information des deux systèmes d'information qui doivent échanger.

Pour cela en partant d'un modèle conceptuel contenant toute la sémantique d'un système d'information (sous forme de diagramme de classes UML par exemple), nous avons proposé une approche originale afin de structurer l'information dans ce modèle et identifier ce que nous avons appelé des blocs sémantiques (qui représentent des ensembles d'informations qui se suffisent à elles-mêmes pour être comprises et utilisables). Cette approche basée sur **la théorie des graphes** contient les phases suivantes :

1. Transformation du modèle conceptuel (UML) du système d'information en **graphe orienté** appelé "graphe des dépendances sémantiques".
2. Identification des **composantes fortement connexes** (CFC) dans le graphe des dépendances sémantiques par l'algorithme de Kosaraju-Sharir [Sharir, 1981] et transformation du graphe afin de ne préserver que les sommets qui ne sont pas dans une même CFC. Cela permet non seulement de réduire la taille du graphe mais également de regrouper les informations qui partagent le même socle d'informations pour pouvoir être comprises.
3. Pour chacune des composantes fortement connexes identifiées, rechercher l'ensemble des sommets pour lesquels il existe un chemin depuis la CFC. Cet ensemble de sommets est le bloc sémantique de la composante fortement connexe.

Cette approche a été présentée dans (R12, C17, RN1) [Yahia et al., 2012c, Yahia et al., 2011d, Yahia et al., 2012b] et est schématisée sur la figure 2.5. Sur cette figure, le concept C2 (modélisant en quelque sorte un information) ne peut être instancié que si au moins une instance du concept C5 existe (multiplicité 1..\* du côté de C5 dans l'association *C2C5\_2*) et lui est associée. C5 est donc important pour comprendre la sémantique de C2. Afin de formaliser cela, on met un arc de C2 vers C5 lors de la construction du graphe des dépendances sémantiques. Les composantes fortement connexes regroupent les informations qui partagent le même socle d'informations pour être comprises. Ici SCC2 contient C2 et C5. Enfin, le bloc sémantique de la composante fortement connexe SCC2 est l'ensemble des sommets pour lesquels il existe un chemin depuis SCC2. Donc sur cet exemple le bloc sémantique de SCC2 contient uniquement SCC4. On en déduit le bloc sémantique de C2 comme étant égal à {C2,C5,C8}. Il s'agit de l'ensemble des informations dans le système d'informations qui sont nécessaires à la compréhension de C2.

À partir de ces blocs sémantiques, il devient possible d'identifier l'information que le système d'information récepteur doit recevoir du système d'information transmetteur. Pour un échange d'informations  $I$ , on peut par suite évaluer  $z(s, I)$  comme étant le ratio d'informations disponibles dans le SdSI au moment de l'échange sur l'ensemble des informations nécessaires (défini par le bloc sémantique). Pour l'exemple de la figure 2.5, si un système d'information SI1 doit récupérer l'information C2 d'un système d'information SI2 alors il faudra aussi que C5 et C8 soient présentes.

Les systèmes d'information reposent souvent sur des bases de données dans lesquelles l'information est rentrée dans des champs qui peuvent être obligatoires ou optionnels. Le pire cas correspond donc au scénario où toutes les informations optionnelles dans la base de données, mais nécessaires selon le bloc sémantique identifié, ne sont pas renseignées. Il devient donc possible de calculer  $\lambda(s, z, P) = \min_{I \in P} (z(s, I))$  et ainsi de résoudre le problème d'analyse de sensibilité de SdSI malgré les incertitudes sur les informations. De plus, rendre ces informations optionnelles

obligatoires dans le système d'information émetteur (sans présager du coût de cette solution) permet d'atteindre un niveau d'interopérabilité maximal possible (mais pas forcément égal à 100%) permettant ainsi de construire le SdSI le moins sensible (problème de minimisation de la sensibilité) sans avoir besoin de modifier la structure de la base de données sur lequel le SdSI s'appuie. Les évaluations de  $z(s, I)$  et de  $\lambda(s, z, P)$  ont été présentées dans (R10) [Yahia et al., 2012a].

### 2.3.2 Thèse de Antonio Giovannini (2012-2015) : A knowledge representation framework for the design and the evaluation of product variety [Giovannini, 2015]

Cette thèse a été le fruit d'une collaboration entre l'entreprise Trane et le laboratoire CRAN dans le cadre d'une bourse CIFRE. L'entreprise TRANE fabrique et commercialise des appareils de Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC). Sa production est caractérisée par ce qui peut être qualifiée de personnalisation de masse. Cela signifie qu'elle produit, en petit nombre, des produits très personnalisés pour de très nombreux clients (le gros volume est inhérent au grand nombre de clients). La personnalisation induit donc une source de variabilité. Dans ce contexte, la conception d'une famille de produits est un processus essentiel. La thèse d'Antonio Giovannini pose justement la question de la conception et de la rationalisation des familles de produits dans un contexte de personnalisation de masse.

L'instanciation de la définition 2 à la problématique de la thèse d'Antonio Giovannini peut être décrite de la façon suivante :

- $s$  : famille de produits
- $z$  : coût de la famille de produits
- $I$  : besoins d'un client
- $P$  : Variété de clients
- $\lambda$  : niveau de variété dans la famille de produits.
- $\mathcal{L}_\lambda$  : l'objectif est de minimiser  $\mathcal{L}_\lambda$ . On veut traiter le problème de minimisation de la sensibilité. C'est-à-dire que la variété dans la famille de produits doit être la plus petite possible malgré le grand nombre de variantes dans les besoins clients.

Partant des problèmes industriels autour de la personnalisation de masse à la TRANE, Antonio Giovannini a notamment traité deux questions de recherche :

(RQ1) Comment modéliser la variété afin de supporter le processus de conception d'une famille de produits en prenant en compte la connaissance associée aux profils clients, aux familles de produits et au processus de fabrication ?

(RQ2) Comment réutiliser cette connaissance pour concevoir une famille de produits robuste ?

Antonio Giovannini a d'abord réalisé un état de l'art approfondi afin d'identifier les éventuels manques dans la littérature.

Pour la question (RQ1), il a démontré qu'il manquait une représentation non ambiguë de la connaissance afin de soutenir la conception d'une famille de produits.

Basée sur ce principe, une des premières contributions de la thèse d'Antonio Giovannini est un cadre de modélisation de la connaissance basé sur un modèle conceptuel de type UML (présenté dans l'annexe A). Ce cadre de modélisation a été présenté dans (R5) [Giovannini et al., 2015] et appliqué avec réussite au cas d'étude de la Trane. Ensuite Antonio Giovannini montre comment ce cadre de modélisation permet de garantir l'interopérabilité entre les connaissances côté clients (les profils clients) et les connaissances côté entreprise (les familles de produits).

Une deuxième contribution de la thèse d'Antonio Giovannini, permettant d'aborder la question (RQ2), consiste à **proposer un programme mathématique non linéaire à variables mixtes (PMNLVM)** afin de trouver une famille de produits (la solution  $s$ ) satisfaisant la variabilité des besoins client (l'ensemble  $P$ ) et minimisant le coût de variété de cette famille de produits ( $\mathcal{L}_\lambda$ ), traitant ainsi le problème de minimisation de la sensibilité. Ce modèle a été appliqué efficacement à un cas d'étude de la Trane et présenté dans (R3) [Giovannini et al., 2016]. Cependant l'utilisation d'un PMNLVM reste compliquée dès lors que l'on veut résoudre à l'optimal. Une des perspectives de la thèse d'Antonio était de proposer des heuristiques ou des métaheuristiques afin de construire une solution qui minimise la sensibilité (le coût de la famille de produits malgré la variabilité des besoins client).

## 2.4 Master 2 Recherche de Sara Himmiche : Extension du cadre d'étude aux modèles stochastiques

Le cadre d'étude proposé dans la section 2.2 repose notamment sur la  $\mathcal{L}_\lambda$ -robustesse. Cette définition de la robustesse utilise un modèle de type ensemble de scénarios pour modéliser les perturbations. Cette modélisation est restrictive dans la mesure où elle limite le champ des possibles pour la prise en compte des perturbations. L'idée est donc d'utiliser une modélisation stochastique :  $I$  n'est plus un scénario appartenant à un ensemble  $P$  mais un vecteur aléatoire dont les composantes sont des variables aléatoires. On peut noter que le modèle stochastique contient le modèle basé sur des scénarios (s'il est vu comme un ensemble de vecteurs équiprobables fixant des valeurs aux données d'entrée du problème).

C'est pourquoi Sara Himmiche a proposé d'utiliser la notion de niveau de service définie dans [Dauzères-Pérès et al., 2010]. Cette notion initialement utilisée dans le contexte de l'ordonnancement est définie par [Dauzères-Pérès et al., 2010] comme *la probabilité qu'un critère soit plus petit (ou plus grand) qu'une valeur fixée*. Basée sur ce niveau de service, Sara Himmiche a proposé la définition suivante de la robustesse.

**Définition 11** *Une solution  $s$  est conditionnelle-robuste face à des perturbations modélisées par un vecteur aléatoire  $I$  si sa probabilité de satisfaire une condition de robustesse est plus grande qu'un seuil limite  $P_{lim}$ . La solution  $s$  doit donc satisfaire l'inéquation suivante :*

$$Pr(z(S, I) \leq \mathcal{L}_\lambda) \geq P_{lim} \quad (2.2)$$

Dans cette définition,  $z(S, I) \leq \mathcal{L}_\lambda$  est la condition de robustesse qui doit être satisfaite malgré les perturbations sur  $I$ . On peut noter que cette définition inclut la définition 2. En effet, il suffit de fixer  $P_{lim}$  à 100%, de dire que  $I$  est un vecteur aléatoire qui contient des valeurs aléatoires prises dans un intervalle en suivant une loi uniforme, et de choisir  $\lambda(s, z, P) = \lambda_1(s, z, P) = \max_{I \in P}(z(s, I))$  pour que l'équation  $\lambda(s, z, P) \leq \mathcal{L}_\lambda$  soit équivalente à  $Pr(z(S, I) \leq \mathcal{L}_\lambda) = 100\%$ .

Cette définition a été présentée et appliquée dans (C1, CN1) [Himmiche et al., 2018, Himmiche et al., 2017b].

## 2.5 À propos de la thèse d'Anderson Szejka

Dans ce manuscrit, j'ai pris le parti de présenter le domaine applicatif de l'interopérabilité autour des informations liées au produit ([TH1] et [TH2]) suivant le seul point de vue de l'optimisation et de l'aide à la décision sous perturbations sans aborder le point de vue de la modélisation

de la connaissance et des informations. C'est un choix guidé par le besoin de fluidité du dossier d'une part mais également de cohérence par rapport au projet que je souhaite défendre.

Afin de préserver cette cohérence par rapport aux types de problèmes résolus et aux modèles et outils utilisés, j'ai décidé de ne pas intégrer les travaux d'Anderson Szejka aux contributions présentées ici car cette thèse n'a été abordée que sous le seul point de vue de la modélisation de la connaissance et des informations. Les contributions sont cependant présentées en annexe A afin de faire le bilan complet des contributions scientifiques depuis ma prise de fonction en tant que Maître de Conférences.

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre propose de faire le bilan de mes contributions entre 2007 et 2018 à travers la définition et l'outillage d'un cadre d'étude des problèmes d'optimisation et d'aide à la décision pour les systèmes industriels soumis à de la variabilité.

Ce cadre d'étude est basé notamment sur une approche de robustesse qui :

1. permet de définir 5 problèmes basiques, pertinents et génériques dès lors qu'on s'intéresse à la prise en compte de perturbations en optimisation
2. qui structure la modélisation du problème en obligeant l'utilisateur à définir la robustesse de quoi, vis-à-vis de quoi et pourquoi
3. après avoir été appliquée efficacement sur des cas pratiques classiques de pilotage des systèmes de production (pendant ma thèse), a pu être appliquée à des problèmes moins classiques en optimisation parce que plus récents : des problèmes d'interopérabilité. Ce qui démontre un certain caractère universel.

Nous avons également étendu cette définition de la robustesse afin de pouvoir utiliser des modèles de perturbations de type stochastique.

Ces contributions visent principalement à proposer des solutions pour l'étape 0 et 1 du processus complet de résolution des problèmes d'optimisation et d'aide à la décision sous perturbations. Aucun outil et aucune approche générale n'ont été proposés pour l'étape 2.

L'objectif du prochain chapitre est de présenter mon projet de recherche. Celui-ci vise à proposer des axes de recherche afin d'aller vers une approche intégrée de résolution des problèmes d'optimisation en contexte perturbé en se focalisant sur le pilotage sous perturbations dans le cadre de l'Industrie 4.0. En particulier, je chercherai à définir et mettre en œuvre un système de pilotage hiérarchique/hétéroarchique centralisé/distribué pour les systèmes de production holoniques.

L'intégration visera à proposer des modèles et des approches afin d'outiller le processus de résolution présenté dans ce chapitre.

TABLE 2.3 – État de l'art sur l'ordonnement robuste (Analyse de stabilité)

Référence	Problème d'ordonnement déterministe	Perturbations	Paramètres du problème de robustesse	Résultats
[Chanas and Kasperski, 2005]	$1 precl \max w_i L_i$	$p_i ; d_i ; w_i$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Recherche des intervalles acceptables pour les paramètres incertains
[Hall and Posner, 2004]	$1  \sum U_i$	un seul $p_k$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Calcul de bornes sur la variation possible
[Hall and Posner, 2004]	$1  \sum w_i C_i$	un couple $(p_k, w_k)$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Calcul de la variation possible
[Hall and Posner, 2004]	$1 r_i, pmtn \sum C_i$	un seul $r_k$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Calcul de la variation possible
[Hall and Posner, 2004]	$1 r_i, d_i, p_i = 1 \sum w_i C_i ; P2  C_{\max}$	un seul $w_k$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Calcul de la variation possible
[Hall and Posner, 2004]	$P2  C_{\max}$	un seul $p_k$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = \frac{2}{7}$	Calcul de bornes sur la variation possible
[Hall and Posner, 2004]	$P  \sum w_i C_i$	sous-ensemble de $\{w_i\}$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = \frac{2}{7}$	Calcul sur la variation possible
[Hall and Posner, 2004]	$P pmtn C_{\max}$	un seul $p_k$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0$	résultats généraux sur les variations possibles
[Sotnikov et al., 1998]	$G  C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Algorithme exact pour la recherche du rayon de stabilité
[Bräsel et al., 1996]	$G  \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_3 ; \mathcal{L}_\lambda = 0\%$	Identification de Bornes sur le rayon de stabilité

TABLE 2.4 – État de l'art sur l'ordonnement robuste (Analyse de sensibilité)

Référence	Problème d'ordonnement déterministe	Type de perturbations	Paramètres du problème de robustesse	Résultats
[Mahjoub et al., 2005]	$1 \mid r_i = r \mid \sum U_i$	$r$	$\lambda = \lambda_2 ; P = EDS$ et $P = ECS$	Algorithme exact
[Hall and Posner, 2004]	$P2 \mid \mid C_{\max}$	un seul $p_k$	$\lambda = \lambda_1 ; P = EDS (p'_k = p_k + \Delta)$	Calcul de $\mathcal{L}_\lambda$
[Penz et al., 2001]	$1 \mid \mid \sum C_i$ et $Pm \mid \mid \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_3 ; P = ECS$	bornes sur $\mathcal{L}_\lambda$ pour certains algorithmes de liste

TABLE 2.5 – État de l'art sur l'ordonnement robuste (Maximisation de la stabilité)

Référence	Problème d'ordonnement déterministe	Type de perturbations	Paramètres du problème de robustesse	Résultats
[Sotskov, 2010, Sotskov et al., 2013]	$1 \parallel \sum w_i C_i$	Durées opératoires	$\lambda = \lambda_3$ ; $\mathcal{L}_\lambda = 0\%$	$P$ est mesuré par le volume d'une "stability box"; Algorithme exact

TABLE 2.6 – État de l’art sur l’ordonnement robuste (Minimisation de la sensibilité)

Référence	Problème d’ordonnement déterministe	Type de perturbations	Paramètres du problème de robustesse	Résultats
[Brauner et al., 2016]	$1 \ \text{prec}\  \sum \Phi_{\max}$	Coûts associés aux jobs	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme exact polynomial
[Drwal and Rischke, 2016]	$P \ \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Étude de complexité; calcul du regret maximal
[Feng et al., 2016]	$HF2(1^{(1)}, Pm^{(2)}) \ C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Étude de complexité; Algorithmes exacts et approchés
[Pereira, 2016]	$1 \ \sum w_i C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme exact
[Cwik and Jozefczyk, 2015]	$F \ C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme exact
[Park and Choi, 2015]	$Fm \ C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = EDS$	Algorithme exact
[Tadayon and Smith, 2015]	$1 \ \gamma \text{ avec } \gamma = \sum C_i \text{ ou } \sum w_i C_i \text{ ou } \sum U_i \text{ ou } L_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_1; P = ECS$	Algorithmes exacts
[Lu et al., 2014]	$1 \ \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_1; P = ECS$	Modélisation PLNE; Algorithme approché; Métaheuristique
[Siepak and Jozefczyk, 2014]	$R \ \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme approché
[Xu et al., 2014]	$Q \ \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Modélisation PLNE; Algorithme approché
[Mastroianni et al., 2013]	$1 \ \sum w_i C_i$	$p_i; w_i$	$\lambda = \lambda_1; P = EDS$	Études de complexité; Algorithmes exacts et approchés
[Xu et al., 2013]	$P \ C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithmes exacts et approchés
[Kasperski et al., 2012]	$F^2 \ C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_1 \text{ et } \lambda = \lambda_2; P = EDS$	Études de complexité; Algorithme approché
[Lu et al., 2012]	$1 \ ST_{SD} \ \sum C_i$	$p_i; ST_{ij}$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Étude de complexité; Métaheuristique
[Aissi et al., 2011]	$1 \ \sum U_i; 1 \ p_i = 1 \ \sum U_i$	$d_i$	$\lambda = \lambda_1; P = EDS$	Études de complexité; algorithmes exacts et approchés
[Sotskov et al., 2009]	$1 \ \sum w_i C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme approché
[Aloulou and Della Croce, 2008]	$1 \ \text{prec}\  f_{\max}; 1 \ \sum w_i C_i; 1 \ \sum U_i$	$P_i; r_i; d_i$	$\lambda = \lambda_1; P = EDS$	Études de complexité
[Kasperski and Zielinski, 2008]	$1 \ \text{prec}\  \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme approché
[Lebedev and Averbakh, 2006]	$1 \ \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Étude de complexité; Algorithme exact
[Averbakh, 2006]	$F \ C_{\max}; 2 \text{ jobs}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Étude de complexité; Algorithme exact polynomial
[Kasperski, 2005]	$1 \ \text{prec}\  L_{\max}$	$p_i; d_i$	$\lambda = \lambda_2; P = ECS$	Algorithme optimal polynomial
[Kuo and Lin, 2002]	$1 \ \sum C_i$	$p_i$	$\lambda = \lambda_3; P = ECS$	Études de complexité
[Kouvelis et al., 2000]	$F^2 \ C_{\max}$	$p_i$	$\lambda = \lambda_2; P = PDS \text{ et } P = PCS$	Étude de complexité; Algorithmes exacts et approchés

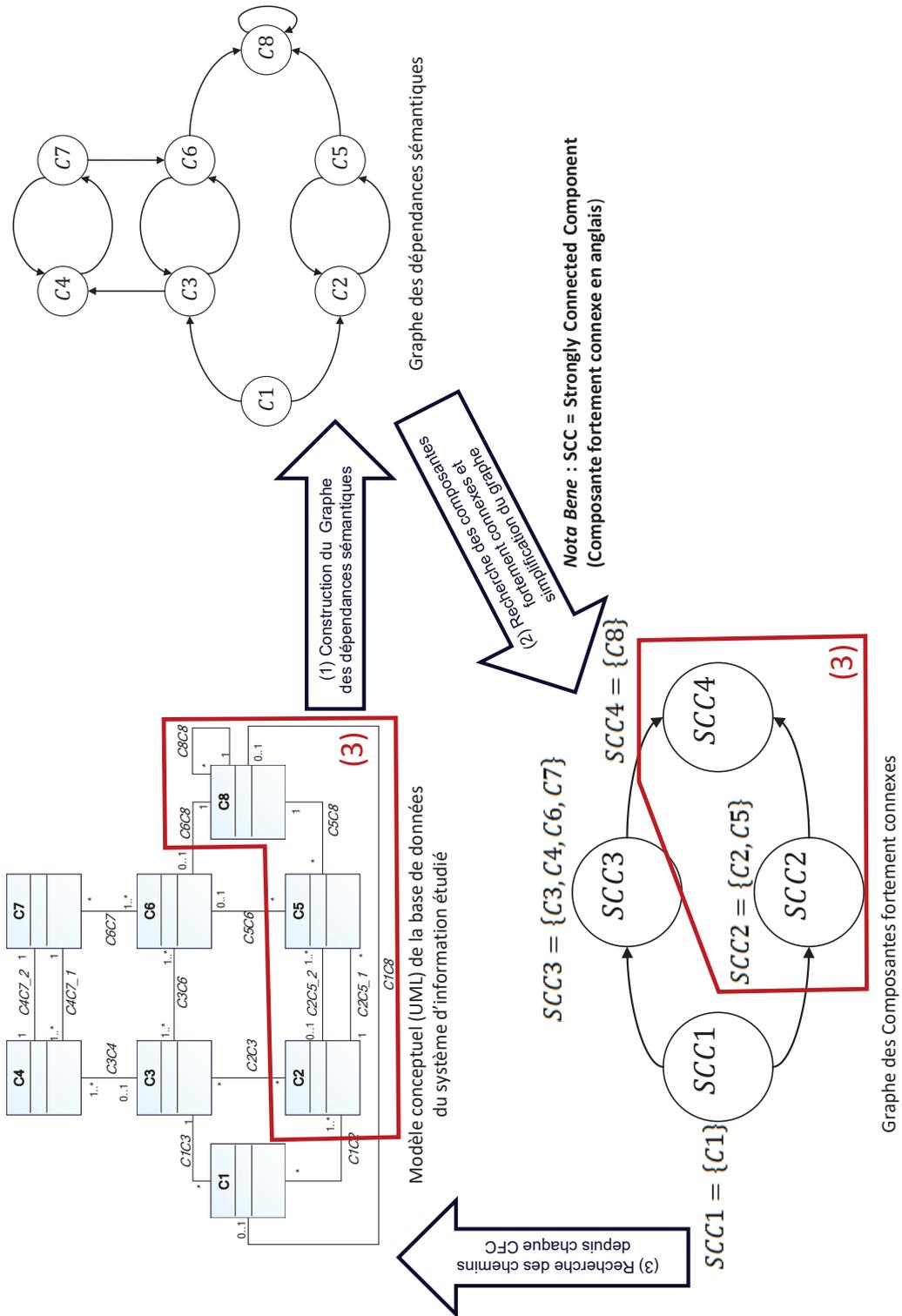


FIGURE 2.5 – Approche d’obtention des blocs sémantiques d’un systèmes d’information

## Chapitre 3

# Projet de recherche et d'enseignement

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Projet de recherche : Vers un pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques . . . . .</b>	<b>56</b>
3.1.1	Pilotage des systèmes de production dans l'industrie 4.0 . . . . .	56
3.1.2	Pilotage hiérarchique/hétéroarchique des Systèmes de production holoniques . . . . .	58
3.1.3	Description du projet de recherche . . . . .	65
3.1.4	Justification du projet . . . . .	72
<b>3.2</b>	<b>Projet d'enseignement : formation des étudiants au Pilotage pour l'Industrie 4.0 . . . . .</b>	<b>74</b>
3.2.1	Objectifs du parcours INPLIC . . . . .	74
3.2.2	Maquette du parcours INPLIC . . . . .	75
3.2.3	Une plateforme pour l'enseignement mais aussi la recherche . . . . .	75

---

Le chapitre introductif de ce document a permis de démontrer qu'un système de pilotage hiérarchique centralisé ne peut pas être pleinement performant dans le contexte des systèmes de production d'aujourd'hui. Afin de rendre ces systèmes plus réactifs, il est nécessaire de distribuer des capacités de décision dans des entités autonomes capables de coopérer afin d'absorber des perturbations. Cela implique de mettre en œuvre un système de pilotage hybride hiérarchique/hétéroarchique.

Par ailleurs, une démarche générique afin de construire des solutions de pilotage robustes avant exécution a été proposée dans le chapitre précédent. Cependant, cette approche doit être étendue afin d'intégrer une étape en ligne capable de réagir à des perturbations non prévues afin d'aboutir à une approche proactive-réactive complète pour la prise en compte des perturbations.

De plus, nous avons pu voir dans le chapitre 2 que la prise en compte des perturbations afin de développer des solutions robustes pour des systèmes de production complexes (non-réduits à une seule machine) avait peu été traitée dans la littérature.

### **3.1 Projet de recherche : Vers un pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques**

Depuis 2017, j'ai décidé de faire évoluer mes activités de recherche afin d'étudier le problème de pilotage des systèmes de production toujours en prenant en compte les perturbations. Mon projet de recherche s'appuie fortement sur les résultats décrits dans le chapitre 2 de ce document. La section 3.1.1 présente le contexte de mon projet de recherche : les systèmes de production dans l'Industrie 4.0. Elle présente les enjeux du pilotage dans ce contexte. La section 3.1.2 affine le contexte aux systèmes de pilotage hiérarchique/hétéroarchique pour les systèmes de production holoniques. Elle revient sur les constats qui avaient pu être déjà faits dans le chapitre introductif de ce document et propose un état de l'art sur le pilotage pour les Systèmes de Production holoniques. Cette section permet de dégager des enjeux qui seront utilisés pour définir le projet de recherche que je souhaite défendre et qui est détaillé dans la section 3.1.3.

#### **3.1.1 Pilotage des systèmes de production dans l'industrie 4.0**

Après la mécanisation initiée au milieu du 18<sup>ème</sup> siècle, la production de masse et l'électrification à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, et enfin l'utilisation massive des ordinateurs et de l'automatisation au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, le concept d'industrie 4.0 présuppose la digitalisation massive et la généralisation de l'usage des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) au sein des industries [Lu, 2017]. Ces entreprises deviennent ainsi des systèmes cyberphysiques et cela facilite l'émergence de l'"Usine Intelligente" [Monostori et al., 2016]. [Lu, 2017] propose un état de l'art sur l'industrie 4.0 à travers les technologies, les applications et les problématiques de recherche scientifique concernées par le concept d'Industrie 4.0. On pourra noter que c'est l'Allemagne qui a initié l'émergence de ce concept. La commission européenne préfère parler d'Usine du Futur (Factory of the Future) [IEC, 2015]. [Liao et al., 2017] proposent une revue de la littérature sur l'industrie 4.0 et montrent notamment comment de nombreux États se sont emparés de cette question : Les États Unis d'Amérique, l'Allemagne, la France, le Royaume Uni, le Japon, la Chine, Singapour, la Corée du Sud.

L'application du concept de systèmes cyberphysiques aux systèmes de production a permis l'émergence de la notion de Systèmes de Production cyberphysiques. [Monostori, 2014] propose une définition synthétique des systèmes de production cyberphysiques que l'on peut traduire de la façon suivante : *Un Système de Production Cyberphysique se compose d'éléments et de sous-*

*systèmes autonomes et coopératifs qui s'interconnectent en fonction du contexte, au sein et au travers de tous les niveaux de production, de la machine jusqu'aux réseaux logistiques.*<sup>12</sup>.

Du point de vue de la production et de son pilotage, la 4ème révolution industrielle doit conduire à la généralisation de la personnalisation de masse des produits, et permettre la flexibilité et l'agilité des ressources de production [Kagermann et al., 2013].

Cependant, la mise en œuvre de cette révolution met en évidence de nouveaux défis liés notamment au pilotage des systèmes de production. En effet les stratégies de pilotage mises en œuvre dans l'industrie proposent encore souvent des solutions (planning, ordonnancements, ...) centralisées en supposant un environnement stable et certain (demande parfaitement connue et stable, gammes de fabrication pré-définies, ressources de fabrication toujours disponibles avec le même niveau de performance, ...). Par exemple, un ordonnancement optimal, calculé selon ces hypothèses très optimistes, a de grandes chances de voir ses performances détériorées lors de son exécution étant données les déviations inévitables dans l'état de l'environnement : incertitudes et variabilités sur les produits (volume et mix, personnalisation de masse, production de petites séries, ...), perturbations sur les ressources de production (temps opératoires, pannes machines, incertitudes sur la fabrication, ...). Cela oblige de multiples aménagements au sein de l'atelier (par un humain souvent) conduisant inmanquablement à une dégradation des performances. Ces perturbations et le besoin de les prendre en compte dans le pilotage de la production sont encore accentués par la mise en œuvre de l'industrie 4.0. [Monostori et al., 2016] voient même l'ordonnancement robuste comme l'un des six enjeux en Recherche et Développement pour les systèmes de production cyberphysiques. D'autres comme [Zhong et al., 2017] préfèrent parler d'un besoin d'ordonnancement intelligent qui – à partir des données capturées par les capteurs – est capable de générer un ordonnancement fiable en temps réel. D'une manière plus générale la mise en œuvre de l'industrie 4.0 nécessite de décentraliser en partie au moins les décisions dans la structure de production afin de pouvoir être réactif [Meissner et al., 2017].

Avant même l'avènement de ce concept d'Industrie 4.0 (comme montré dans le chapitre introductif de ce document), de nombreux chercheurs avaient montré que les systèmes de pilotage centralisés et hiérarchisés, sont particulièrement efficaces lorsque la production de masse, pour satisfaire une consommation de masse, est la règle. Cependant ces performances sont réduites dès lors que ce régime établi n'est plus atteignable. C'est notamment pour pallier à cette limite que des premières approches de décentralisation de la décision pour le niveau très court terme ont vu le jour avec, par exemple, la mise en place de certains outils du Juste-à-temps comme le kanban et la responsabilisation des opérateurs [Thomas et al., 2012]. Comme nous l'avons vu dans l'introduction de ce document, les systèmes de pilotage centralisés et hiérarchiques sont en effet particulièrement rigides là où il faut pouvoir piloter de manière agile la production face à des perturbations. Ceci est particulièrement vrai dans les grandes entreprises où les niveaux multiples ne facilitent pas la réaction en temps réel face à une perturbation si celle-ci doit d'abord remonter avant d'être traitée. Pour pallier à cette rigidité, des premiers travaux avaient proposé de distribuer la décision dans des systèmes hétérarchiques avec souvent des mises en œuvre à base de Systèmes multi-agents [Hatvany, 1985, Duffie et al., 1988]. [Trentesaux, 2009] avait fait un premier bilan de ces travaux. La limite principale de ces solutions réside dans leur myopie (c'est à dire que chaque décision prise localement ne permet pas de garantir l'optimum global). C'est pourquoi des approches hybrides sont nécessaires et ont notamment permis de gérer cette myopie [Zambrano Rey et al., 2013, Zambrano Rey et al., 2014]. Une façon de mettre en œuvre ce

12. *Cyber-Physical Production Systems consist of autonomous and cooperative elements and sub-systems that are getting into connection with each other in situation dependent ways, on and across all levels of production, from processes through machines up to production and logistics networks.* [Monostori, 2014]

pilotage hybride des systèmes de production repose sur le paradigme de Systèmes de production holoniques (Holonc Manufacturing Systems) [Valckenaers et al., 1997] défendu par le CRAN sous le nom de "Systèmes Contrôlés par le Produit".

### 3.1.2 Pilotage hiérarchique/hétéarchique des Systèmes de production holoniques

Dès 1985, [Hatvany, 1985] proposait un modèle strictement hétéarchique où des entités autonomes coopèrent selon des règles prédéfinies. L'Université du Wisconsin à travers ses travaux de recherche a proposé une mise en œuvre de cette approche [Duffie and Piper, 1986, Duffie et al., 1988, Duffie and Prabhu, 1994, Duffie, 1996, Duffie et al., 2002] faisant de cette université la principale ambassadrice de cette approche. On peut citer d'autres travaux ayant implanté ce type d'approches [Silva and Ramos, 1999, Trentesaux et al., 2000, Chirn and McFarlane, 2000, Demongodin and Hennet, 2008, Pannequin, 2007, Pujo et al., 2009, Aissani et al., 2009].

En 1991, [Dilts et al., 1991] sont les premiers à analyser l'évolution des architectures de pilotage en notant la montée en puissance des structures hétéarchiques. Ils identifient quatre formes d'architecture :

- Forme centralisée : une seule entité prend toutes les décisions de pilotage,
- Forme hiérarchique pure : Le pilotage est décomposé en niveaux de décision avec chacun leur propre but. Chaque entité de niveau N est autonome vis à vis des entités du même niveau. Par contre, une entité de niveau N est subordonnée aux entités de niveau N+1 et ses décisions doivent servir les objectifs du niveau N+1.
- Forme hiérarchique modifiée : les entités d'un même niveau hiérarchique peuvent coopérer. La relation maître-esclave devient une relation directeur-assistant.
- Forme hétéarchique : la décision est distribuée sur un ensemble d'entités sans lien de hiérarchie. Chaque entité est autonome et négocie avec les autres entités pour atteindre son but.

[Trentesaux, 2002, Trentesaux, 2007, Trentesaux, 2009] a beaucoup œuvré pour la définition des concepts de distribution de la décision. Il distingue par exemple les notions de décentralisation et de distribution pour les processus de décision [Trentesaux, 2007]. Il propose également une formalisation des structures de pilotage par des graphes dont les types sont répartis en 4 classes qui sont proches de celles proposées par [Dilts et al., 1991]. Cette décomposition est représentée sur la figure 3.1 déjà présentée dans l'introduction générale de ce document.

Il est possible d'identifier les avantages et les inconvénients des deux structures extrêmes de pilotage (purement hiérarchique et purement hétéarchique) comme dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Avantages et inconvénients des différentes structures de pilotage

Classe	avantages	inconvénients
I	Optimisation globale Temps de réponse faibles Déterministe et stable	Peu réactive face aux aléas Peu évolutive Complexité de mise en œuvre pour les grands systèmes
III	Réactivité aux aléas Agilité	Performances globales non garanties Risque de blocage Imprévisibilité globale

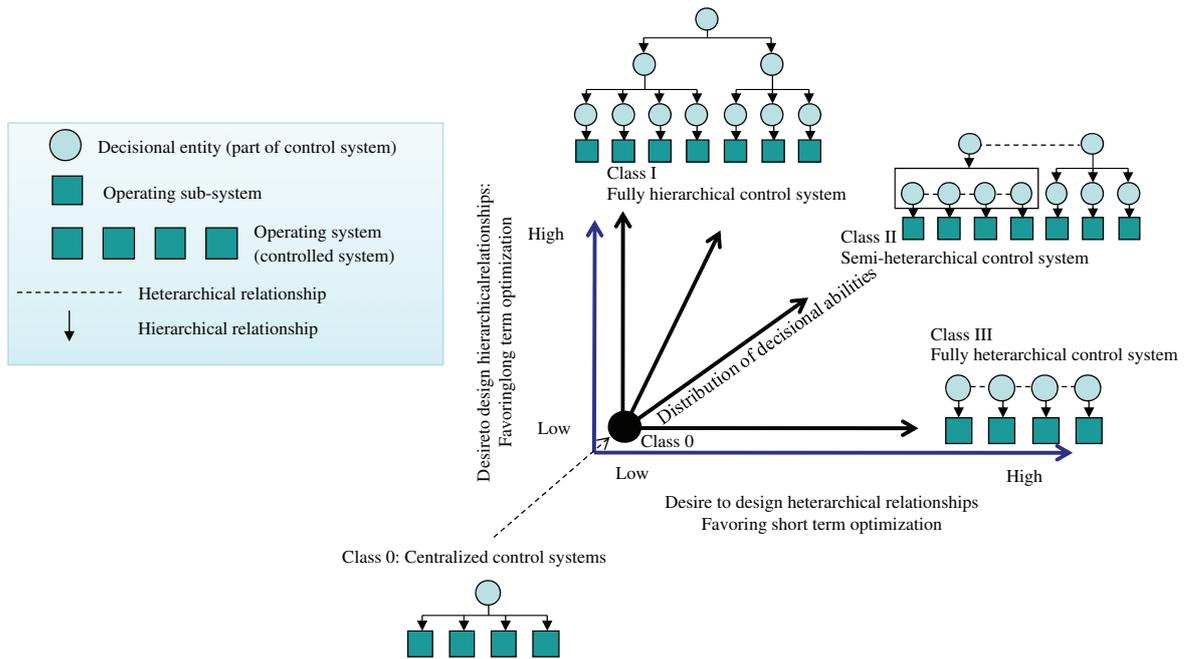


FIGURE 3.1 – Distribution des capacités de décision : des systèmes de pilotage centralisés aux systèmes de pilotage purement hétéarchiques [Trentesaux, 2009]

Le tableau 3.1 justifie le besoin de systèmes de pilotage combinant la prévisibilité des systèmes de pilotage hiérarchiques avec l'agilité des systèmes de pilotage purement hétéarchiques : systèmes de pilotage de classe II que je préfère appeler *hybrides hiérarchique/hétéarchique*.

C'est pour répondre à ce besoin que le paradigme des "systèmes de production holoniques" a été défini.

L'ensemble de définitions 1 qui avait été donné dans le chapitre introductif permet de mettre en évidence que les systèmes de production cyberphysiques sont des systèmes de production holoniques. Pour s'en convaincre, rappelons la définition donnée par [Monostori, 2014] (qui est communément admise et très utilisée) : un Système de Production Cyberphysique se compose d'éléments et de sous-systèmes autonomes et coopératifs qui s'interconnectent en fonction du contexte, au sein et au travers de tous les niveaux de production, de la machine jusqu'aux réseaux logistiques. De plus la définition de [Monostori, 2014] est incomplète car elle ne dit pas que dans les Systèmes Cyberphysiques, les éléments et sous-systèmes dont il est question ici sont en fait *des entités informatiques (cyber) en connexion forte avec des entités physiques*. Ainsi dans la définition ci-dessus, *les éléments et les sous-systèmes autonomes et coopératifs* peuvent donc être vus comme des holons (partie physique fortement connectée à une partie informatique). Un système de production cyberphysique est donc une holarchie et puisqu'elle s'intéresse à tous les niveaux de production, il s'agit d'un système de production holonique.

Cette remarque n'a pas pour unique but de "remettre les choses à leur juste place", elle permet surtout de montrer que les systèmes de production holoniques sont plus que jamais d'actualité quand on connaît l'importance qu'ont pris les systèmes cyberphysiques dans les appels à projet et les travaux de recherche. Cela montre aussi que l'hypothèse qui avait été faite à l'époque par les précurseurs des systèmes de production holoniques [Valckenaers et al., 1994, Van Brussel

et al., 1998] que les ressources et les produits deviennent intelligents et participent à la décision est aujourd'hui une hypothèse admise.

Les premiers travaux autour des Systèmes de Production Holoniques (SPH) [Valckenaers et al., 1994, Valckenaers et al., 1995, Van Brussel et al., 1998] avaient pour objectif principal de définir les concepts et montrer leur pertinence. Le premier article fondateur qui fait toujours référence aujourd'hui est celui de [Van Brussel et al., 1998]. Il rappelle la genèse du paradigme et propose une première architecture de référence pour les SPH : PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture). Cette architecture met en évidence 3 holons de base (Product, Resource et Order) accompagnés d'un holon Staff. Les auteurs démontrent que les 3 holons de bases forment un ensemble nécessaire et suffisant pour modéliser tout système de production. De plus le holon staff permet d'intégrer des fonctions centralisées (ordonnancement global prédictif par exemple). Cette architecture permet donc de mettre en œuvre les 3 classes de systèmes de pilotage. Cette architecture de référence est encore beaucoup utilisée aujourd'hui même si d'autres architectures ont été proposées (voir [Babiceanu and Chen, 2006] et [Leitão et al., 2009] pour deux états de l'art détaillés sur les SPH). [Leitão et al., 2009] s'intéressent plus particulièrement aux aspects pilotage des SPH.

Les SPH font l'hypothèse que les ressources et les produits sont intelligents. [McFarlane et al., 2002] a été un des premiers à réfléchir à la place du produit intelligent dans le pilotage des systèmes de production introduisant sans le nommer le paradigme de "systèmes contrôlés par le produit" pour lequel le CRAN a beaucoup contribué. Les propriétés d'un tel produit intelligent ont été traitées abondamment dans la littérature (voir [Meyer et al., 2009]). Les systèmes contrôlés par le produit doivent être vus comme des systèmes de production holoniques où le produit tient une place particulière.

[Babiceanu and Chen, 2006] avait proposé un premier état de l'art sur l'application des systèmes de production holoniques dans l'industrie des années 2000. Il avait relevé peu d'applications concrètes. Un des freins évoqués à l'époque était la difficulté de mettre en œuvre de tels systèmes dans les systèmes informatiques en place et le manque de standardisation. [Trentesaux, 2009, Leitão et al., 2009] faisaient le même constat, à savoir que les travaux de recherche dans ce domaine s'arrêtaient souvent à l'étape du prototypage. Une des raisons était le manque de maturité au sein des industries quant aux technologies à mettre en œuvre. Il apparaît plus raisonnable aujourd'hui de penser que les technologies arrivent à maturité.

La mise en œuvre du pilotage pour les SPH s'est principalement faite par des Systèmes Multi-Agent, de telle sorte que la frontière entre le pilotage basé sur des systèmes multi-agents (SMA) et le pilotage pour les SPH n'est pas toujours évidente (comme l'atteste l'état de l'art proposé par [Leitão et al., 2009]). Les deux différences principales sont :

- le caractère récursif des systèmes holoniques n'existe pas primitivement dans les systèmes multi-agents : un agent ne peut pas être composé d'autres agents
- l'agent est une entité purement informatique alors que le holon contient les deux parties (physique et informatique)

Pour simplifier je dirais que les SMA sont un moyen de mettre en œuvre les SPH mais pas le seul.

Dans la suite, je me focaliserai uniquement sur les aspects d'ordonnancement sous perturbations des SPH. La plupart des propositions dans ce domaine ont consisté à montrer comment les systèmes holoniques permettaient de réagir à des perturbations afin de proposer un ordonnancement purement dynamique (hétérarchie pure) ou afin de modifier un ordonnancement existant (provenant d'un pilotage centralisé).

Afin de positionner les travaux de recherche sur l'ordonnancement des SPH en contexte per-

turbé, je souhaiterais tout d’abord revenir sur des notions fondamentales dès lors qu’on s’intéresse à l’ordonnancement en contexte perturbé.

### 3.1.2.1 Ordonnancement en contexte perturbé

Cela a déjà été évoqué dans le chapitre 2 mais la prise en compte des perturbations dans le pilotage des systèmes de production et plus particulièrement en ordonnancement n’est pas nouvelle pour les chercheurs. Le GOTHa avait notamment proposé un processus de résolution dans [Billaut et al., 2010a] dans lequel je continuerai de m’inscrire mais qui devra être enrichi par rapport au contexte spécifique des systèmes de production holoniques que je souhaite traiter. Ce processus est rappelé ici afin de faciliter la lecture :

**Étape 0** : Définition du problème déterministe. Cette définition comprend en plus des spécifications classiques en optimisation déterministe  $(s, z)$ , la spécification des perturbations et leur modélisation comme un risque à couvrir (l’ensemble  $P$  de la figure 2.3). La notion de qualité d’une solution malgré les perturbations doit être également précisée à cette étape.

**Étape 1** : Calcul d’une famille de solutions admissibles, par un algorithme proactif en tenant compte des perturbations modélisées à l’étape 0. Au lieu de chercher une solution optimale pour un scénario prévisionnel, une performance globale est recherchée. Cette performance globale peut être une capacité à résister aux perturbations et on parlera alors de solutions robustes, ou bien une capacité à s’adapter aux perturbations et on parlera alors de solutions flexibles.

**Étape 2** : Lors de l’exécution, calcul d’une solution unique, celle qui sera mise en œuvre, issue ou non de l’ensemble calculé à l’étape 1, par un algorithme dynamique.

Associé à ce processus, il est possible d’identifier des approches de résolution qui se différencient notamment par l’étape à laquelle elles se proposent d’apporter une solution. [Billaut et al., 2010a] proposent également de définir ces approches. Elles sont détaillées ici.

**Approche proactive** : dans cette approche, l’étape 1 est privilégiée. La connaissance des perturbations est utilisée par un algorithme statique pour construire un ensemble de solutions dont les performances en terme de robustesse ou de flexibilité correspondent à celles désirées malgré les perturbations.

**Approche réactive** : dans cette approche, l’étape 2 est privilégiée. Il s’agit d’une approche strictement en ligne<sup>13</sup> qui consiste à construire la solution au fur et à mesure de la connaissance progressive des grandeurs du problème et faire évoluer cette solution au fur et à mesure des informations disponibles. Comme évoqué dans ma thèse (Th) [Aubry, 2007], cette approche implique deux contraintes fortes :

- temps réel : il est nécessaire que la construction de la solution se fasse en temps réel pour qu’elle soit en adéquation avec la réalité. Évidemment, cette notion est dépendante de l’application.
- stabilité : il est nécessaire que les décisions sur la solution garantissent une stabilité dans le temps en terme de performance. Autrement dit une décision prise à l’instant  $t$ , qui assure une certaine performance, ne doit pas impliquer de divergence en terme de performance à l’instant  $t + 1$  et aux instants suivants. Cet aspect de stabilité Vs nervosité est particulièrement important dans le contexte des systèmes de production holoniques compte tenu du caractère “distribué” et local du système de contrôle qui peut donc être partiellement myope (une bonne décision localement peut être très mauvaise globalement).

---

13. du point de vue de la prise en compte des perturbations

**Approche Proactive/Réactive :** cette approche intègre tout le processus de résolution et combine les deux approches présentées précédemment. À partir de la famille d'ordonnements calculée lors de la phase proactive, la connaissance progressive des grandeurs du problème est utilisée lors de la phase réactive pour choisir la meilleure solution. Si des perturbations surviennent qui n'ont pas été prises en compte lors de la phase proactive, la phase réactive peut :

- “réparer” la solution courante de façon à construire une nouvelle solution
- calculer une nouvelle solution en utilisant ou non les solutions de départ
- retourner à la phase proactive lorsque les performances sont trop dégradées. Cela pose également la question du problème de commutation de la prise de décision entre le centralisé et le distribué.

Si le processus présenté ci-dessus se veut consensuel, il ne dit pas comment implémenter les étapes. De la même façon, les approches de résolution associées permettent de fixer la philosophie de résolution mais sans poser d'algorithme miracle qui fonctionnerait pour tous les problèmes. Le chapitre précédent montre comment nous avons proposé une approche générale afin d'outiller les étapes 0 et 1 du processus et de définir le problème sous incertitudes de manière pertinente. Nous avons aussi conclu qu'il fallait enrichir cette approche pour pouvoir traiter également l'étape 2.

La littérature en Recherche Opérationnelle est riche de méthodes appliquées à des problèmes particuliers afin de mettre en œuvre des approches proactives ou réactives. Par contre, on trouve peu de travaux proposant des approches intégrées proactive-réactives. À titre d'exemple, il est possible de citer [Aloulou and Portmann, 2005] qui s'intéresse à un problème d'ordonnement sur une machine soumise à des pannes ou à un retard d'approvisionnement en matières premières. Ils proposent une approche proactive-réactive qui propose tout d'abord un ensemble de solutions flexibles hors-ligne qui sont ensuite utilisées en lignes afin de pallier aux perturbations.

Le constat qui peut être fait sur les approches proposées en Recherche Opérationnelle est que celles-ci sont souvent dédiées à un problème spécifique.

Pour faire référence aux structures de pilotage qui ont été évoquées plus tôt, les approches proposées en Recherche Opérationnelle s'inscrivent plutôt dans une structure de classe I (hiérarchique).

### 3.1.2.2 Pilotage en contexte perturbé pour les SPH

Le tableau 3.2 propose une vision des références traitant du pilotage à plus ou moins haut niveau (de la planification jusqu'à l'ordonnement de bas niveau sur les machines) dans les SPH. Ces références incluent également des travaux sur du pilotage basé sur les systèmes multi-agents dont les auteurs sont proches de la communauté qui travaille sur les SPH. Ce tableau doit beaucoup aux états de l'art existants [Babiceanu and Chen, 2006, Leitão et al., 2009, Cardin et al., 2017].

Le constat évident qui peut être fait grâce à ce tableau est qu'il n'y a pas d'approche de type proactive-réactive. On peut expliquer cela par le fait que les travaux sur le pilotage des SPH se concentrent principalement sur la capacité des SPH à réagir à des perturbations en ligne de type aléas (panne, commande urgente). C'est pourquoi les publications de ce tableau se concentrent principalement sur la conception des entités, des mécanismes de communication et de décision afin de proposer un nouvel ordonnancement en ligne avec des capacités de décision distribuées sur les entités.

TABLE 3.2 – Pilotage pour les Systèmes de production holoniques

Structure de pilotage	Approche utilisée	Références
III	Réactive	[Duffie and Prabhu, 1994, Duffie, 1996, Silva and Ramos, 1999, Trentesaux et al., 2000, Chirn and McFarlane, 2000, Duffie et al., 2002, Demongodin and Hennet, 2008, Pujó et al., 2009]
III	Prédictive-Réactive	[Aissani et al., 2009, Pannequin, 2007]
II	Réactive	[Gou et al., 1994, Gou et al., 1998, Sugimura et al., 1998, Zhang and Norrie, 1999, Sousa and Ramos, 1999, Cheung et al., 2000, Sallez et al., 2009, Zambrano Rey et al., 2013]
II	Prédictive-Réactive	[Valckenaers et al., 1994, Valckenaers et al., 1995, Van Brussel et al., 1998, Bongaerts et al., 2000, Heragu et al., 2002, Babiceanu et al., 2004, Shen et al., 2005, Babiceanu et al., 2005, Valckenaers et al., 2007, Leitão and Restivo, 2008, Borangiu et al., 2009, Herrera et al., 2014, Wang, 2014, Pach et al., 2014, Borangiu et al., 2015]

### 3.1.2.3 Enjeux pour le pilotage en contexte perturbé des SPH

La communauté qui travaille autour des systèmes de production holoniques, suite aux premiers travaux a été capable d'identifier des points critiques pour l'efficacité des approches de pilotage dans ce contexte.

Un premier enjeu, dès lors que la décision est distribuée, concerne les problèmes de myopie liée à l'autonomie des entités. En effet, le fait que les entités sont, à un moment donné de leur cycle de vie, complètement autonomes les amène à prendre des décisions avec une vue très centrée sur elles-mêmes. Le risque est que cela ne contribue pas à l'objectif global. Les premiers systèmes de décision distribués à avoir mis en évidence cette myopie sont peut-être les systèmes kanban où les opérateurs prennent des décisions par rapport à leur tableau d'étiquettes kanban sans autre information sur le reste du processus. Les thèses de [Klein, 2008] et [El Haouzi, 2008] au CRAN ont justement abordé ce problème en participant à la mise en œuvre du e-kanban qui permet d'enrichir l'étiquette kanban avec d'autres informations sur le produit pertinentes pour la prise de décision.

[Zambrano Rey et al., 2013] identifient deux types de myopie :

- Myopie sociale : difficulté à projeter ses décisions sur le reste du système
- Myopie temporelle : difficulté à projeter ses décisions dans le temps

[Zambrano Rey et al., 2013] vont plus loin en abordant les mécanismes utilisés dans la littérature pour empêcher la myopie. Pour la myopie sociale, il s'agit principalement de jouer sur l'autonomie des entités (0 autonomie implique une hiérarchie pure, 100% d'autonomie implique une hétéarchie pure) comme dans PROSA [Van Brussel et al., 1998] ou sur la communication entre entités à base de phéromones par exemple comme dans ADACOR [Leitão and Restivo, 2006]. Concernant la myopie temporelle, une stratégie peut consister à introduire de la simulation comme dans [Cardin and Castagna, 2009, Pujó et al., 2009] afin de prédire le comportement du système suite à une décision.

Le deuxième enjeu concerne la nervosité du système. En effet, le fait de donner de l'autonomie à des entités afin de faciliter l'adaptation du système peut conduire à un effet pervers où les entités cherchent continuellement à adapter leur comportement. Cela peut contribuer à l'émergence d'une instabilité et de comportements chaotiques [Barbosa et al., 2012]. [Barbosa et al., 2012] proposent de maîtriser cette nervosité par la mise en place d'une commande PID bien connue en automatique. Une autre façon de répondre à ce problème de nervosité pourrait consister à reprendre la main de manière hiérarchique afin de restabiliser le système. Cela pose donc la question du couplage hiérarchique/hétéroarchique et de sa dynamique (gestion des moments où la commutation entre prise de décision centralisée et décentralisée doit se faire [Pach et al., 2014, Borangiu et al., 2015, Jimenez et al., 2016, Leitão and Barbosa, 2016]).

Les auteurs de [Cardin et al., 2017] dressent justement un état de l'art sur le couplage ordonnancement prédictif et pilotage réactif dans des architectures de contrôle hybride basées principalement sur des SPH. Ils identifient notamment des défis scientifiques qui doivent être considérés dès lors que l'on s'attaque au problème d'ordonnancement prédictif-réactif. Ces défis sont les suivants :

**Estimation des performances futures du système de production :** Comment avoir des modèles du système de production capables d'estimer ses performances futures notamment suite à une décision ? Cet enjeu est notamment primordial pour pouvoir détecter le moment où on passe d'un mode centralisé prédictif à un mode réactif et local.

**Définition de mécanismes efficaces de synchronisation :** Suite à une perturbation comment choisir entre : (i) ne rien faire et attendre la fin du problème, (ii) ré-ordonnancer localement la production dans un mode distribué, (iii) demander un réordonnancement global dans un mode centralisé.

**Définition d'une architecture hybride de pilotage et des stratégies de commutation :** Quels sont les observateurs et les mécanismes de commutation qui doivent être intégrés dans l'architecture de pilotage hybride afin que cette architecture soit pleinement efficace ? Des problèmes de cohérences et d'interopérabilité vers les humains au plus haut niveau et vers les bases de données et les couches physiques se posent ici.

Pour ce dernier point, on peut noter la contribution de [Borangiu et al., 2015] qui ont proposé une architecture afin de définir des mécanismes permettant de basculer entre le mode centralisé et le mode décentralisé.

#### 3.1.2.4 Au delà du contexte

Le projet de recherche que je présente dans la section suivante a pour but de proposer une approche générale pour le pilotage sous perturbations de la production dans le contexte de l'Industrie 4.0. Cette approche basée notamment sur nos précédentes contributions (voir chapitre 2) doit mettre en œuvre un système de pilotage des systèmes de production holoniques en contexte perturbé qui est de classe II et qui utilise des approches d'ordonnancement proactives-réactives.

Les sections précédentes ont montré la pertinence d'un système de pilotage hybride hiérarchique/hétéroarchique (de classe II). L'hypothèse de recherche que je souhaite défendre est l'intérêt de remplacer les approches prédictives-réactives utilisées dans la plupart des travaux présentés précédemment par des approches proactives-réactives. De mon point de vue, partir d'une solution robuste centralisée à partir des connaissances sur les perturbations pouvant survenir prend tout son sens dans le contexte des SPH. L'idée que je souhaite défendre est qu'il est important qu'un ordonnancement prévisionnel soit robuste vis-à-vis de perturbations externes au système

(demande, matières premières, ...) tant qu'elles restent à l'intérieur de bornes alors que l'ordonnement réactif doit réagir aux perturbations internes (pannes machine, durées opératoires ...). Évidemment la répartition des perturbations prises en compte entre centralisé et distribué ne doit pas forcément être aussi stricte. C'est tout l'enjeu de mon projet de recherche que de rationaliser ces choix.

Une deuxième idée que je souhaite défendre dans mon projet est que la notion de robustesse qui a été abordée au chapitre 2 ne doit pas être réservée à la seule phase proactive. On peut imaginer une certaine récursivité de cette notion dans le temps. En effet, en phase réactive, sont prises des décisions qui peuvent (doivent ?) également être évaluées en terme de robustesse. Dans un contexte de décision décentralisée, une entité de décision utilise les autres entités de décisions comme des sources d'informations. Ce sont donc autant de sources de perturbations et la décision qui va être prise localement doit résister à ces perturbations. Ainsi, l'analyse de stabilité (présentée dans le chapitre 2) qui permet d'évaluer dans quelles bornes de perturbations une décision prise par une entité autonome reste performante après la mise en œuvre de cette décision donne un indicateur intéressant pour arbitrer entre plusieurs décisions possibles. En particulier, cela peut contribuer à évaluer le risque de nervosité, par exemple (vue comme la nécessité de modifier la solution courante régulièrement parce que incapable de supporter une perturbation trop importante). Le grand enjeu ici est le besoin en temps réel de cette analyse de stabilité (ou de sensibilité ou de tout autre calcul lié à des indicateurs de robustesse).

Un autre point important à prendre en compte dans mon projet, concerne la mise en œuvre de l'industrie 4.0 et l'opportunité induite de pouvoir récupérer de l'information provenant du terrain et qui est potentiellement intéressante pour construire des modèles de plus en plus pertinents des perturbations ; rendant la phase proactive plus efficace et précise qu'elle ne l'est aujourd'hui.

### 3.1.3 Description du projet de recherche

#### 3.1.3.1 Postulats de recherche

Dans mon projet de recherche, les postulats suivants sont acceptés :

**Les produits et les ressources sont intelligents** : ils sont identifiables de manière unique, ils sont capables de récupérer en temps réel tout ou partie de l'information les concernant, ils sont capables de mettre à jour cette information, ils sont capables de communiquer avec leur environnement, ils sont capables d'exprimer leurs besoins, ils sont capables de participer aux processus décisionnels les concernant.

**Les problèmes d'interopérabilité sont résolus** : l'information est là où on en a besoin, au moment où on en a besoin, dans le bon format, avec la bonne précision. Les problèmes d'espace/temps/forme sont résolus pour l'information.

La réalisation de ces postulats fait partie des verrous abordés par le CRAN, dans le projet de recherche de William Derigent [Derigent, 2018] par exemple. Sur les aspects interopérabilité dans le contexte de l'industrie 4.0, une équipe de chercheurs autour du Pr. Hervé Panetto est très active au CRAN.

#### 3.1.3.2 Synthèse du projet

L'objectif de mon projet de recherche est de contribuer au pilotage pour les systèmes de production holoniques en contexte perturbé par la définition et la mise en œuvre d'un système de pilotage hiérarchique/hétéroarchique intégrant des approches proactive-réactive. Partant de ce que je suis aujourd'hui, je me focaliserai plus particulièrement, au début de mon projet, sur l'activité

d'ordonnancement d'ateliers mais l'objectif à terme est également d'aborder des problèmes de pilotage plus haut niveau (planification long terme) où les problématiques de robustesse et de distribution de la décision peuvent se poser aussi.

Depuis la thèse de Carlos Herrera [Herrera, 2011], le CRAN défend l'utilisation du concept de Modèle de Système Viable (Viable System Model - VSM) [Beer, 1984] pour guider la définition et la mise en œuvre des holons et par suite des systèmes de production holoniques. Les systèmes viables sont des structures récursives composées de 5 sous-systèmes décrits par leur mission principale [Herrera, 2011] (voir figure 3.2) :

1. système opérant (implémentation) : implémente les activités primaires produisant les produits ou les services qui matérialisent l'identité du système viable
2. système de coordination : assure la coordination entre les activités primaires
3. Système de contrôle : règle et assure l'auto-organisation du système viable. Fait appel au système de coordination et à une sous-fonction de surveillance du système opérant.
4. Système intelligence : responsable de l'adaptabilité du système. Fait le lien entre les activités primaires et l'environnement.
5. Système politique : garant des objectifs du système viable.

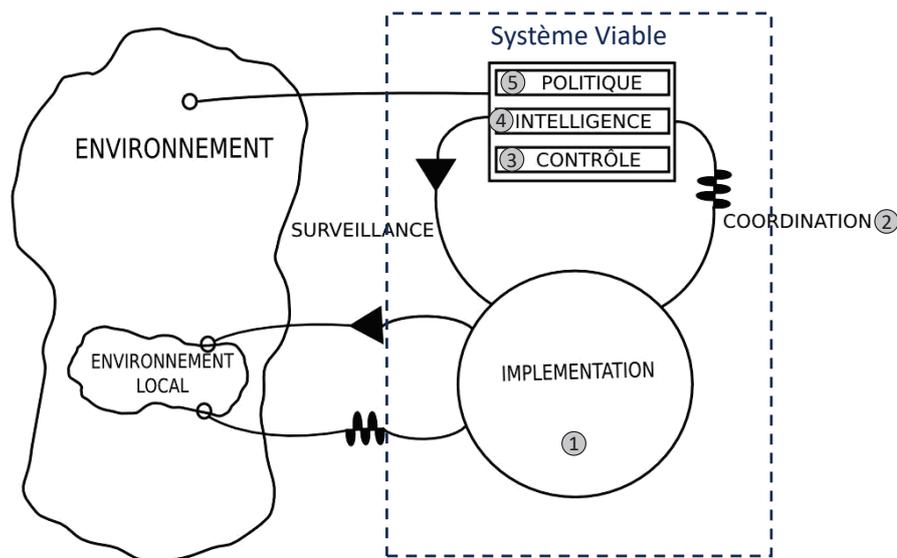


FIGURE 3.2 – Modèle *système viable* dans son environnement adapté de [Herrera, 2011]

La récursivité est réalisée au niveau du système opérant qui peut être décomposé en plusieurs systèmes viables. Ainsi les VSM fournissent un cadre de modélisation pour les holons dans lesquels la partie physique serait représentée par le système opérant et la partie informationnelle par les autres sous-systèmes.

Partant de ce concept, un schéma de principe de mon projet de recherche peut être proposé sur la figure 3.3.

Sur la partie gauche de la figure se trouve le système de production holonique vu comme un système viable.

La partie droite de la figure reprend le processus qui avait été présenté dans le chapitre précédent avec un mécanisme de commutation entre les étapes 1 (ordonnancement proactif) et

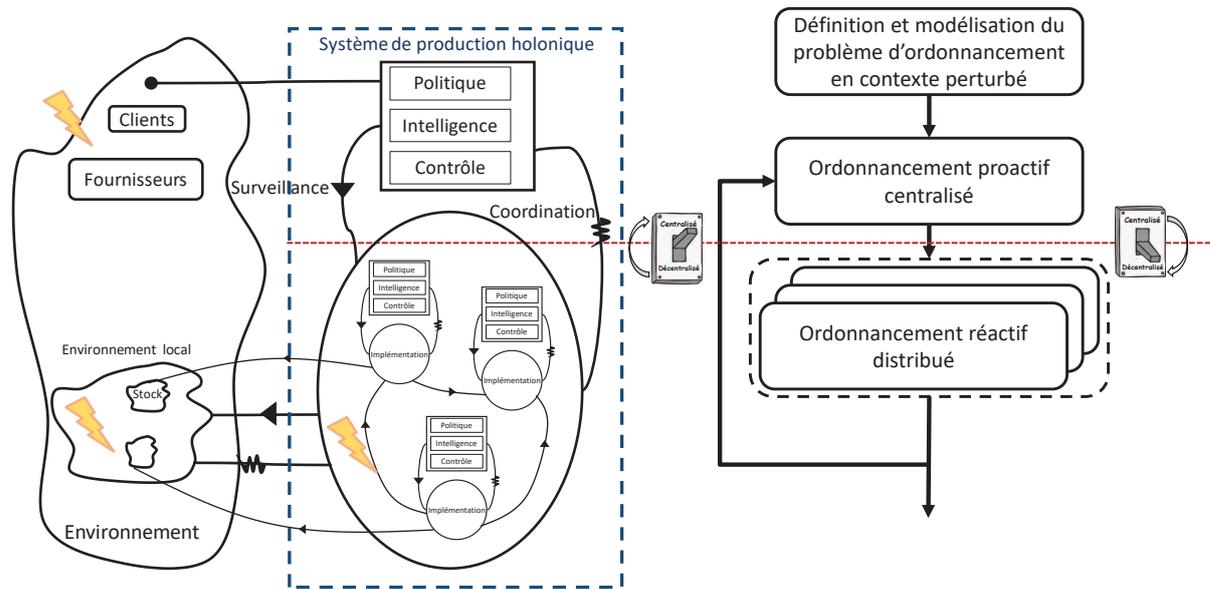


FIGURE 3.3 – Schéma de principe du projet de recherche

2 (ordonnancement réactif). La figure identifie également deux types de perturbations : interne au système au niveau de l'environnement local et entre les systèmes viables de niveau bas (au plus proche du système opérant) et externe au système par rapport à l'environnement.

Mon projet de recherche a donc pour vocation de contribuer à la mise en œuvre de la figure 3.3 par :

- la définition des modèles et approches permettant de réaliser l'ordonnancement proactif et réactif afin de prendre en compte des perturbations internes mais également externes au système.
- la définition des stratégies dans la gestion des modes centralisé/hierarchique et décentralisé/hétéarchique.
- la gestion dynamique des modèles, des approches et des stratégies évoquées dans les deux premiers points.

En particulier, le projet de recherche que je défends doit nourrir le modèle VSM.

Pour cela, ce projet de recherche a été décomposé en 4 axes :

- Axe 1 :** Modèles et outils pour l'ordonnancement proactif et réactif dans les systèmes de production holoniques
- Axe 2 :** Définition des mécanismes de décision pour le couplage centralisé/hierarchique et décentralisé/hétéarchique.
- Axe 3 :** Mise à jour du système de pilotage
- Axe 4 :** Finalisation de la recherche vers l'enseignement et la société

La figure 3.4 présente comment chacun de ces axes contribue aux systèmes de production holoniques lorsqu'ils sont vus comme des systèmes viables.

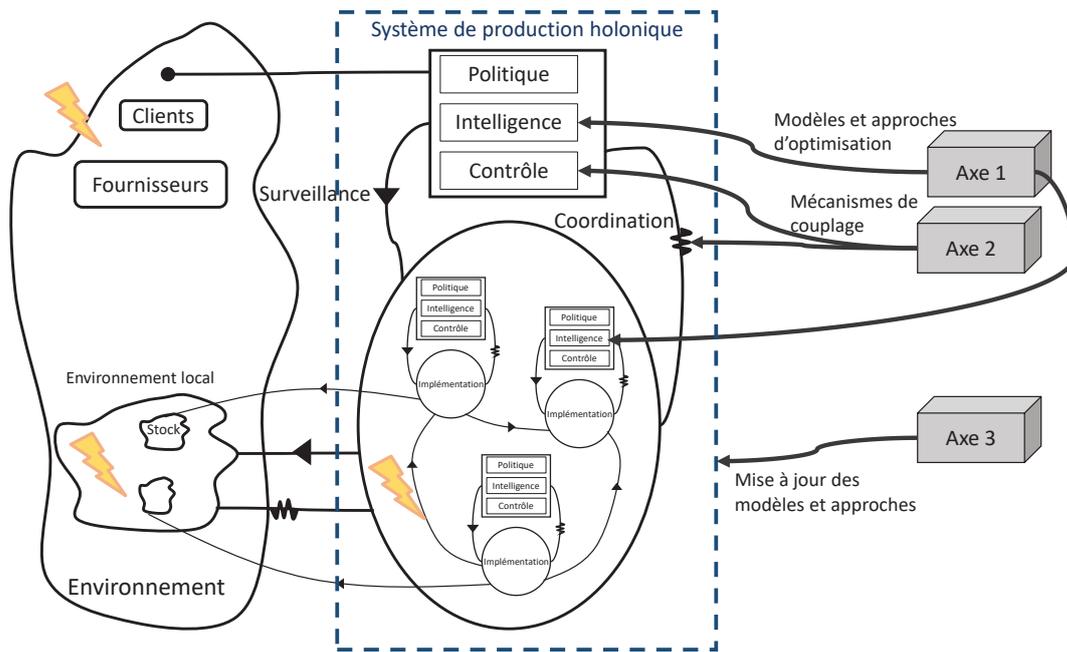


FIGURE 3.4 – Contributions de nos axes de recherche au système de production holonique vu comme un système viable

### 3.1.3.3 Axe 1 : Modèles et outils pour l'ordonnancement proactif et réactif dans les systèmes de production holoniques

*Un premier verrou scientifique de cet axe concerne la question du choix d'un modèle pour un problème d'ordonnancement robuste : comment choisir le type de modèle ? Comment comparer plusieurs modèles ? Comment combiner plusieurs modèles ?*

Les approches et modèles existants pour traiter les problèmes d'ordonnancement (y compris avec prise en compte des perturbations) reposent aujourd'hui principalement sur les outils de la recherche opérationnelle (programmation mathématique, métaheuristiques) [Billaut et al., 2010a]. Cependant, ces méthodes sont souvent des approches dédiées à un système spécifique et ses problèmes d'ordonnancement associés. Elles sont difficiles à adapter dès lors qu'une reconfiguration ou une adaptation "au fil de l'eau" du système est nécessaire (parce que des nouveaux flux doivent être mis en place, parce que des gammes alternatives de production d'un produit sont mises en œuvre, parce qu'un nouveau produit avec une gamme très différente des produits déjà existants est mis en production, ...).

Des alternatives existent. Par exemple, face à ces outils, la communauté des Systèmes à Événements Discrets (SED) étudie des concepts pour modéliser les systèmes qui évoluent en temps réel et aléatoirement, offrant ainsi des possibilités de modélisation et d'analyse qui sont intéressantes par rapport à notre objectif. En effet, les méthodes et langages basés sur la théorie des SED deviennent une alternative intéressante aux méthodes classiques pour ordonnancer la production. Depuis quelques années des travaux ont proposé d'étudier le problème d'ordonnancement déterministe en utilisant différents formalismes SED : Automates temporisés [Panek et al., 2006], Réseaux de Petri [Lefebvre, 2016], et Graphes d'événements [Buyurgan and Saygin, 2008].

L'idée est de formuler les problèmes d'ordonnancement comme des modèles de systèmes à

événements discrets plutôt que sous forme de modèles mathématiques classiques.

Le CRAN a participé à cette initiative en utilisant les automates temporisés [Marangé et al., 2011, Manceaux, 2015, Marangé et al., 2016, Himmiche et al., 2017]. Ces premiers résultats montrent notamment que les modèles SED sont une voie à explorer pour modéliser la distribution de la décision et proposer des approches réactives d’ordonnement.

Afin d’explorer cette voie, une action est déjà en cours par le biais d’une collaboration avec Jean-François Pétin et Pascale Marangé du CRAN, tous deux spécialistes des outils et modèles SED. Nous avons ainsi montré dans (C2) [Himmiche et al., 2017a] que les modèles par Automates Temporisés surclassaient les modèles classiques en terme de généralité et d’évolutivité. De plus, le CRAN, à l’initiative de Pascale Marangé, est l’animateur d’un groupe de travail “Ordonnement” au sein du GT SED du GDR MACS qui a justement pour but d’explorer cette voie.

Cependant ces premières applications considèrent un environnement certain. Pourtant, intrinsèquement les modèles et langages SED proposent des sémantiques capables d’appréhender l’incertain avec les automates temporisés stochastiques par exemple. Cette action a déjà été engagée par les travaux de master de recherche de Sara Himmiche en 2017 [MR4]. Les résultats ont été publiés dans (C1, C2, CN1) [Himmiche et al., 2018, Himmiche et al., 2017a, Himmiche et al., 2017b]. De plus Sara Himmiche poursuit une thèse débutée en octobre 2017 que je co-dirige avec Jean-François Pétin et Pascale Marangé. L’objectif de cette thèse est d’adresser les verrous scientifiques suivants :

1. Comment modéliser des problèmes d’ordonnement de la production avec les automates temporisés stochastiques en incluant des perturbations et en préservant une indépendance vis-à-vis du type d’atelier ?
2. Comment évaluer la robustesse d’une solution d’ordonnement en utilisant les automates temporisés stochastiques ?
3. Quels sont les avantages et faiblesses de ces modèles vis-à-vis des méthodes classiques ?

Dans la suite logique de cette première étape, il serait intéressant de voir comment coupler les forces des approches SED avec les forces des outils de la recherche opérationnelle pour résoudre le problème d’ordonnement sous incertitudes.

En particulier, l’usage des modèles et outils SED est intéressant pour leur capacité à modéliser des systèmes évolutifs et à prouver des propriétés sur ces systèmes (la robustesse en est une). Cependant la recherche d’une solution qui aurait un niveau de robustesse maximal avec des outils de ce type-là est très vite confrontée à l’explosion combinatoire de l’espace d’états. C’est ici que le couplage avec des outils de la recherche opérationnelle devient intéressant puisqu’ils ont justement vocation à combattre cette explosion combinatoire pour converger très rapidement vers la solution. Les outils SED pourraient par exemple être utilisés pour proposer très rapidement une première population d’individus à une métaheuristique à base de populations (algorithme génétique, . . .) ou encore pour proposer des bornes pertinentes et efficaces à intégrer dans un modèle mathématique. Un premier rapprochement entre les GTs Bermudes et SED du GDR MACS a été initié sur cette question.

*Un deuxième verrou scientifique à cet axe concerne l’ordonnement robuste d’un atelier.*

En effet l’état de l’art présenté dans le chapitre 2 de ce document met clairement en évidence qu’il s’agit d’un problème très peu traité dans la littérature. Une action de recherche consistera donc à mettre en œuvre l’approche de robustesse présentée dans le chapitre 2 de ce document au problème d’ordonnement d’atelier. Je suis convaincu que dans une démarche proactive-réactive, l’intérêt de l’étape proactive réside dans la prise en compte des perturbations externes

au système (volume commande client, date d'exigibilité) dans la mesure où l'étape réactive va plutôt s'attaquer aux perturbations internes (durées opératoires, pannes machines). Je me focaliserai donc plus particulièrement sur ces perturbations. Les résultats de la 1ère action seront très utiles ici. Pour cette action, je pourrai m'appuyer sur l'expérience de ma thèse où j'avais étudié un problème de configuration d'ateliers de machines parallèles partiellement multi-fonction (multipurpose). La configuration consistait à fixer les machines qui pouvaient réaliser des produits parmi un ensemble de possibles. L'objectif était que la configuration garantisse d'obtenir des ordonnancements performants malgré les incertitudes sur la demande.

*Le troisième verrou scientifique concerne l'ordonnancement réactif d'un atelier : comment construire l'ordonnancement local ? Comment gérer la coopération ? Comment évaluer la performance locale d'une décision ? Comment évaluer son impact sur le global ?*

L'enjeu pour moi est de monter en compétences sur l'ordonnancement réactif où j'ai encore trop peu d'expériences. Il semblerait que les méthodes issues de l'intelligence artificielle (à travers les systèmes multi-agent notamment) soient des outils privilégiés pour répondre à cette question dans le contexte des systèmes de production holoniques. Une des premières actions sera donc de monter en compétences sur les modèles et outils des systèmes multi-agents. Concernant leur modélisation, je pourrai réutiliser mes compétences en modélisation UML.

Une autre façon d'aborder ce verrou doit pouvoir se faire par l'utilisation des outils, modèles et méthodes issus de la recherche opérationnelle. Nous avons commencé à aborder ces questions dans (C5) [Aubry et al., 2017] en essayant d'identifier les modèles et approches de la recherche opérationnelle qui pouvaient contribuer au pilotage des SPH en contexte perturbé. L'idée était de pouvoir identifier la meilleure méthode (métaheuristique ?, MILP ?) par rapport à la connaissance du problème. Clairement cette première contribution était embryonnaire et mérite d'être poussée plus loin. Une autre façon est l'utilisation des modèles SED et dépend donc des résultats de la première action présentée pour cet axe. En particulier, les modèles SED proposés par le CRAN dans des précédents travaux [Marangé et al., 2009, Marangé et al., 2011, Manceaux, 2015, Marangé et al., 2016] sont des modèles centrés sur le produit (c'est le produit qui porte l'information et qui cherche quelle machine va réaliser la prochaine opération qu'il doit subir).

Le deuxième aspect de ce verrou concerne la performance des décisions prises localement et pose la question de la myopie et de la nervosité qui a déjà été évoquée dans ce document. Je souhaiterais explorer une voie afin d'aborder ces deux questions. Je défends l'idée qu'elles peuvent être abordées sous l'angle de la robustesse : i) pour la myopie on peut se poser la question suivante : "comment ma décision impacte la performance globale malgré mes incertitudes sur les informations globales ?", ii) pour la nervosité, on peut se poser la question suivante : "Comment garantir que la décision que je prends maintenant ne devra pas être modifiée plus tard à cause de nouvelles informations ?". Ces deux questions sont typiquement des questions que l'on pourrait modéliser grâce à l'approche que nous avons proposée dans le chapitre 2. La grosse différence ici, est que la réponse doit être obtenue en temps réel puisqu'on est dans une phase réactive et donc pendant l'exécution.

#### **3.1.3.4 Axe 2 : Définition des mécanismes de décision pour le couplage centralisé/hierarchique et décentralisé/hétéarchique**

Comme l'a montré [Cardin et al., 2017], le couplage ordonnancement prédictif et réactif pose encore beaucoup de verrous non résolus. Je proposerai dans cette action de contribuer à la résolution de ces verrous.

Le couplage centralisé/hierarchique et décentralisé/hétéroarchique peut être vu selon deux dimensions : spatiale et temporelle. Concernant la dimension temporelle, cela revient à étudier le verrou suivant : *Comment identifier le meilleur moment où commuter entre le pilotage centralisé/hierarchique et le pilotage décentralisé/hétéroarchique et vice-versa ?* Dans le sens centralisé vers décentralisé, on pose la question de l'identification du moment où il devient nécessaire de changer une solution courante suite à des événements imprévus ou simplement suite à un écart trop important entre la situation actuelle réelle et la situation prévisionnelle utilisée pour calculer l'ordonnancement proactif. Partant de cet ordonnancement initial robuste, on peut par exemple décider que le moment de commutation sera le moment où la perturbation fait sortir le paramètre du risque à couvrir  $P$  qui avait été défini dans l'étape proactive.

Une autre façon de répondre à cette question est, suite à l'occurrence d'une perturbation, de décider si il faut commuter pour un ré-ordonnancement local ou ne rien faire et continuer à exécuter l'ordonnancement en cours ou bien demander un ré-ordonnancement global.

Dans le sens décentralisé vers centralisé, on pose la question de l'identification du moment où il devient nécessaire de recommuter dans le mode centralisé, parce que la performance globale s'est trop dégradée par exemple. Ou parce que des conflits trop importants entre holons sont apparus. Si on est sur un ordonnancement à horizon glissant, ce moment de commutation est a minima à chaque début d'horizon.

Concernant la dimension spatiale, cela revient à étudier le verrou suivant : *Comment répartir la décision ? Quel degré d'autonomie donne-t-on à chaque entité décisionnaire ?*

Par exemple doit-on donner tout pouvoir de décision au produit lorsque cela le concerne ? La politique doit-elle être identique pour tous les holons ?

En particulier l'enjeu ici est de ne pas proposer un système de pilotage où les itérations successives d'ordonnancement/ré-ordonnancement débouchent sur trop de nervosité [Barbosa et al., 2012]. Des premières propositions ont été faites dans [Thomas et al., 2009, Herrera et al., 2014, Borangiu et al., 2015, Barbosa et al., 2015, Jimenez et al., 2016, Leitão and Barbosa, 2016, Mezgebe et al., 2017, Zimmermann et al., 2017] par exemple afin de proposer des approches ou des mécanismes pour le contrôle hybride centralisé/distribué.

### 3.1.3.5 **Axe 3 : Mise à jour du système de pilotage**

La mise en œuvre de l'industrie 4.0 et la généralisation associée de l'usage des Technologies de l'Information et de la Communication dans les ateliers offrent la possibilité de récupérer une quantité d'informations énorme provenant du terrain. L'analyse de ces données doit permettre d'identifier et de construire de l'information et de la connaissance sur le système opérant.

En particulier l'analyse de ces données doit faciliter :

- la modélisation des données incertaines et des aléas et l'identification de leurs paramètres : dans la définition de la robustesse que nous utilisons, cela revient notamment à spécifier  $P$  en fonction d'un historique de valeurs. Plus les données incertaines sont modélisées de manière fiable, plus les analyses de robustesse qui peuvent être faites seront précises.
- mettre à jour les modèles obtenus dans l'axe 1 : l'idée est de nourrir les modèles de recherche opérationnelle et SED avec des données correspondant le mieux possible à la réalité et de pouvoir mettre à jour ces modèles avec la connaissance de l'état réel du système (construite à partir de systèmes d'apprentissage ...). L'industrie 4.0 est caractérisée notamment par un contexte changeant où les ateliers sont reconfigurables de telles sorte que la structure même du problème peut changer.
- mettre à jour les mécanismes de couplage définis dans l'axe 2.

Cet axe de recherche est certainement le plus ambitieux et à ma connaissance le plus original. Les modèles d'optimisation ou les règles de pilotage sont souvent considérés comme stables. Ici l'enjeu est au contraire de pouvoir les maintenir à jour. Le contexte des systèmes de production holonique et de l'industrie 4.0 m'encourage à définir cet axe.

*Un des premiers verrous qu'il faudra traiter concerne la juste agrégation des données qui sont captées de manière brute sur le terrain.* Ces données sont associées à l'objet physique alors que les décisions qui doivent être prises peuvent être à des niveaux bien plus élevés que celui du système physique. Cela implique que ces données brutes, en plus de représenter un volume énorme souvent hétérogène, doivent être transformées, agrégées et explicitées afin d'être exploitables. Ce qui nécessite l'utilisation d'outils sophistiqués de type data mining.

*Un deuxième verrou concerne les mécanismes de mise à jour et les stratégies de mise en œuvre des mises à jour.* En particulier le problème de nervosité qui a été identifié pour le pilotage s'applique ici aussi. Il ne faudrait pas que les modèles soient remis en cause trop souvent.

Les compétences acquises en modélisation de données lors de ma carrière seront utiles ici afin de structurer les données recueillies et je proposerai une collaboration avec deux collègues du CRAN : Philippe Thomas (data mining par réseaux de neurones) et William Derigent (modélisation de la connaissance) pour les aspects reconstruction de l'information et data mining.

### 3.1.3.6 Axe 4 : finalisation de la recherche vers l'enseignement et vers l'entreprise

Autour de la première action de l'axe 1, j'ai pour objectif de développer un prototype fonctionnel avec un ingénieur de recherche du CRAN. Ce prototype doit servir de démonstrateur auprès d'industriels afin d'établir des collaborations dans le but d'expérimenter les modèles que nous développons par l'utilisation des SED. Une première version de ce prototype (TABS pour Timed-Automata Based Scheduling) a déjà été développée et est en continuelle amélioration. Ce prototype a été présenté dans (CN2) [Pannequin et al., 2017].

J'ai également comme projet de participer à la conception et au développement d'une plateforme de recherche et d'enseignement afin d'illustrer et de transférer les résultats de nos recherches autour de l'industrie 4.0 auprès des étudiants de la faculté des sciences et technologies (master ISC et licence SPI) et afin d'expérimenter les résultats de notre recherche. Cette plateforme se développe en parallèle d'un projet CPER CyberEntreprises pilotée par Hind Bril El Haouzi qui a permis l'acquisition de robots et autres matériels (NTICS). Cette plateforme doit être mise en œuvre à l'AIP Lorrain. En tant que responsable du parcours Ingénierie Numérique et PiLotage pour l'Industrie Connectée du master ISC, dont le lien avec la plateforme est évident, je pilote la définition de cette plateforme du point de vue du master ISC. Cette plateforme sera présentée dans le projet enseignement. D'un point de vue recherche, elle doit permettre de proposer un cas d'étude d'un atelier reconfigurable soumis à des perturbations dues notamment à un flux réentrant de produits à régénérer.

### 3.1.4 Justification du projet

Cette section a pour but de justifier mon projet par un positionnement par rapport au laboratoire, puis aux communautés nationale et internationale.

#### 3.1.4.1 Contexte local

Le projet que je souhaite défendre est en parfaite adéquation avec le projet défendu par le département ISET du CRAN et son projet Systèmes & Objets Intelligents en Interaction qui a pour objectif notamment de traiter les verrous suivants dans le contexte de l'industrie 4.0 :

- La formalisation et la construction de modèles de simulation et d’optimisation adaptables aux variations de l’environnement sur la base des données issues des produits/objets intelligents et de leurs interactions permettant une évaluation et une prise de décision efficace au niveau système.
- L’étude et la modélisation de mécanismes de coopération entre objets (aide à la décision locale coopérative – dimension humaine) afin d’offrir des services adaptés aux besoins.

L’axe 1 proposé dans mon projet intègre clairement une collaboration avec un autre projet du département ISET : Sûreté de fonctionnement, PHM et maintenance des systèmes complexes (SdF-PHM2).

Enfin ce projet est complémentaire avec des actions de recherche de trois autres jeunes HDR.

William Derigent [Derigent, 2018] travaille sur les aspects modèles de données et la gestion de ces données pour les systèmes holoniques. Il a notamment pour objectif de définir et mettre en œuvre le produit intelligent du point de vue informationnel et technologique.

Hind Bril El Haouzi [Bril El Haouzi, 2017] travaille sur les architectures de pilotage intelligent des systèmes de production à travers l’utilisation des modèles de simulation.

Philippe Thomas [Thomas, 2014] travaille sur l’exploitation de données pour en extraire des modèles afin notamment de piloter des systèmes de production en exploitant les formalismes des réseaux de neurones et des réseaux de Pétri.

#### 3.1.4.2 Contexte régional

La région Grand’Est affiche un plan régional “Usine du futur” d’accompagnement des entreprises du territoire pour leur mutation vers l’usine du futur. Elle propose notamment un diagnostic entièrement financé aux PME qui voudraient intégrer les concepts de l’industrie 4.0 au sein de leur entreprise.

Dans le cadre de l’axe 1, nous collaborons avec une entreprise située en Lorraine dans le but d’expérimenter sur un cas industriel les résultats de nos travaux.

Au niveau de l’Université de Lorraine, le projet “Lorraine Université d’Excellence” (en réponse à l’appel national IDEX-ISITE) propose un ensemble de programmes permettant de financer des travaux de recherche. Un Pré-Impact a été lancé autour de la cobotique et des systèmes collaboratifs intelligents. Nous devrions pouvoir émerger dans ce pre-impact.

#### 3.1.4.3 Contexte National

Le paradigme Systèmes Contrôlés par le Produit trouve naturellement sa place au sein du GT “Intelligent Manufacturing Systems and Services” (IMS2) du GDR MACS dans lequel je suis un membre actif et dans lequel les autres laboratoires de recherche Français s’intéressant aux Holonic Manufacturing Systems sont également particulièrement actifs.

Les problématiques liées à l’ordonnancement sont abordées plus spécifiquement dans le GT Bermudes du GDR MACS et GDR RO et dans le GT GOTHa (Groupe de recherche en Ordonnancement Théorique et Appliqué) du GDR RO. La société savante ROADEF (Société Française de Recherche Opérationnelle et d’Aide à la Décision) a beaucoup contribué à la recherche sur l’optimisation en contexte incertain.

Concernant l’axe 1, des interactions avec le GT SED du GDR MACS sont déjà établies. De plus un projet a été initié dans ce GT autour des modèles SED pour l’ordonnancement. Ce projet est piloté par des membres du CRAN.

La problématique de l’industrie 4.0 est au cœur des préoccupations de la communauté de recherche en France comme peut en témoigner le résultat de l’Atelier de Réflexion Prospective

“FuturProd” dont l’un des objectifs étaient d’imaginer les systèmes de production de 2030 et de définir les priorités de recherches pour l’ANR. Parmi les enjeux identifiés par le rapport [Brissaud et al., 2013], on peut citer :

- Développer de nouvelles technologies intelligentes
- Développer les outils pour concevoir et organiser les systèmes de production

Mon projet de recherche s’inscrit clairement dans ces enjeux.

Dans les appels à projets 2018 de l’ANR, mon projet de recherche s’inscrit dans l’axe “Usine du futur : Homme, organisation, technologies” du troisième challenge “Stimuler le renouveau industriel”.

#### **3.1.4.4 Contexte International**

Au niveau international, mon projet de recherche s’inscrit dans les problématiques considérées par les TC5.1 et TC5.2 de l’IFAC.

L’action 1 de mon projet pourrait être une première étape pour ouvrir un nouveau domaine de recherche à la frontière entre le domaine des Systèmes à Événements Discrets et celui de la Recherche Opérationnelle autour d’un objet commun : l’ordonnancement de la production sous incertitudes. Ce nouveau domaine de recherche pourrait créer une communauté de chercheurs entre les TC 1.3, 3.1, 5.1 et 5.2 de l’IFAC.

La problématique de l’Industrie 4.0 est elle aussi au cœur des préoccupations de la communauté de recherche internationale. Au niveau européen, les appels à projets H2020 autour du challenge “Factory of the Future” témoignent de cet enjeu.

On peut également citer l’initiative de l’International Electrotechnical Commission qui a publié un white paper sur ce challenge [IEC, 2015].

Concernant les systèmes de production holoniques, la communauté internationale “Intelligent Manufacturing System” se donne régulièrement rendez-vous aux conférences internationales : SOHOMA, HoloMAS.

## **3.2 Projet d’enseignement : formation des étudiants au Pilotage pour l’Industrie 4.0**

Depuis mon arrivée à la faculté des Sciences et Technologies, mes activités liées à l’enseignement reposent notamment sur des enseignements dans des thématiques en lien direct avec ma recherche. Au fur et à mesure de ma carrière d’enseignant-chercheur, j’ai pris des responsabilités dans les diplômes qui m’ont accueilli (cf. chapitre 1 de ce mémoire). Mon projet d’enseignement concerne principalement ma nouvelle responsabilité du parcours “Ingénierie Numérique et PiLottage pour l’Industrie Connectée” (INPLIC) au sein du master Ingénierie des Systèmes Complexes sur le quadriennal 2018-2022 et la façon dont je souhaite le mettre en œuvre. Le master ISC est piloté par le professeur Éric Levrat. Dès 2016, nous avons commencé la réflexion pour définir les objectifs du master et des parcours ainsi que son architecture, forts du bilan de la précédente habilitation.

### **3.2.1 Objectifs du parcours INPLIC**

L’objectif du parcours est de former des futurs cadres, ayant des compétences en Ingénierie Numérique de Systèmes, Automatisation, Simulation et Optimisation appliquées aux systèmes de production. Ils doivent être capables de mettre en œuvre les NTIC pour, concevoir, piloter et

améliorer les systèmes de production, et pour accompagner les entreprises dans leur transition vers l'industrie connectée 4.0.

### 3.2.2 Maquette du parcours INPLIC

Le parcours est ainsi construit de telle sorte que les étudiants soient d'une part formés aux outils, modèles, et méthodes classiques du pilotage et de l'automatisation des systèmes de production puis d'autre part en deuxième année de master préparés à l'implantation des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication et aux implications sur l'ingénierie et le pilotage des systèmes de production : jumeaux numériques, pilotage hybride hiérarchique/hétéroarchique, systèmes de production holoniques. La figure 3.5 présente l'architecture en terme d'Unités d'Enseignement (UE) du parcours INPLIC. Les semestres 7 et 8 proposent des UEs relatives aux outils, modèles et approches historiques alors que les UEs du semestre 9 proposent des UEs avancées sur les outils, modèles et approches avancées. L'UE "Pilotage pour l'Industrie Connectée", dont je serai le responsable sera le lieu privilégié pour présenter les problématiques abordées en recherche par les chercheurs du département ISET du CRAN sur toutes les questions de pilotage. Ils interviendront de manière active dans le contenu de cette UE. L'UE "Ingénierie Numérique des Systèmes" doit aborder avec les étudiants, l'intérêt du jumeau numérique. L'UE "6-Sigma" fait référence aux outils de l'excellence opérationnelle. Ces 3 UEs sont les "majeures" du parcours.

Sur le site de Nancy deux autres parcours, respectivement dédiés à la maintenance et aux réseaux de communication, seront également mis en œuvre. L'architecture du master a été pensée de telle sorte qu'une cross-fertilisation existe entre les parcours. En effet chaque parcours définit un ensemble d'Unités d'enseignements mineures choisies parmi les UEs majeures d'un autre parcours. Pour le parcours INPLIC, les étudiants suivront les UES mineures "Internet des objets", "Systèmes de Soutien Logistique Intégré" et "Traitements Statistiques et Big Data".

### 3.2.3 Une plateforme pour l'enseignement mais aussi la recherche

Afin de pouvoir confronter les étudiants à des problèmes réels et concrets, je collabore (comme correspondant pédagogique et recherche) avec l'AIP de Lorraine à la définition d'une Plateforme reconfigurable de production. Cette plateforme intitulée "ProGreSS4.0" pour "PROduction & REGeneration SyStem 4.0" a pour ambition de disposer à l'AIPL d'une ressource partagée pour les enseignants et les chercheurs afin d'illustrer les concepts et enjeux de l'industrie 4.0 et d'expérimenter des résultats.

C'est pourquoi cette plateforme est pensée pour être reconfigurable (le système opérant peut être reconfiguré pour traiter un nouveau produit). Elle intègrera des cobots, des robots mobiles, des imprimantes 3D, les NTIC (IoT, Cloud...).

L'idée de la plateforme est de fournir un scénario de production d'un produit customisable, qui après usage peut être régénéré par la plateforme pour être réinjecté dans le flux de production. Ce flux de régénération doit permettre de faciliter l'émergence du besoin de reconfigurabilité (la gamme de désassemblage du produit n'est pas forcément connu à l'avance) d'une part mais il permet également d'introduire un flux réentrant induisant des perturbations sur les stocks et l'occupation des machines (utilisées pour désassembler) d'autre part. Le schéma de principe de la plateforme est donné sur la figure 3.6. Les principes de régénération qui seront mis en œuvre sur la plateforme ont été étudiés dans la thèse [Diez, 2017] du CRAN.

# Parcours type – INPLIC

Ingénierie Numérique et Pilotage pour l'Industrie Connectée

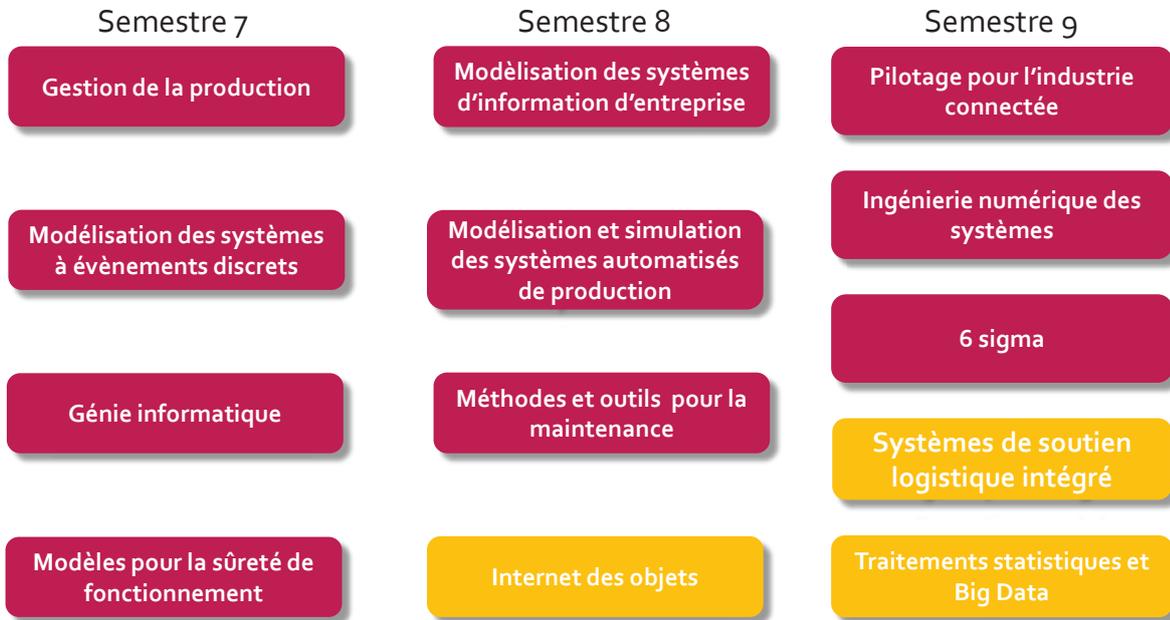


FIGURE 3.5 – Architecture du parcours INPLIC

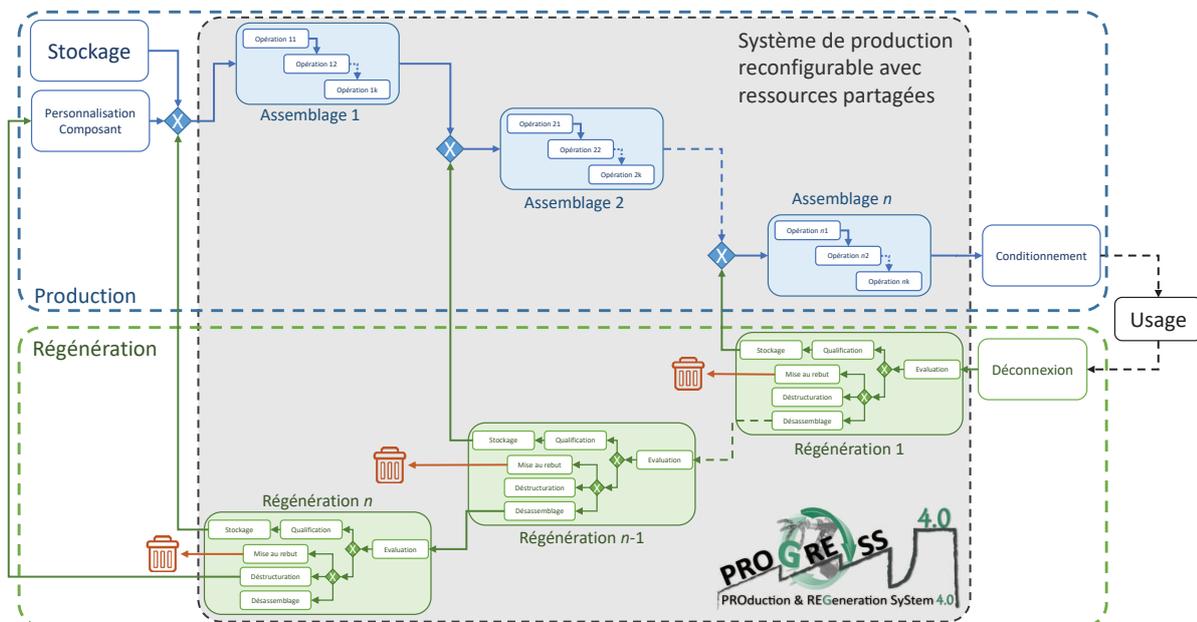


FIGURE 3.6 – Schéma de principe de la plateforme ProGreSS 4.0

# Liste des publications de l'auteur

- [Aubry, 2007] Aubry, A. (2007). *Optimisation pour la configuration robuste de systèmes de production de biens et de services*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- [Aubry et al., 2017] Aubry, A., Bril, H., Thomas, A., and Jacomino, M. (2017). Product driven systems facing unexpected perturbations : How operational research models and approaches can be useful? In Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A., Leitão, P., and Oliveira, J. B., editors, *6th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA'2016*, pages 259–267. Springer International Publishing.
- [Aubry and Derigent, 2016] Aubry, A. and Derigent, W. (2016). *Préface du numéro spécial : Modélisation, Optimisation et Simulation pour le développement durable suite à la conférence MOSIM'2014*, volume 49 of *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. Lavoisier.
- [Aubry et al., 2006a] Aubry, A., Espinouse, M.-L., and Jacomino, M. (2006a). Robust load-balanced configuration with fixed costs for the parallel multi-purpose machines problem. In *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*, volume 2, pages 990–995.
- [Aubry et al., 2007a] Aubry, A., Espinouse, M.-L., and Jacomino, M. (2007a). A max-min approach to delay load-scheduling in power distribution networks despite source-capacity uncertainties. In *International Network Optimization Conference (INOC'07)*, page 6 pages, Spa, Belgium.
- [Aubry et al., 2007b] Aubry, A., Espinouse, M.-L., and Jacomino, M. (2007b). Configuration d'un réseau de distribution d'électricité en contexte incertain. In *Conférence conjointe FRAN-CORO V/ROADEF 2007*, pages pp 9–19, Grenoble, France.
- [Aubry et al., 2008a] Aubry, A., Espinouse, M.-L., and Jacomino, M. (2008a). Robustesse en optimisation : avantages et limites de quelques approches. In *9ème congrès de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'2008)*, Nancy, France.
- [Aubry et al., 2005a] Aubry, A., Espinouse, M.-L., Jacomino, M., and Mrozicki, P. (2005a). Compromis entre robustesse et coût pour la configuration d'un parc de machines parallèles partiellement multifonctions. In Alexandre Vautier, S. S., editor, *MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC*, pages 331–338, Rennes, France. IRISA – IETR – LTSI.
- [Aubry et al., 2006b] Aubry, A., Espinouse, M.-L., Jacomino, M., and Raison, B. (2006b). About configuration under uncertainty of a power distribution network. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(3) :383 – 388. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- [Aubry et al., 2005b] Aubry, A., Espinouse, M.-L., Jacomino, M., and Rossi, A. (2005b). Minimisation des coûts liés à la configuration robuste d'un parc de machines polyvalentes. In *6ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'2005)*, Tours, France.

- [Aubry et al., 2012] Aubry, A., Jacomino, M., Rossi, A., and Espinouse, M.-L. (2012). Maximizing the configuration robustness for parallel multi-purpose machines under setup cost constraints. *Journal of Scheduling*, 15(4) :457–471.
- [Aubry et al., 2013] Aubry, A., Noël, J., Rahon, D., and Panetto, H. (2013). A cross-scale models interoperability problem : The plate-form(e)3 project case study. In Demey, Y. T. and Panetto, H., editors, *On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2013 Workshops*, pages 57–61, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- [Aubry and Panetto, 2014] Aubry, A. and Panetto, H. (2014). Towards interoperability properties for tooling a software bus for energy efficiency. In *4th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2014*, volume 1, pages 285–291, Kopaonik, Serbia.
- [Aubry et al., 2015] Aubry, A., Panetto, H., and Dassisti, M. (2015). Toward an interoperable software platform for sustainable energy. *Computer Science and Information Systems*, 12(3) :1079–1100.
- [Aubry et al., 2008b] Aubry, A., Rossi, A., Espinouse, M.-L., and Jacomino, M. (2008b). Minimizing setup costs for parallel multi-purpose machines under load-balancing constraint. *European Journal of Operational Research*, 187(3) :1115–1125.
- [Aubry et al., 2008c] Aubry, A., Rossi, A., and Jacomino, M. (2008c). Sensitivity analysis for the configuration of a multi-purpose machines workshop. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2) :15831 – 15836. 17th IFAC World Congress.
- [Aubry et al., 2009] Aubry, A., Rossi, A., and Jacomino, M. (2009). A generic off-line approach for dealing with uncertainty in production systems optimisation. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(4) :1481–1486. 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- [Enacheanu et al., 2006] Enacheanu, B., Raison, B., Ivanova, D., Caire, R., Aubry, A., and Hadsaid, N. (2006). Flexible Electric Infrastructures for Advanced Distribution Automation. In *CRIS 2006, Third International Conference on Critical Infrastructures*, Alexandria, United States.
- [Giovannini et al., 2012a] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., Dassisti, M., and El Haouzi, H. (2012a). Knowledge-based system for manufacturing sustainability. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6) :1333–1338. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- [Giovannini et al., 2012b] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., Dassisti, M., and El Haouzi, H. (2012b). Ontology-based system for supporting manufacturing sustainability. *Annual Reviews in Control*, 36(2) :309–317.
- [Giovannini et al., 2013] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., and El Haouzi, H. (2013). Mass customisation in sustainable networked enterprises. In Camarinha-Matos, L. M. and Scherer, R. J., editors, *Collaborative Systems for Reindustrialization*, pages 670–678, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- [Giovannini et al., 2014a] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., and El Haouzi, H. (2014a). A systemic perspective for mass customization : An approach to defining product lines. *INSIGHT*, 16(4) :10–12.
- [Giovannini et al., 2016] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., El Haouzi, H., Canciglieri, O., and Pierrel, L. (2016). Knowledge representation, retrieval and reuse for product family design : An anti-logicist approach. *Computers & Industrial Engineering*, 101 :391–402.

- 
- [Giovannini et al., 2014b] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., El Haouzi, H., and Pierrel, L. (2014b). Knowledge-based system for customer variety representation in product lines definition. In IFIP, editor, *6th Doctoral Workshop on “Product and Asset Lifecycle Management”, PALM 2014*, Les Diablerets, Switzerland.
- [Giovannini et al., 2014c] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., El Haouzi, H., Pierrel, L., and Dassisti, M. (2014c). Approach for the rationalisation of product lines variety. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3) :3280 – 3291. 19th IFAC World Congress.
- [Giovannini et al., 2015] Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., El Haouzi, H., Pierrel, L., and Dassisti, M. (2015). Anti-logicist framework for design-knowledge representation. *Annual Reviews in Control*, 39 :144–157.
- [Himmiche et al., 2017a] Himmiche, S., Aubry, A., Marangé, P., and Péting, J.-F. (2017a). Modeling flexible workshops scheduling problems : evaluating a timed automata based approach vs milp. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1) :1225–1230. 20th IFAC World Congress.
- [Himmiche et al., 2018] Himmiche, S., Aubry, A., Marangé, P., Duflot-Kremer, M., and Péting, J.-F. (2018). Using statistical-model-checking-based simulation for evaluating the robustness of a production schedule. In Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A., and Cardin, O., editors, *7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA’2017*, pages 345–357. Springer International Publishing.
- [Himmiche et al., 2017b] Himmiche, S., Marangé, P., Aubry, A., Duflot, M., and Péting, J.-F. (2017b). Évaluation de la robustesse d’un ordonnancement par Automates Temporisés Stochastiques. In *11ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2017*.
- [Le et al., 2009] Le, M. H., Aubry, A., and Jacomino, M. (2009). Multiparametric programming to assess the completion time sensitivity of multipurpose parallel machines. In *10ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d’Aide à la Décision (ROADEF’2009)*, Toulouse, France.
- [Lezoche et al., 2012a] Lezoche, M., Aubry, A., and Panetto, H. (2012a). Formal fact-oriented model transformations for cooperative information systems semantic conceptualisation. In Zhang, R., Zhang, J., Zhang, Z., Filipe, J., and Cordeiro, J., editors, *Enterprise Information Systems*, pages 117–131, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- [Lezoche et al., 2011] Lezoche, M., Panetto, H., and Aubry, A. (2011). Conceptualisation approach for cooperative information systems interoperability. In *Proceedings of the 13th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 1 : ICEIS*, pages 101–110. INSTICC, SciTePress.
- [Lezoche et al., 2012b] Lezoche, M., Yahia, E., Aubry, A., Panetto, H., and Zdravković, M. (2012b). Conceptualising and structuring semantics in cooperative enterprise information systems models. *Computers in Industry*, 63(8) :775–787. Special Issue on Sustainable Interoperability : The Future of Internet Based Industrial Enterprises.
- [Marangé et al., 2015] Marangé, P., Aubry, A., and Péting, J.-F. (2015). Ordonnancement d’ateliers à partir de patrons de modélisation basés sur des automates communicants. 10ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2015. Poster.
- [Marangé et al., 2016] Marangé, P., Aubry, A., and Péting, J.-F. (2016). Ordonnancement d’ateliers à partir de patrons de modélisation basés sur des automates communicants. In *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation*, Montréal, Canada.
- [OTM, 2015] OTM, editor (2015). *On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2015 Workshops*, volume LNCS 9416 of *On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2015 Workshops*. DOA Institute, Springer.

- [Pannequin et al., 2017] Pannequin, R., Marangé, P., Aubry, A., and Pétin, J.-F. (2017). TABS : un outil logiciel d'ordonnancement de la production basé sur les automates temporisés. In *11ème Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2017*, Marseille, France.
- [Rossi et al., 2011] Rossi, A., Aubry, A., and Jacomino, M. (2011). A sensitivity analysis to assess the completion time deviation for multi-purpose machines facing demand uncertainty. *Annals of Operations Research*, 191(1) :219–249.
- [Rossi et al., 2012] Rossi, A., Aubry, A., and Jacomino, M. (2012). Connectivity-and-hop-constrained design of electricity distribution networks. *European Journal of Operational Research*, 218(1) :48–57.
- [Szejka et al., 2015a] Szejka, A. L., Aubry, A., Panetto, H., Canciglieri, O., and Rocha Loures, E. (2015a). A method for formalizing requirements interoperation in complex systems engineering. *INSIGHT*, 18(4) :28–30.
- [Szejka et al., 2014] Szejka, A. L., Aubry, A., Panetto, H., Canciglieri Júnior, O., and Rocha Loures, E. (2014). Towards a conceptual framework for requirements interoperability in complex systems engineering. In *9th International Workshop on Enterprise Integration, Interoperability and Networking (EI2N'2014)*, volume LNCS 8842 of *On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2014 Workshops*, pages 229–240, Amantea, Italy. OTM, Springer.
- [Szejka et al., 2017a] Szejka, A. L., Canciglieri Jr., O., Panetto, H., Rocha Loures, E., and Aubry, A. (2017a). Semantic interoperability for an integrated product development process : a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 55(22) :6691–6709.
- [Szejka et al., 2017b] Szejka, A. L., Canciglieri Junior, O., Panetto, H., Aubry, A., and Rocha Loures, E. F. (2017b). A semantic reconciliation view to support the interoperable information relationships in product design and manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1) :15896–15903. 20th IFAC World Congress.
- [Szejka et al., 2015b] Szejka, A. L., Canciglieri Júnior, O., Rocha Loures, E., Panetto, H., and Aubry, A. (2015b). Requirements interoperability method to support integrated product development. In *The 45th International Conference on Computers & Industrial Engineering, CIE45*, Metz, France.
- [Szejka et al., 2016] Szejka, A. L., Júnior, O. C., Rocha Loures, E., Panetto, H., and Aubry, A. (2016). Proposal of a model-driven ontology for product development process interoperability and information sharing. In Harik, R., Rivest, L., Bernard, A., Eynard, B., and Bouras, A., editors, *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*, pages 158–168. Springer International Publishing.
- [Uva et al., 2017] Uva, G., Dassisti, M., Iannone, F., Florio, G., Maddalena, F., Ruta, M., Grieco, A., Giannoccaro, I., Albino, V., Lezoche, M., Aubry, A., Giovannini, A., Buscicchio, A., Eslami, Y., and Leggieri, V. (2017). Modelling framework for sustainable co-management of multi-purpose exhibition systems : The “fiera del levante” case. *Procedia Engineering*, 180 :812–821. International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016.
- [Yahia et al., 2011a] Yahia, E., Aubry, A., and Panetto, H. (2011a). Explicitation de la sémantique de modèles de systèmes d'information d'entreprise. In MACS, G., editor, *4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS*, page CDROM, Marseille, France.
- [Yahia et al., 2011b] Yahia, E., Aubry, A., and Panetto, H. (2011b). Systems interoperability evaluation through formalisation of semantic relationships. *INSIGHT*, 14(4) :11–12.

- 
- [Yahia et al., 2012a] Yahia, E., Aubry, A., and Panetto, H. (2012a). Formal measures for semantic interoperability assessment in cooperative enterprise information systems. *Computers in Industry*, 63(5) :443–457.
- [Yahia et al., 2011c] Yahia, E., Lezoche, M., Aubry, A., and Panetto, H. (2011c). Extraction de la sémantique dans les modèles de systèmes d’information d’entreprises collaboratifs. In *Journée Nationale du GT Easy-DIM*, Lyon, France.
- [Yahia et al., 2011d] Yahia, E., Lezoche, M., Aubry, A., and Panetto, H. (2011d). Semantics enactment in enterprise information systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1) :13064–13073. 18th IFAC World Congress.
- [Yahia et al., 2012b] Yahia, E., Lezoche, M., Aubry, A., and Panetto, H. (2012b). Extraction de la structure de la sémantique dans les modèles de systèmes d’information d’entreprises collaboratives. *Revue des Sciences et Technologies de l’Information – Série ISI : Ingénierie des Systèmes d’Information*, 17(4) :49–77.
- [Yahia et al., 2012c] Yahia, E., Lezoche, M., Aubry, A., and Panetto, H. (2012c). Semantics enactment for interoperability assessment in enterprise information systems. *Annual Reviews in Control*, 36(1) :101–117.
- [Yahia et al., 2009] Yahia, E., Yang, J., Aubry, A., and Panetto, H. (2009). On the use of description logic for semantic interoperability of enterprise systems. In Meersman, R., Herrero, P., and Dillon, T., editors, *On the Move to Meaningful Internet Systems : OTM 2009 Workshops*, pages 205–215, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- [Zdravković et al., 2011] Zdravković, M., Panetto, H., Trajanović, M., and Aubry, A. (2011). An approach for formalising the supply chain operations. *Enterprise Information Systems*, 5(4) :401–421.
- [Zdravković et al., 2018] Zdravković, M., Zdravković, J., Aubry, A., Moalla, N., Guedria, W., and Sarraipa, J. (2018). Domain framework for implementation of open iot ecosystems. *International Journal of Production Research*, 56(7) :2552–2569.
- [Zdravković et al., 2014] Zdravković, M., Panetto, H., Trajanović, M., and Aubry, A. (2014). Explication and semantic querying of enterprise information systems. *Knowledge and Information Systems*, 40(3) :697–724.
- [Zdravković et al., 2011] Zdravković, M., Trajanović, M., Panetto, H., Aubry, A., and Lezoche, M. (2011). Ontology-based supply chain process configuration. In of Nis, U., editor, *34th International Conference on Production Engineering, ICPE 2011*, pages 399–402, Nis, Serbia.
- [Zdravković et al., 2016] Zdravković, M., Trajanović, M., Sarraipa, J., Jardim-Gonçalves, R., Lezoche, M., Aubry, A., and Panetto, H. (2016). Survey of Internet-of-Things platforms. In *6th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2016*, volume 1, pages 216–220, Kopaonik, Serbia.



# Bibliographie

- [CIM, 1989] (1989). A reference model for computer integrated manufacturing from the viewpoint of industrial automation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2(2) :114–127.
- [Aissani et al., 2009] Aissani, N., Beldjilali, B., and Trentesaux, D. (2009). Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry : A reinforcement approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7) :1089 – 1103. Distributed Control of Production Systems.
- [Aissi et al., 2011] Aissi, H., Aloulou, M. A., and Kovalyov, M. Y. (2011). Minimizing the number of late jobs on a single machine under due date uncertainty. *Journal of Scheduling*, 14(4) :351–360.
- [Aloulou and Della Croce, 2008] Aloulou, M. A. and Della Croce, F. (2008). Complexity of single machine scheduling problems under scenario-based uncertainty. *Operations Research Letters*, 36(3) :338–342.
- [Aloulou and Portmann, 2005] Aloulou, M. A. and Portmann, M.-C. (2005). An efficient proactive-reactive scheduling approach to hedge against shop floor disturbances. In Kendall, G., Burke, E. K., Petrovic, S., and Gendreau, M., editors, *Multidisciplinary Scheduling : Theory and Applications*, pages 223–246, Boston, MA. Springer US.
- [Averbakh, 2006] Averbakh, I. (2006). The minmax regret permutation flow-shop problem with two jobs. *European Journal of Operational Research*, 169(3) :761–766.
- [Babiceanu and Chen, 2006] Babiceanu, R. F. and Chen, F. F. (2006). Development and applications of holonic manufacturing systems : A survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(1) :111–131.
- [Babiceanu et al., 2004] Babiceanu, R. F., Chen, F. F., and Sturges, R. H. (2004). Framework for the control of automated material-handling systems using the holonic manufacturing approach. *International Journal of Production Research*, 42(17) :3551–3564.
- [Babiceanu et al., 2005] Babiceanu, R. F., Chen, F. F., and Sturges, R. H. (2005). Real-time holonic scheduling of material handling operations in a dynamic manufacturing environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(4) :328 – 337. 14th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing.
- [Baglin et al., 2013] Baglin, G., Bruel, O., Kerbache, L., Nehme, J., and Van Delft, C. (2013). *Management Industriel et Logistique : Concevoir et Piloter la Supply Chain*. ECONOMICA.
- [Barbosa et al., 2012] Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., and Trentesaux, D. (2012). Nervousness in dynamic self-organized holonic multi-agent systems. In Pérez, J. B., Sánchez, M. A., Mathieu, P., Rodríguez, J. M. C., Adam, E., Ortega, A., Moreno, M. N., Navarro, E., Hirsch, B., Lopes-Cardoso, H., and Julián, V., editors, *Highlights on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, pages 9–17, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.

- [Barbosa et al., 2015] Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., and Trentesaux, D. (2015). Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems : The adacor evolution. *Computers in Industry*, 66 :99 – 111.
- [Bayraktar et al., 2007] Bayraktar, E., Jothishankar, M., Tatoglu, E., and Wu, T. (2007). Evolution of operations management : past, present and future. *Management Research News*, 30(11) :843–871.
- [Beer, 1984] Beer, S. (1984). The viable system model : Its provenance, development, methodology and pathology. *Journal of the Operational Research Society*, 35(1) :7–25.
- [Billaut et al., 2010a] Billaut, J.-C., Moukrim, A., and Sanlaville, E. (2010a). *Flexibility and Robustness in Scheduling*. ISTE-Wiley publishing, London.
- [Billaut et al., 2010b] Billaut, J.-C., Moukrim, A., and Sanlaville, E. (2010b). Introduction to Flexibility and Robustness in scheduling. In Billaut, J.-C., Moukrim, A., and Sanlaville, E., editors, *Flexibility and Robustness in Scheduling*, chapter 1, pages 15–33. ISTE.
- [Bongaerts et al., 2000] Bongaerts, L., Monostori, L., McFarlane, D., and Kádár, B. (2000). Hierarchy in distributed shop floor control. *Computers in Industry*, 43(2) :123 – 137.
- [Borangui et al., 2009] Borangui, T., Raileanu, S., Rosu, A., Parlea, M., and Anton, F. D. (2009). Management of changes in a holonic manufacturing system with dual-horizon dynamic rescheduling of production orders. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(4) :624 – 629. 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- [Borangui et al., 2015] Borangui, T., Răileanu, S., Berger, T., and Trentesaux, D. (2015). Switching mode control strategy in manufacturing execution systems. *International Journal of Production Research*, 53(7) :1950–1963.
- [Bräsel et al., 1996] Bräsel, H., Sotskov, Y., and Werner, F. (1996). Stability of a schedule minimizing mean flow time. *Mathematical and Computer Modelling*, 24(10) :39–53.
- [Brauner et al., 2016] Brauner, N., Finke, G., Shafransky, Y., and Sledneu, D. (2016). Lawler’s minmax cost algorithm : optimality conditions and uncertainty. *Journal of Scheduling*, 19(4) :401–408.
- [Bril El Haouzi, 2017] Bril El Haouzi, H. (2017). *Contribution à la conception et à l’évaluation des architectures de pilotage des systèmes de production adaptables : vers une approche anthropocentrée pour la simulation et le pilotage*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine.
- [Brissaud et al., 2013] Brissaud, D., Frein, Y., and Rocchi, V. (2013). Futurprod - les systèmes de production du futur – atelier de réflexion prospective - rapport final. Technical report, Agence Nationale de la Recherche.
- [Buyurgan and Saygin, 2008] Buyurgan, N. and Saygin, C. (2008). Application of the analytical hierarchy process for real-time scheduling and part routing in advanced manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 27(3) :101–110.
- [Cardin and Castagna, 2009] Cardin, O. and Castagna, P. (2009). Using online simulation in holonic manufacturing systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7) :1025 – 1033. Distributed Control of Production Systems.
- [Cardin et al., 2017] Cardin, O., Trentesaux, D., Thomas, A., Castagna, P., Berger, T., and Bril El-Haouzi, H. (2017). Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures : state of the art and future challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(7) :1503–1517.

- 
- [Carney et al., 2005] Carney, D., Fisher, D., and Place, P. (2005). Topics in interoperability : System-of-systems evolution. Technical report, Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute.
- [Chanas and Kasperski, 2005] Chanas, S. and Kasperski, A. (2005). Sensitivity analysis in the single-machine scheduling problem with max–min criterion. *International Transactions in Operational Research*, 12(3) :287–298.
- [Cheung et al., 2000] Cheung, H. M. E., Yeung, W. H. R., Ng, H. C. A., and Fung, S. T. R. (2000). Hscf : A holonic shop floor control framework for flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 13(2) :121–138.
- [Chirn and McFarlane, 2000] Chirn, J.-L. and McFarlane, D. C. (2000). A holonic component-based approach to reconfigurable manufacturing control architecture. In *Proceedings 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications*, pages 219–223.
- [Cwik and Jozefczyk, 2015] Cwik, M. and Jozefczyk, J. (2015). Evolutionary algorithm for min-max regret flow-shop problem. *Management and Production Engineering Review*, 6(3) :3–9.
- [Dauzères-Pérès et al., 2010] Dauzères-Pérès, S., Castagliola, P., and Lahlou, C. (2010). Service Level in Scheduling. In Billaut, J.-C., Moukrim, A., and Sanlaville, E., editors, *Flexibility and Robustness in Scheduling*, chapter 5, pages 99–121. ISTE.
- [Demongodin and Hennet, 2008] Demongodin, I. and Hennet, J.-C. (2008). A petri net model of distributed control in a holonic manufacturing execution system. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2) :15939 – 15944. 17th IFAC World Congress.
- [Derigent, 2018] Derigent, W. (2018). *Modèles de données et mécanismes de gestion de l'information distribuée dans des systèmes holoniques : Application à la matière communicante*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine.
- [Diez, 2017] Diez, L. (2017). *Apport de la maintenance prévisionnelle au paradigme de régénération industrielle*. Theses, Université de Lorraine.
- [Dilts et al., 1991] Dilts, D., Boyd, N., and Whorms, H. (1991). The evolution of control architectures for automated manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 10(1) :79 – 93.
- [Drwal and Rischke, 2016] Drwal, M. and Rischke, R. (2016). Complexity of interval minmax regret scheduling on parallel identical machines with total completion time criterion. *Operations Research Letters*, 44(3) :354–358.
- [Dubois et al., 2003] Dubois, D., Fargier, H., and Fortemps, P. (2003). Fuzzy scheduling : Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge.
- [Duffie, 1996] Duffie, N. (1996). Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9(4) :270–281.
- [Duffie et al., 1988] Duffie, N. A., Chitturi, R., and Mou, J.-I. (1988). Fault-tolerant heterarchical control of heterogeneous manufacturing system entities. *Journal of Manufacturing Systems*, 7(4) :315 – 328.
- [Duffie and Piper, 1986] Duffie, N. A. and Piper, R. S. (1986). Nonhierarchical control of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 5(2) :141.
- [Duffie and Prabhu, 1994] Duffie, N. A. and Prabhu, V. V. (1994). Real-time distributed scheduling of heterarchical manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 13(2) :94 – 107.

- [Duffie et al., 2002] Duffie, N. A., Prabhu, V. V., and Kaltjob, P. O. (2002). Closed-loop real-time cooperative decision-making dynamics in heterarchical manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 21(6) :409 – 418.
- [El Haouzi, 2008] El Haouzi, H. (2008). *Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de jsté-à-temps : Application à l'entreprise TRANE*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Feng et al., 2016] Feng, X., Zheng, F., and Xu, Y. (2016). Robust scheduling of a two-stage hybrid flow shop with uncertain interval processing times. *International Journal of Production Research*, 54(12) :3706–3717.
- [Giovannini, 2015] Giovannini, A. (2015). *A knowledge representation framework for the design and the evaluation of a product variety*. Theses, Université de Lorraine.
- [Gou et al., 1994] Gou, L., Hasegawa, T., Luh, P. B., Tamura, S., and Oblak, J. M. (1994). Holonic planning and scheduling for a robotic assembly testbed. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology*, pages 142–149.
- [Gou et al., 1998] Gou, L., Luh, P. B., and Kyoya, Y. (1998). Holonic manufacturing scheduling : architecture, cooperation mechanism, and implementation. *Computers in Industry*, 37(3) :213 – 231.
- [Gouyon, 2004] Gouyon, D. (2004). *Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Graham et al., 1979] Graham, R., Lawler, E., Lenstra, J., and Rinnooy Kan, A. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey. In *Proceedings of the Advanced Research Institute on Discrete Optimization and Systems Applications of the Systems Science Panel of NATO and of the Discrete Optimization Symposium*, number 5 in 1979, pages 287–326.
- [Größler and Pöhler, 2017] Größler, I. and Pöhler, A. (2017). Implementation of an adapted holonic production architecture. *Procedia CIRP*, 63 :138 – 143. Manufacturing Systems 4.0 – Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- [Gurevsky et al., 2012] Gurevsky, E., Battaïa, O., and Dolgui, A. (2012). Balancing of simple assembly lines under variations of task processing times. *Annals of Operations Research*, 201(1) :265–286.
- [Gurevsky et al., 2013] Gurevsky, E., Battaïa, O., and Dolgui, A. (2013). Stability measure for a generalized assembly line balancing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 161(3) :377–394.
- [Hall and Posner, 2004] Hall, N. G. and Posner, M. E. (2004). Sensitivity Analysis for Scheduling Problems. *Journal of Scheduling*, 7(1) :49–83.
- [Hatvany, 1985] Hatvany, J. (1985). Intelligence and cooperation in heterarchic manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2(2) :101 – 104.
- [Heragu et al., 2002] Heragu, S. S., Graves, R. J., Kim, B.-I., and St Onge, A. (2002). Intelligent agent based framework for manufacturing systems control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans*, 32(5) :560–573.
- [Herrera, 2011] Herrera, C. (2011). *Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Herrera et al., 2014] Herrera, C., Thomas, A., and Parada, V. (2014). A product-driven system approach for multilevel decisions in manufacturing planning and control. *Production & Manufacturing Research : An Open Access Journal*, 2(1) :756–766.

- 
- [Himmiche et al., 2017] Himmiche, S., Aubry, A., Marangé, P., and Pétin, J.-F. (2017). Modeling Flexible Workshops Scheduling problems : evaluating a Timed Automata based approach vs MILP. In *20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, accepted*, Toulouse, France.
- [IEC, 2015] IEC (2015). White paper - factory of the future. Technical report, International Electrotechnical Commission.
- [Jimenez et al., 2016] Jimenez, J.-F., Bekrar, A., Trentesaux, D., and Leitão, P. (2016). A switching mechanism framework for optimal coupling of predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures. *International Journal of Production Research*, 54(23) :7027–7042.
- [Kagermann et al., 2013] Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J. (2013). Securing the future of german manufacturing industry : Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. final report of the industrie 4.0 working group. Technical report, acatech - National Academy of Science and Engineering.
- [Kasperski, 2005] Kasperski, A. (2005). Minimizing maximal regret in the single machine sequencing problem with maximum lateness criterion. *Operations Research Letters*, 33(4) :431–436.
- [Kasperski et al., 2012] Kasperski, A., Kurpisz, A., and Zieliński, P. (2012). Approximating a two-machine flow shop scheduling under discrete scenario uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 217(1) :36–43.
- [Kasperski and Zieliński, 2008] Kasperski, A. and Zieliński, P. (2008). A 2-approximation algorithm for interval data minmax regret sequencing problems with the total flow time criterion. *Operations Research Letters*, 36(3) :343–344.
- [Klein, 2008] Klein, T. (2008). *Le kanban actif pour assurer l'interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué : Application à un industriel de l'ameublement*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Koestler, 1967] Koestler, A. (1967). *The ghost in the machine*. Arkana Books.
- [Kouvelis et al., 2000] Kouvelis, P., Daniels, R. L., and Vairaktarakis, G. (2000). Robust scheduling of a two-machine flow shop with uncertain processing times. *IIE Transactions*, 32(5) :421–432.
- [Kouvelis and Yu, 1997] Kouvelis, P. and Yu, G. (1997). *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [Kuo and Lin, 2002] Kuo, C.-Y. and Lin, F.-J. (2002). Relative robustness for single-machine scheduling problem with processing time uncertainty. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 19(5) :59–67.
- [Lebedev and Averbakh, 2006] Lebedev, V. and Averbakh, I. (2006). Complexity of minimizing the total flow time with interval data and minmax regret criterion. *Discrete Applied Mathematics*, 154(15) :2167–2177.
- [Lefebvre, 2016] Lefebvre, D. (2016). Approaching minimal time control sequences for timed Petri nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2) :1215–1221.
- [Leitão and Barbosa, 2016] Leitão, P. and Barbosa, J. (2016). Dynamic switching mechanism to support self-organization in adacor holonic control system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31) :161 – 166. 12th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 2016.
- [Leitão and Restivo, 2008] Leitão, P. and Restivo, F. (2008). A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(5) :625 – 634. BASYS '06 : Balanced Automation Systems.

- [Leitão et al., 2009] Leitão, P., Valckenaers, P., and Adam, E. (2009). *Self-Adaptation for Robustness and Cooperation in Holonic Multi-Agent Systems*, pages 267–288. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Leitão and Restivo, 2006] Leitão, P. and Restivo, F. (2006). Adacor : A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 57(2) :121 – 130.
- [Liao et al., 2017] Liao, Y., Deschamps, F., de Freitas Rocha Loures, E., and Pierin Ramos, L. F. (2017). Past, present and future of industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12) :3609–3629.
- [Lu et al., 2012] Lu, C.-C., Lin, S.-W., and Ying, K.-C. (2012). Robust scheduling on a single machine to minimize total flow time. *Computers & Operations Research*, 39(7) :1682–1691.
- [Lu et al., 2014] Lu, C.-C., Ying, K.-C., and Lin, S.-W. (2014). Robust single machine scheduling for minimizing total flow time in the presence of uncertain processing times. *Computers & Industrial Engineering*, 74 :102–110.
- [Lu, 2017] Lu, Y. (2017). Industry 4.0 : A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6 :1 – 10.
- [Mahjoub et al., 2005] Mahjoub, A., Rapine, C., and Sanlaville, E. (2005). Analyses de sensibilité pour une et m machines. In Billaut, J.-C., Moukrim, A., and Sanlaville, E., editors, *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*, chapter 4, pages 69–93. Lavoisier.
- [Manceaux, 2015] Manceaux, A. (2015). *Contribution au rééquilibrage dynamique des lignes d’assemblage : modélisation, résolutions et applications*. Theses, Université de Lorraine.
- [Marangé et al., 2016] Marangé, P., Aubry, A., and Pétrin, J.-F. (2016). Ordonnancement d’ateliers à partir de patrons de modélisation basés sur des automates communicants. In *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation*, Montréal, Canada.
- [Marangé et al., 2009] Marangé, P., Gouyon, D., Pétrin, J.-F., and Riera, B. (2009). Verification of functional constraints for safe product driven control. In *2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete System, DCDS’09*, pages 315–320, Bari, Italy.
- [Marangé et al., 2011] Marangé, P., Pétrin, J.-F., Manceaux, A., and Gouyon, D. (2011). Contribution à la reconfiguration des systèmes de production : ordonnancement par recherche d’atteignabilité. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 45(1/3) :45–60.
- [Mastrolilli et al., 2013] Mastrolilli, M., Mutsanas, N., and Svensson, O. (2013). Single machine scheduling with scenarios. *Theoretical Computer Science*, 477 :57–66.
- [McFarlane, 2002] McFarlane, D. (2002). Auto id based control systems-an overview. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 3, pages 6 pp. vol.3–.
- [McFarlane et al., 2002] McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J. L., Wong, C. Y., and Ashton, K. (2002). The intelligent product in manufacturing control and management. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1) :49 – 54. 15th IFAC World Congress.
- [McKay, 2011] McKay, K. N. (2011). *The Historical Foundations of Manufacturing Planning and Control Systems*, pages 21–31. Springer US, Boston, MA.
- [Meissner et al., 2017] Meissner, H., Ilse, R., and Aurich, J. C. (2017). Analysis of control architectures in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62 :165 – 169. 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME ’16. [Edited by : Roberto Teti, Manager Editor : Dorian M. D’Addona].
- [Meyer et al., 2009] Meyer, G. G., Främling, K., and Holmström, J. (2009). Intelligent products : A survey. *Computers in Industry*, 60(3) :137 – 148. INTELLIGENT PRODUCTS.

- 
- [Mezgebe et al., 2017] Mezgebe, T. T., Bril El Haouzi, H., Demesure, G., Thomas, A., and Pannequin, R. (2017). A negotiation scenario using an agent-based modeling approach to deal with dynamic scheduling. In *7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing, SOHOMA '17*, Nantes, France.
- [Monostori, 2014] Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems : Roots, expectations and r&d challenges. *Procedia CIRP*, 17 :9 – 13. Variety Management in Manufacturing.
- [Monostori et al., 2016] Monostori, L., Kádár, T., Bauerhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., and Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2) :621–641.
- [Pach et al., 2014] Pach, C., Berger, T., Bonte, T., and Trentesaux, D. (2014). Orca-fms : a dynamic architecture for the optimized and reactive control of flexible manufacturing scheduling. *Computers in Industry*, 65(4) :706 – 720.
- [Panek et al., 2006] Panek, S., Engell, S., and Stursberg, O. (2006). Scheduling and planning with timed automata. *Computer Aided Chemical Engineering*, 21(2006) :1973–1978.
- [Pannequin, 2007] Pannequin, R. (2007). *Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Park and Choi, 2015] Park, M.-J. and Choi, B.-C. (2015). Min-Max Regret Version of an m-Machine Ordered Flow Shop with Uncertain Processing Times. *Management Science & Financial Engineering*, 21(1) :1–9.
- [Penz et al., 2001] Penz, B., Rapine, C., and Trystram, D. (2001). Sensitivity analysis of scheduling algorithms. *European Journal of Operational Research*, 134(3) :606–615.
- [Pereira, 2016] Pereira, J. (2016). The robust (minmax regret) single machine scheduling with interval processing times and total weighted completion time objective. *Computers & Operations Research*, 66 :141–152.
- [Pujo et al., 2009] Pujo, P., Broissin, N., and Ounnar, F. (2009). Prosis : An isoarchic structure for hms control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7) :1034 – 1045. Distributed Control of Production Systems.
- [Rossi et al., 2016] Rossi, A., Gurevsky, E., Battaïa, O., and Dolgui, A. (2016). Maximizing the robustness for simple assembly lines with fixed cycle time and limited number of workstations. *Discrete Applied Mathematics*, 208 :123–136.
- [Roy, 2002] Roy, B. (2002). Robustesse de quoi et vis-à-vis de quoi mais aussi robustesse pourquoi en aide à la décision. *Bulletin du Groupe de Travail Européen Aide Multicritère à la Décision*, 3(6).
- [Roy, 2010] Roy, B. (2010). Robustness in Operations Research and Decision Aiding. In Billaut, J.-C., Moukrim, A., and Sanlaville, E., editors, *Flexibility and Robustness in Scheduling*, chapter 2, pages 35–51. ISTE.
- [Sallez et al., 2009] Sallez, Y., Berger, T., and Trentesaux, D. (2009). A stigmergic approach for dynamic routing of active products in fms. *Computers in Industry*, 60(3) :204 – 216.
- [Sharir, 1981] Sharir, M. (1981). A strong-connectivity algorithm and its applications in data flow analysis. *Computers & Mathematics with Applications*, 7(1) :67–72.
- [Shen et al., 2005] Shen, W., Lang, S. Y. T., and Wang, L. (2005). ishopfloor : an internet-enabled agent-based intelligent shop floor. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 35(3) :371–381.

- [Siepak and Józefczyk, 2014] Siepak, M. and Józefczyk, J. (2014). Solution algorithms for unrelated machines minmax regret scheduling problem with interval processing times and the total flow time criterion. *Annals of Operations Research*, 222(1) :517–533.
- [Silva and Ramos, 1999] Silva, N. and Ramos, C. (1999). Infrastructures and scheduling method for holonic manufacturing systems. In *Assembly and Task Planning, 1999. (ISATP '99) Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on*, pages 442–447.
- [Sotskov, 2010] Sotskov, Y. (2010). Minimizing Total Weighted Completion Time with Uncertain Data : A Stability Approach. *Automation and Remote Control*, 71(10) :26–49.
- [Sotskov et al., 2009] Sotskov, Y., Egorova, N., and Lai, T.-C. (2009). Minimizing total weighted flow time of a set of jobs with interval processing times. *Mathematical and Computer Modelling*, 50(3-4) :556–573.
- [Sotskov et al., 1995] Sotskov, Y., Leontev, V., and Gordeev, E. (1995). Some concepts of stability analysis in combinatorial optimization. *Discrete Applied Mathematics*, 58(2) :169–190.
- [Sotskov et al., 2006] Sotskov, Y. N., Dolgui, A., and Portmann, M.-C. (2006). Stability analysis of an optimal balance for an assembly line with fixed cycle time. *European Journal of Operational Research*, 168(3) :783–797.
- [Sotskov et al., 2005] Sotskov, Y. N., Dolgui, A., Sotskova, N., and Werner, F. (2005). *Stability of Optimal Line Balance with Given Station Set*, pages 135–149. Springer US, Boston, MA.
- [Sotskov et al., 2013] Sotskov, Y. N., Lai, T.-C., and Werner, F. (2013). The Stability Box for Minimizing Total Weighted Flow Time under Uncertain Data. In Pina, N., Kacprzyk, J., and Filipe, J., editors, *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications : International Conference, SIMULTECH 2011 Noordwijkerhout, The Netherlands, July 29-31, 2011 Revised Selected Papers*, pages 39–55. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Sotskov et al., 1998] Sotskov, Y. N., Wagelmans, A. P., and Werner, F. (1998). On the calculation of the stability radius of an optimal or an approximate schedule. *Annals of Operations Research*, 83(0) :213–252.
- [Sousa and Ramos, 1999] Sousa, P. and Ramos, C. (1999). A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems. *Computers in Industry*, 38(2) :103 – 113.
- [Sugimura et al., 1998] Sugimura, N., Moriwaki, T., and Hozumi, K. (1998). *A study on holonic manufacturing systems and its application to real time scheduling problems*, pages 411–422. Springer US, Boston, MA.
- [Szejka, 2016] Szejka, A. L. (2016). *Contribution to interoperable products design and manufacturing information : application to plastic injection products manufacturing*. Theses, Université de Lorraine. Thèse en cotutelle de l’Université de Lorraine et de PUC Parana (Brésil).
- [Tadayon and Smith, 2015] Tadayon, B. and Smith, J. C. (2015). Algorithms and Complexity Analysis for Robust Single-Machine Scheduling Problems. *Journal of Scheduling*, 18(6) :575–592.
- [Tharumarajah, 2003] Tharumarajah, A. (2003). *From Fractals and Bionics to Holonics*, pages 11–30. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Thomas et al., 2009] Thomas, A., El Haouzi, H., Klein, T., Belmokhtar, S., and Herrera, C. (2009). Architecture de systèmes contrôlés par la produit pour un environnement de juste à temps. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 43(4-5) :513–535.
- [Thomas et al., 2012] Thomas, A., Trentesaux, D., and Valckenaers, P. (2012). Intelligent distributed production control. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6) :2507–2512.

- 
- [Thomas, 2014] Thomas, P. (2014). *Exploitation de données pour la modélisation. De l'évaluation des systèmes de transport aux chaînes logistiques*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine.
- [Trentesaux, 2002] Trentesaux, D. (2002). *Pilotage hétérarchique des systèmes de production*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- [Trentesaux, 2007] Trentesaux, D. (2007). Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles? *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 41(9-10) :1165–1202.
- [Trentesaux, 2009] Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7) :971 – 978. Distributed Control of Production Systems.
- [Trentesaux et al., 2000] Trentesaux, D., Pesin, P., and Tahon, C. (2000). Distributed artificial intelligence for fms scheduling, control and design support. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(6) :573–589.
- [Valckenaers et al., 1994] Valckenaers, P., Bonneville, F., Van Brussel, H., Bongaerts, L., and Wyns, J. (1994). Results of the holonic control system benchmark at ku leuven. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology*, pages 128–133.
- [Valckenaers et al., 1995] Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bongaerts, L., and Bonneville, F. (1995). Programming, scheduling, and control of flexible assembly systems. *Computers in Industry*, 26(3) :209 – 218. Computer Integrated Manufacturing and Industrial Automation.
- [Valckenaers et al., 1997] Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bongaerts, L., and Wyns, J. (1997). Holonic manufacturing systems. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 4(3) :191–201.
- [Valckenaers et al., 2007] Valckenaers, P., Van Brussel, H., Verstraete, P., Saint Germain, B., and Hadeli (2007). Schedule execution in autonomic manufacturing execution systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 26(2) :75 – 84. Distributed Control of Manufacturing Systems.
- [Valckenaers et al., 1998] Valckenaers, P., Van Brussel, H., Wyns, J., Bongaerts, L., and Peeters, P. (1998). Designing holonic manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14(5) :455 – 464.
- [Van Brussel et al., 1998] Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., and Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems : Prosa. *Computers in Industry*, 37(3) :255 – 274.
- [Van Hermelen et al., 2008] Van Hermelen, F., Lifshitz, V., and Proter, B. (2008). *Handbook of Knowledge Representation. Vol. 1*. Elsevier.
- [Wang, 2014] Wang, H. (2014). Minmax regret 1-facility location on uncertain path networks. *European Journal of Operational Research*, 239(3) :636–643.
- [Xu et al., 2013] Xu, X., Cui, W., Lin, J., and Qian, Y. (2013). Robust makespan minimisation in identical parallel machine scheduling problem with interval data. *International Journal of Production Research*, 51(12) :3532–3548.
- [Xu et al., 2014] Xu, X., Lin, J., and Cui, W. (2014). Hedge against total flow time uncertainty of the uniform parallel machine scheduling problem with interval data. *International Journal of Production Research*, 52(19) :5611–5625.
- [Yahia, 2011] Yahia, E. (2011). *Contribution à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprises : Application aux systèmes d'information de pilotage de la production*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.

- [Yin et al., 2017] Yin, Y., Stecke, K. E., and Li, D. (2017). The evolution of production systems from industry 2.0 through industry 4.0. *International Journal of Production Research*.
- [Zambrano Rey et al., 2014] Zambrano Rey, G., Bonte, T., Prabhu, V., and Trentesaux, D. (2014). Reducing myopic behavior in fms control : A semi-heterarchical simulation–optimization approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46 :53 – 75. Simulation-Optimization of Complex Systems : Methods and Applications.
- [Zambrano Rey et al., 2013] Zambrano Rey, G., Pach, C., Aissani, N., Bekrar, A., Berger, T., and Trentesaux, D. (2013). The control of myopic behavior in semi-heterarchical production systems : A holonic framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(2) :800 – 817.
- [Zhang and Norrie, 1999] Zhang, X. and Norrie, D. H. (1999). Dynamic reconfiguration of holonic lower level control. In *Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, 1999. IPMM '99. Proceedings of the Second International Conference on*, volume 2, pages 887–893 vol.2.
- [Zhong et al., 2017] Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., and Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0 : A review. *Engineering*, 3(5) :616 – 630.
- [Zimmermann et al., 2017] Zimmermann, E., Bril El Haouzi, H., Thomas, P., Thomas, A., and Noyel, M. (2017). A hybrid manufacturing control based on smart lots in a disrupted industrial context. In *20th IFAC World Congress, IFAC 2017*, Toulouse, France.

## Annexe A

# Contributions à l'interopérabilité dans les systèmes industriels : modélisation de la connaissance et des informations liées au produit

L'objectif de cette partie est de présenter mes contributions aux problèmes d'interopérabilité dans les systèmes industriels concernant les produits et les informations liées.

La figure A.1 rappelle les problèmes d'interopérabilité lorsqu'on s'intéresse à un système de production. Dans nos travaux, nous avons étudié les problèmes d'interopérabilité sur 2 phases du cycle de vie du produit : la conception et la fabrication.

Lors de la conception du produit, le concepteur doit traduire le besoin du client en un modèle de produit. Cela représente un premier risque de non-interopérabilité. Ce problème devient encore plus complexe dans un contexte de personnalisation de masse où le besoin du client ne s'exprime plus d'une seule voix mais de plusieurs : on est donc en présence en quelque sorte d'une "famille de besoins". Ce problème a particulièrement été abordé dans la thèse d'Antonio Giovannini [Th2] dont l'enjeu comme on l'a déjà vu dans le chapitre 2 de ce document était que le processus de conception aboutisse à une famille de produits "raisonnable" malgré la variabilité de besoins en entrée. Au préalable il était nécessaire de bien comprendre cette famille de besoins et la connaissance de l'entreprise comme nous le verrons dans la section A.1.

De plus la conception de produits complexes fait intervenir souvent des corps de métier très différents faisant appel à des connaissances propres telles que l'automatique, la mécanique, l'électronique, l'informatique, l'ingénierie système, . . . . Ces domaines d'ingénierie doivent travailler ensemble et échanger de l'information sur le produit : cela conduit à un deuxième risque de non-interopérabilité. Ce problème a été abordé dans la thèse d'Anderson Szejka [Th3]. En particulier il a proposé un cadre d'interopération pour la conception et la fabrication de produits. Sa proposition s'intègre dans les travaux sur l'interopération dirigée par les ontologies puisque son cadre se base sur un ensemble d'ontologies clés et de mécanismes afin de faciliter l'échange d'information entre domaines de connaissance hétérogènes. Cette contribution sera détaillée dans la section A.2.

L'informatisation du pilotage peut reposer sur des systèmes d'information différents. Par exemple, la planification peut être supportée par un ERP alors que l'ordonnancement d'atelier et le suivi vont être mis en œuvre dans un MES. Ces deux systèmes d'informations font appel à des informations agrégées et stockées de manière hétérogène et relativement à une mission par-

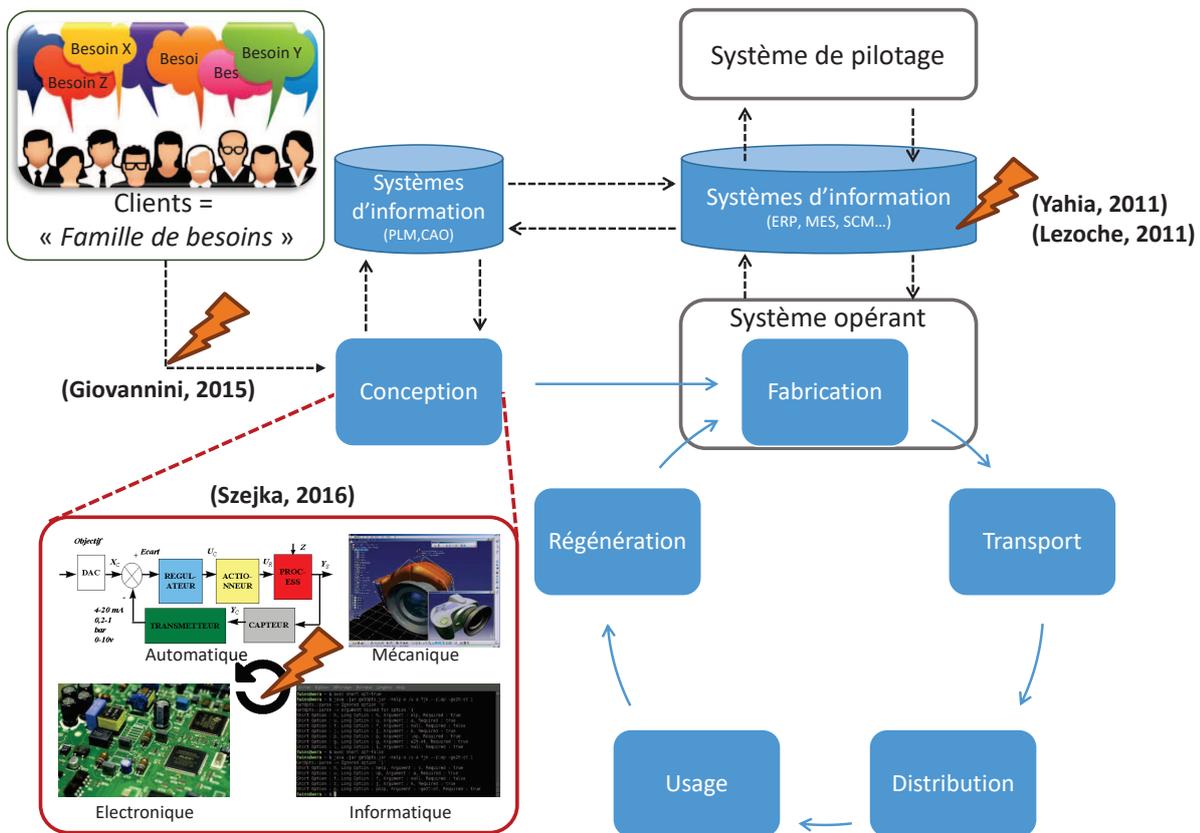


FIGURE A.1 – Contribution de nos travaux de recherche aux problèmes d'interopérabilité du point de vue de la modélisation de la connaissance et des informations liées aux produits

ticulière. Dans ce cas-là, l'ERP et le MES doivent collaborer, mettant en évidence un risque de non-interopérabilité entre systèmes d'information. On parle d'interopérabilité Business to Manufacturing (B2M) entre un ERP et un MES. Ce problème a été abordé dans la thèse d'Esma Yahia [Th3] et dans le Post-Doc de Mario Lezoche [PD1]. L'objectif particulier était, dans le cadre d'un scénario d'échange d'informations entre deux systèmes d'information, d'évaluer l'interopérabilité sémantique et d'identifier l'éventuel gap sémantique résultant. Nous avons vu dans le chapitre 2 de ce document comment la question de l'évaluation a été traitée. Cependant, avant de pouvoir évaluer le niveau d'interopérabilité, il a fallu proposer un processus de modélisation de la connaissance et des informations qui sont cachées dans les bases de données sur lesquelles s'appuient souvent les Systèmes d'information. Ce processus sera détaillé dans la section A.3.

### A.1 Thèse de Antonio Giovannini (2012-2015) : A knowledge representation framework for the design and the evaluation of product variety [Giovannini, 2015]

Comme présenté dans le chapitre 2, cette thèse a été le fruit d'une collaboration entre l'entreprise Trane et le laboratoire CRAN dans le cadre d'une bourse CIFRE. L'entreprise TRANE fabrique et commercialise des appareils de Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC). Sa

production est caractérisée par ce qui peut être qualifié de personnalisation de masse. Cela signifie qu'elle produit, en petit nombre, des produits très personnalisés pour de très nombreux clients (le gros volume est donc inhérent au grand nombre de clients). Idéalement, la personnalisation de masse a pour objectif de satisfaire chaque besoin individuel du client avec la même efficacité qu'une entreprise qui fait de la production de masse. Partant des problèmes industriels autour de la personnalisation de masse à la TRANE, Antonio Giovannini a notamment traité deux questions de recherche :

- (RQ1) Comment modéliser la variété afin de supporter le processus de conception d'une famille de produits en prenant en compte la connaissance associée aux profils clients, aux familles de produits et au processus de fabrication ?
- (RQ2) Comment réutiliser cette connaissance pour concevoir une famille de produits robuste (ici qui minimise le coût de variété malgré la variété des besoins client) ?

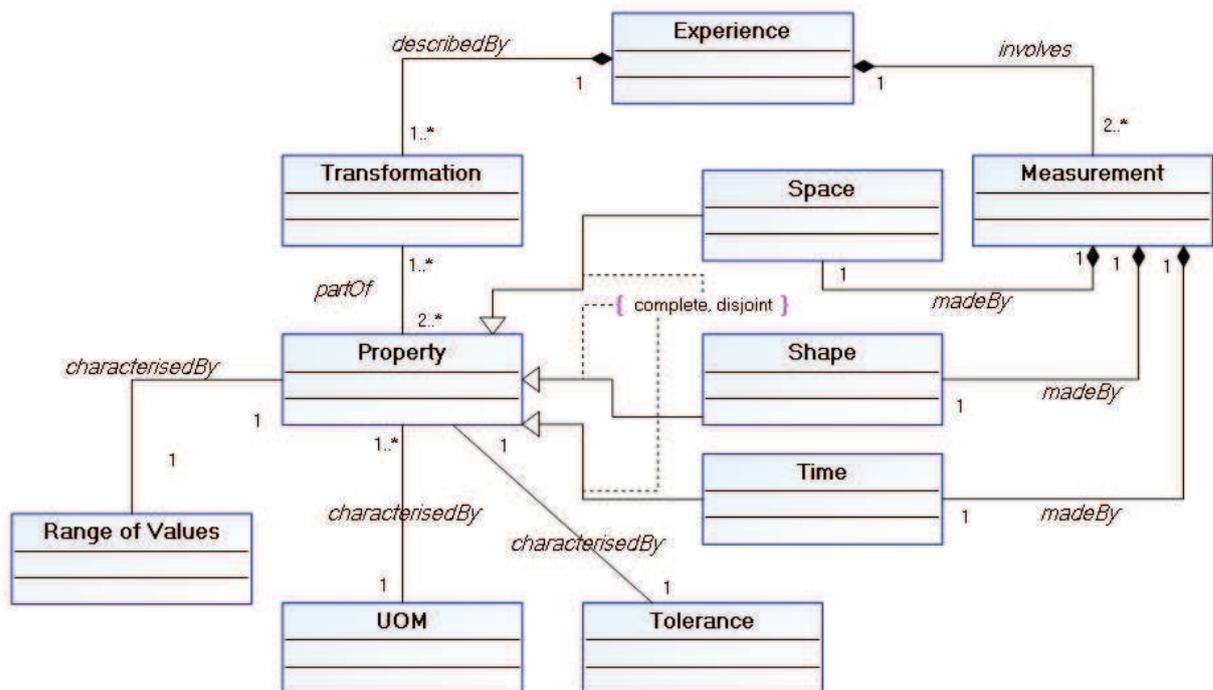


FIGURE A.2 – Modèle conceptuel du cadre de modélisation de la connaissance [Giovannini, 2015]

La question (RQ2) a été présentée dans le chapitre 2 de ce document. Cependant, Antonio Giovannini a d'abord montré dans sa thèse que la question (RQ1) renvoyait à la question de la représentation non ambiguë de la connaissance (point de vue client, point de vue concepteur) afin de faciliter la conception d'une famille de produits. Il a d'abord discuté des deux écoles de pensée existantes pour représenter la connaissance : l'école logiciste et l'école antilogiciste. Le logicisme part du principe que la connaissance est mieux représentée en utilisant des logiques formelles [Van Hermelen et al., 2008]. Cependant, dans sa thèse, Antonio Giovannini argumente que la faiblesse majeure de l'approche logiciste réside dans son utilisation du raisonnement abstrait qui peut conduire à de l'ambiguïté dès lors qu'une interprétation des concepts abstraits par des humains sera nécessaire. De ce fait Antonio Giovannini propose d'utiliser une approche anti-logiciste pour répondre à (RQ1). Le principe est de modéliser la connaissance comme des expériences basées sur

des mesures du monde réel (et vérifiant ainsi les lois de ce monde réel). Ces mesures concernent le classique triptyque Espace/temps/forme.

Basée sur ce principe, une des premières contributions de la thèse d'Antonio Giovannini est un cadre de modélisation de la connaissance basé sur le modèle conceptuel de la figure A.2. Ce cadre de modélisation a été présenté dans [R5] [Giovannini et al., 2015] et appliqué avec réussite au cas d'étude de la Trane. Ensuite Antonio Giovannini montre comment ce cadre de modélisation permet de faire le lien entre les connaissances côté clients (les profils clients) et les connaissances côté entreprise (les familles de produits). Il utilise notamment le logiciel de CAO CATIA afin d'implanter sa solution. Grâce à cette contribution qui permet de régler le problème de l'interopérabilité entre les connaissances client/conception/fabrication, il devient possible de réfléchir à la mission du processus de conception : concevoir la meilleure famille de produits malgré la variabilité côté client. Cette question a été abordée dans le chapitre 2 de ce document en montrant notamment comment elle avait pu être traitée comme un problème d'optimisation soumis à de la variabilité.

## **A.2 Thèse de Anderson Szejka (2013-2016) : Contribution to interoperable design and manufacturing information : application to plastic injection products manufacturing [Szejka, 2016]**

La thèse d'Anderson Szejka aborde le problème de la conception de systèmes complexes qui fait appel à de multiples domaines métier tels que l'automatique, la mécanique, l'électronique, l'informatique . . . . De plus la conception d'un produit doit prendre en compte l'ensemble des phases de cycle de vie du produit car chacune d'elles impose des exigences sur le produit (utilisation de matériaux recyclables pour le démantèlement par exemple). La figure A.3 permet d'identifier les problèmes génériques d'interopérabilité qui en découlent. Cette figure comporte 3 axes. Le premier axe concerne les phases de vie du produit, le deuxième axe concerne les domaines expert d'ingénierie et en fin le troisième axe concerne les exigences produit.

On peut en déduire 4 problèmes d'interopérabilité génériques. Trois de ces problèmes sont liés à un seul axe :

- Axe "Domaines métier" : Hétérogénéité des informations entre domaines métier (problème A sur la figure)
- Axe "Phases de vie" : Conflits de buts entre phases de vie (problème B sur la figure)
- Axe "Exigences produit" : Problèmes de complétude, cohérence, unicité, univocité entre exigences. (problème C sur la figure)

Le quatrième problème concerne les relations entre les 3 premiers problèmes d'interopérabilité et la consistance globale de l'information selon les 3 axes définis sur la figure.

Après avoir produit un état de l'art conséquent pour évaluer les travaux autour de ces problèmes (présenté dans (R2) [Szejka et al., 2017a]), Anderson Szejka en déduit qu'il est nécessaire de proposer une approche qui permet : i) le partage de l'information entre plusieurs domaines métier de manière non ambiguë, ii) l'analyse des influences entre les exigences relatives à plusieurs phases du cycle de vie du produit, et iii) la traçabilité des exigences, l'interopérabilité entre les exigences et l'analyse des impacts en terme d'inconsistance entre les exigences.

L'approche proposée par Anderson Szejka dans sa thèse repose sur un cadre conceptuel présenté dans la figure A.4. Ce cadre repose tout d'abord sur 3 vues (views) :

- Reference View : cette vue rassemble et structure les concepts pour représenter formelle-

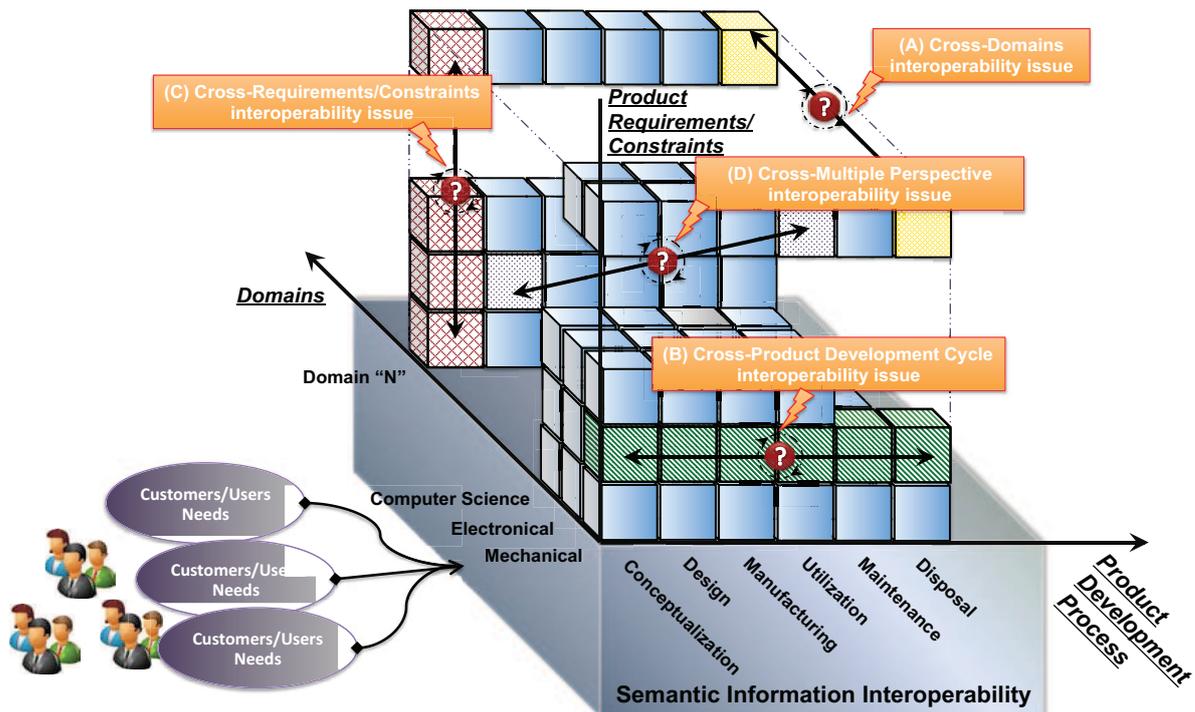


FIGURE A.3 – Problèmes génériques d’interopérabilité pour la conception de produits [Szejka, 2016]

ment, de manière élémentaire, la taxonomie de conception et de fabrication selon différents domaines métier. Elle est constituée des différentes ontologies haut niveau relatives aux métiers qui sont modélisées selon des outils de logique mathématique (OWL).

- Application Domain View : dans cette vue, les concepts de la vue de référence sont spécialisés dans plusieurs ontologies produit, en fonction des données spécifiques sur la conception ou la fabrication d’un produit donné.
- Semantic Reconciliation View : cette vue définit les règles afin de garantir le partage, la conversion et la traduction des informations entre les domaines et les phases de conception.

Le dernier élément de ce cadre conceptuel est le “système interopérable de conception et de fabrication d’un produit”. Il est responsable de la gestion des échanges d’information entre les phases de conception et entre les domaines.

Ce cadre général est implanté dans un prototype fonctionnel (basé sur Protégé pour modéliser les ontologies, solidworks pour les modèles de conception, et enfin Java et Jena pour l’implantation des règles de réconciliation). Ce cadre est enfin appliqué avec succès à un cas particulier caractérisé par des produits (symétriques par rotation autour d’un axe) qui doivent être fabriqués par moulage (injection plastique).

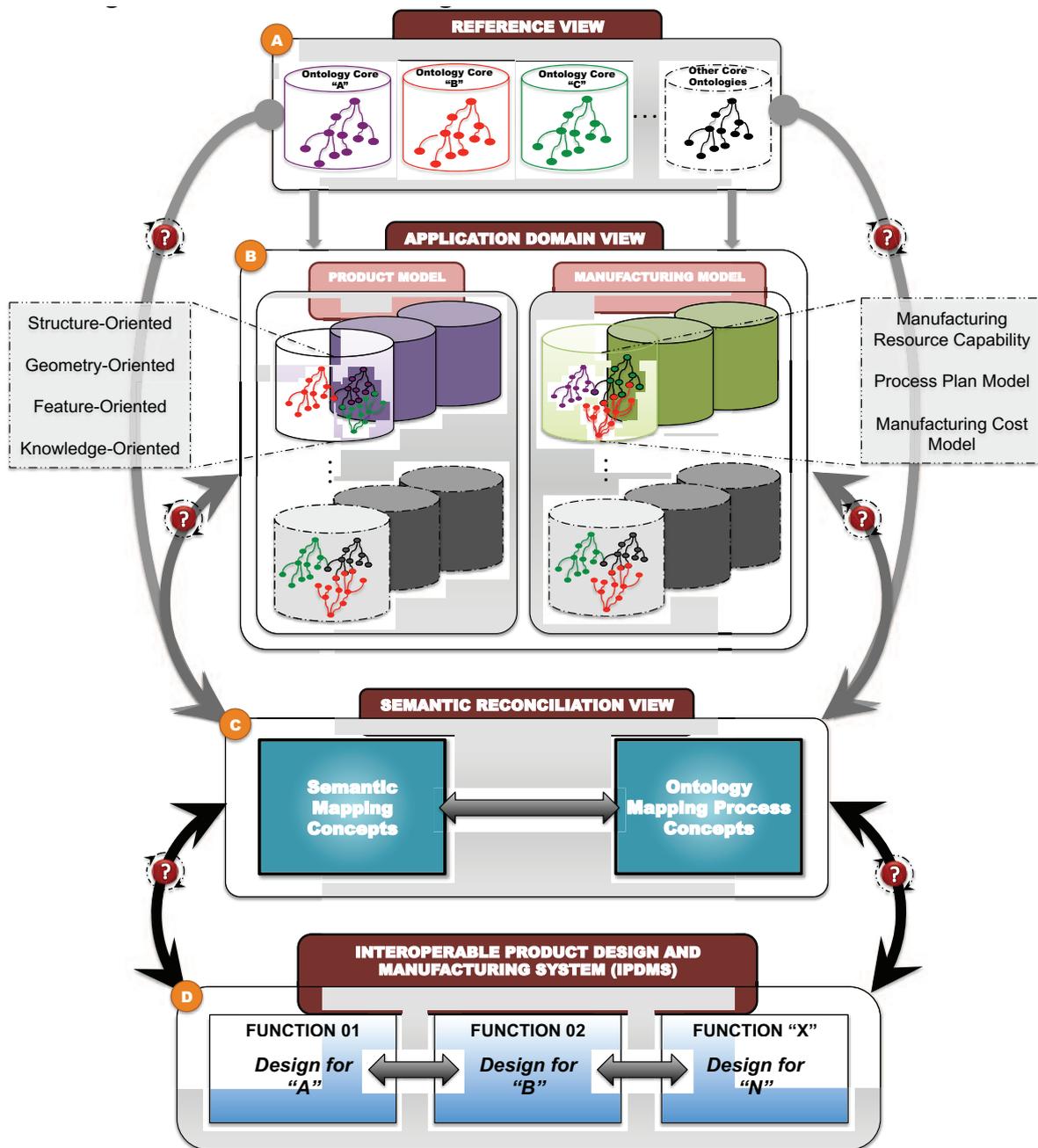


FIGURE A.4 – Cadre Conceptuel pour l'interopérabilité dans la conception de produits complexes [Szejka, 2016]

### A.3 Thèse de Esma Yahia (2008-2011) : Contribution à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprise - Application aux systèmes d'information de pilotage de la production [Yahia, 2011]

Les travaux de la thèse d'Esma Yahia s'intéressent à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprises. Cette question adresse notamment un besoin industriel consistant à pouvoir évaluer, si la mission des systèmes d'information, mis en place dans une entreprise (qui sont de plus en plus nombreux) et devant collaborer, n'est pas remise en cause par des problèmes de non-interopération. Nous avons proposé d'étudier l'interopérabilité des systèmes d'information d'entreprises à travers leur modèle conceptuel. En particulier, Esma Yahia a mis en évidence 4 problématiques scientifiques auxquelles elle devait répondre :

- (Prob1) Comment disposer d'un modèle conceptuel statique qui contient toute la sémantique métier du système ? En effet, l'interopérabilité sémantique des systèmes d'information a été étudiée à travers leur modèle conceptuel. A minima, ces modèles doivent contenir la sémantique métier des systèmes étudiés.
- (Prob2) Comment définir, formaliser et extraire la sémantique métier minimale et nécessaire à un système d'information pour opérer ? En effet, on doit être capable de distinguer, dans la sémantique métier véhiculée par le modèle conceptuel d'un système donné et les données associées, quelles sont les données qui doivent nécessairement être renseignées dans l'application pour opérer.
- (Prob3) Comment définir, formaliser et construire les relations sémantiques entre les modèles conceptuels statiques des systèmes étudiés ?
- (Prob4) À partir des réponses aux questions précédentes, comment évaluer le niveau d'interopérabilité entre 2 systèmes d'information ?

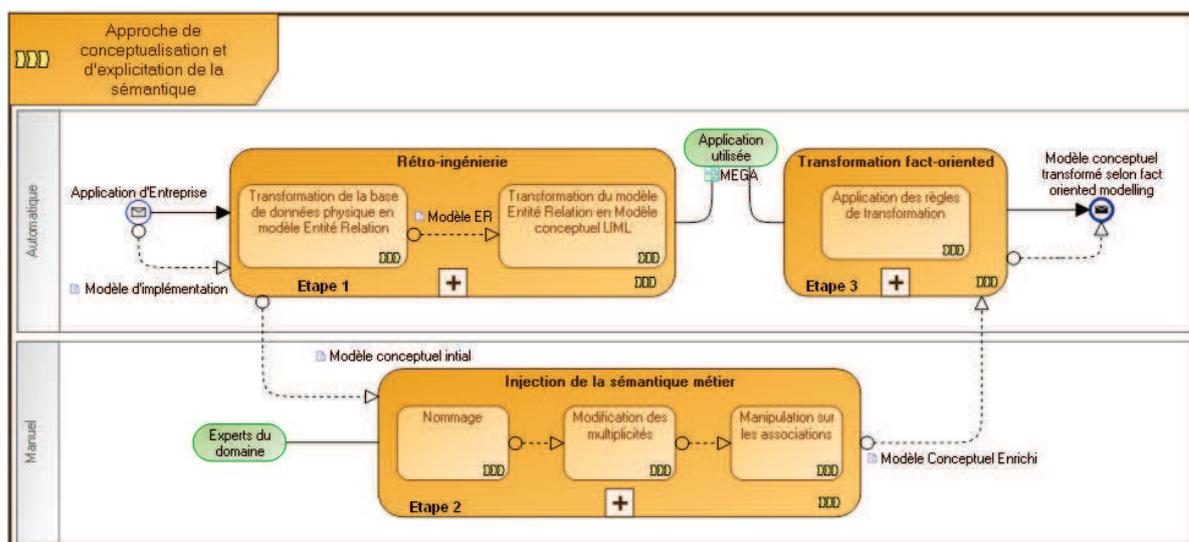


FIGURE A.5 – Processus de conceptualisation et d'explicitation de la sémantique dans les systèmes d'information [Yahia, 2011]

La problématique (Prob1) a été traitée en proposant un processus outillé qui à partir de la base de données sur laquelle est construite le système d'information permet de construire un modèle conceptuel du système d'information qui explicite la sémantique de celui-ci. Ce processus est le fruit d'une collaboration avec Mario Lezoche qui était alors post-doctorant [PD1] et que nous avons supervisé. Ce processus est donné dans la figure A.5 et détaillé dans les publications (R8,R11) [Lezoche et al., 2012b, Lezoche et al., 2012a].

La première activité de ce processus consiste à, en partant du modèle de données de la base de données du système d'information, faire la rétro-ingénierie de ce modèle pour obtenir un modèle conceptuel (sous forme de diagramme de classes UML, par exemple) que nous pouvons qualifier de "brut". Les méthodes de rétro-ingénierie sont implantées dans beaucoup de logiciel du commerce tels que HOPEX de telle sorte que cette activité peut être entièrement automatisée.

Le modèle brut obtenu peut être "pollué" par des artefacts liés à la base de données dont il est issu, à cause de choix de programmation ou de nommage des tables et attributs discutables par exemple. Dans un ERP comme SageX3 par exemple, les concepteurs ont décidé de coder le nom des tables et des attributs de telle sorte que leur interprétation directe est impossible. Le nom d'usage devient pertinent dans la couche logicielle de l'outil. De la même façon, les liens entre les tables sont "cachés" dans la couche logicielle (il n'y a pas de clés étrangères dans la base de données). Il est donc nécessaire de définir une activité qui permette d'enrichir le modèle brut obtenu après la 1ère étape afin d'y ajouter la sémantique métier : par renommage, par modification de multiplicités, par ajout d'association. L'hypothèse était que seul un expert métier du système d'information et de l'usage de ce système d'information par l'entreprise pouvait accomplir cette tâche. Cette deuxième activité permet d'obtenir un modèle conceptuel enrichi.

La dernière étape de ce modèle consistait à normaliser le modèle obtenu pour éviter les artefacts liés aux pratiques du modélisateur. Des règles de transformation automatique avaient été définies afin de garantir que chaque modèle obtenu de systèmes d'information respectent les mêmes règles et apparaissent avec un même niveau de granularité.

Le processus global présenté ici a donc permis d'obtenir un modèle conceptuel enrichi et normalisé d'un système d'information.

La problématique (Prob2) a été résolue par la définition et la recherche des blocs sémantiques présentées dans le chapitre 2 de ce mémoire en l'appliquant au modèle conceptuel obtenu par le processus présenté précédemment.

Afin de traiter la problématique (Prob3), Esma Yahia a proposé une approche ensembliste permettant de formaliser des relations sémantiques comme des liens d'inclusion sémantique entre des concepts de deux Systèmes d'information différents. La construction automatique de ces relations sémantiques restent cependant un problème ouvert.

À partir des blocs sémantiques obtenus et des relations sémantiques, il devient possible d'évaluer le niveau d'interopérabilité entre deux systèmes d'information comme nous l'avons montré dans le chapitre 2 de ce mémoire. En effet, ce niveau d'interopérabilité peut ensuite être vu comme un critère à maximiser malgré les risques d'information manquante (voir chapitre 2).

L'ensemble des contributions de la thèse d'Esma Yahia a été implanté dans un prototype fonctionnel basé sur MEGA Suite.



## Résumé

Ce mémoire présente mes activités de recherche et d'enseignement au laboratoire CRAN et à la Faculté des Sciences et Technologies entre 2008 et 2017. Celles-ci s'inscrivent globalement dans le pilotage des systèmes de production. L'introduction générale rappelle ce que sont les systèmes de production et leur évolution jusqu'à l'industrie 4.0. Nous montrons notamment que dans ce contexte, les systèmes de pilotage associés sont devenus un enjeu majeur et leur optimisation est devenue compliquée mais nécessaire. De la même façon, l'« information » a pris une place de plus en plus importante dans ces systèmes nécessitant l'introduction des systèmes d'information afin de gérer et traiter ces informations. La mise en œuvre du système de pilotage implique notamment deux problématiques complémentaires que nous avons étudiées : i) l'interopérabilité entre les systèmes d'information et les personnes qui manipulent les informations liées à la production et ii) la prise en compte des perturbations pouvant pervertir ces informations dans la réalisation du pilotage. Le corps principal du document présente une démarche globale de prise en compte des perturbations en optimisation puis décline cette démarche sur des problèmes d'interopérabilité que nous avons traités dans nos travaux. Nous présentons enfin dans un dernier chapitre, un projet de recherche et d'enseignement dont l'objectif est la définition et la mise en œuvre d'un système de pilotage pour les systèmes de production holoniques en contexte perturbé.

**Mots-clés:** Systèmes de Production Holoniques, Perturbations, Pilotage, Robustesse

## Abstract

This document presents our teaching and research activities with the laboratory CRAN and the “Faculté des Sciences et Technologies” in Nancy between 2008 and 2017. These activities concern mainly the control of production systems. The general introduction of the document gives an overview of production systems and their evolution from the first industrial revolution to Industry 4.0. Moreover, we demonstrate how associated control system became critical and how their optimisation became complicated but necessary. In this context, “Information” took a central place, leading to the introduction of Information System for managing and treating these information. Implementing Enterprise Information Systems highlights two challenges : i) interoperability concerning information in Information Systems and with the people using it, ii) taking into account the perturbations concerning these information for controlling the production. The main part of the document presents a general approach for taking into account perturbations in optimisation problems and instantiates this approach on some interoperability problems that we study in our research. The last part of the document presents our teaching and research project for the next future. This project will deal with the definition and implementing of a control system for holonic manufacturing systems subject to perturbations in the context of Industry 4.0.

**Keywords:** Holonic Manufacturing Systems, Control System, Perturbations, Robustness