



HAL
open science

De l'estimation d'état de systèmes à événements discrets au jumeau numérique, développement d'outils d'aide à la décision

Sébastien Henry

► To cite this version:

Sébastien Henry. De l'estimation d'état de systèmes à événements discrets au jumeau numérique, développement d'outils d'aide à la décision. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université Claude Beranrd Lyon 1, 2024. <tel-04887723>

HAL Id: tel-04887723

<https://hal.science/tel-04887723v1>

Submitted on 15 Jan 2025

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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

De l'estimation d'état de systèmes à événements discrets au jumeau numérique, développement d'outils d'aide à la décision

Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Claude Bernard Lyon 1
préparée au laboratoire DISP

soutenue publiquement le 23 février 2024

SÉBASTIEN HENRY

Composition du Jury

M. Pascal BERRUET Professeur des Universités, Université de Bretagne Sud	Président
M. Benoit IUNG Professeur des Universités, Université de Lorraine	Rapporteur
M. Samir LAMOURI Professeur des Universités, ENSAM, Arts et métiers ParisTech	Rapporteur
M. Bernard RIERA Professeur des Universités, Université de Reims	Rapporteur
M. Yacine OUZROUT Professeur des Universités, Université Lyon 2	Examineur
Mme Claire VALENTIN Professeur des Universités, Université Lyon 1	Examineur
M. Eric ZAMAÏ Professeur des Universités, INSA Lyon	Examineur

à Marie, Lucas, Nils et Lenny

Remerciements

Il n'est pas facile de remercier de manière exhaustive l'ensemble des personnes qui ont participé et contribué aux travaux de recherche présentés dans ce document et m'ont aidé à acquérir la maturité nécessaire à l'obtention de cette Habilitation à Diriger des Recherches.

Je souhaite remercier en premier lieu les membres de mon jury d'Habilitation à Diriger des Recherches, pour leur implication et les questions/discussions que cette présentation a amenées. Merci à Pascal BERRUET d'avoir accepté de présider ce jury, à Benoit IUNG, Samir LAMOURI et Bernard RIERA d'avoir rapporté sur ce manuscrit et à Claire VALENTIN, d'être présente ce jour comme examinatrice. Je tiens à remercier très chaleureusement mes parrains scientifiques : Yacine OUZROUT, Vincent CHEUTET et Abdelaziz BOURAS qui m'ont guidé et soutenu durant toutes ces années de travail en commun. Merci aussi à Eric ZAMAÏ pour la confiance accordée, en particulier pour co-encadrer avec lui une thèse.

Merci aussi aux doctorants que j'ai eu le plaisir d'encadrer Anis BEN KHEDDHERE, Thierno DIALLO, Ngoc Hoang TRAN, Alhour RIBAUULT, Siraprapa WATTANAKUL, Aurélien CADIOU et Kumar Dharmendra MISHRA ; pour leurs travaux de thèse sur lesquels s'adosse l'ensemble de mes recherches.

Ce travail est aussi le résultat de celui de toute une équipe avec qui j'ai eu un grand plaisir à travailler et plus encore à vivre avec, durant ces dernières années. Merci pour leur soutien lors de l'écriture et la préparation de la soutenance. Un grand merci donc à Aïcha, Néjib, Jannik, Guillaume, Samuel, Valéry, Guy, Sharon et tous les membres du laboratoire DISP, ainsi que les collègues et partenaires des différents projets auxquels j'ai pu participer. Ce travail étant aussi étroitement lié à mes activités d'enseignement à l'IUT Lyon 1, un grand merci aussi à Christian, Édouard, Michel, Christophe, Arthur, Yoann et tous mes collègues, notamment du département GMP et de l'équipe de direction.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans adresser mes plus chaleureux remerciements à ma famille et à mes amis, en particulier à ma femme Marie, qui veille à préserver mon équilibre et sur qui je peux m'appuyer en toutes circonstances et à mes enfants Lucas, Nils et Lenny qui remplissent de bonheur ma vie de famille.

Table des matières

Introduction Générale	1
Curriculum vitæ synthétique	3
Curriculum vitæ détaillé	5

Partie A Activités d'enseignant-chercheur

Chapitre 1	Activité pédagogique	15
1.1	Conditions d'exercice du métier d'enseignant-chercheur	15
1.2	Adapter périodiquement mes enseignements	18
1.3	Exercer des responsabilités pédagogiques	21
1.4	Accompagner et suivre des étudiants	23
1.5	Promouvoir l'Industrie, l'IUT Lyon 1 et l'automatisme	24
1.6	Digitaliser l'enseignement	25
1.7	Conclusion	28
1.8	Frise chronologique de synthèse	29
Chapitre 2	Management et activités collectives	31
2.1	Management et responsabilités de formation	31
2.1.1	Responsable pédagogique de licence professionnelle en robotique	31
2.1.2	Chef du département GMP	32
2.1.3	Directeur adjoint de l'IUT Lyon 1, responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel	34
2.1.4	Management du personnel	37
2.2	Responsabilités collectives	38
2.2.1	Université Lyon 1	38
2.2.2	Laboratoire DISP	38
2.2.3	IUT Lyon 1	39
2.2.4	Réseau national des départements GMP	39
2.2.5	Réseau national GIS S.mart	39
2.3	Conclusion	40
2.4	Frise chronologique de synthèse	41
Chapitre 3	Activité de recherche	43
3.1	Contexte de mon activité de recherche	43
3.1.1	Laboratoire PRISMa	43
3.1.2	Laboratoire LIESP	45
3.1.3	Laboratoire DISP	45
3.2	Projets de recherche	46
3.2.1	Responsable scientifique	46
3.2.2	Participant	49

3.2.3	Déposés et non financés	50
3.3	Expertise Scientifique	51
3.3.1	Jury de thèse	51
3.3.2	Comité de suivi individuel de thèse	51
3.3.3	Conférences et revues	51
3.4	Encadrement doctoral et de master	51
3.5	Production scientifique	52
3.6	Conclusion	52
3.7	Frise chronologique de synthèse	53

Partie B

Problématique scientifique, résultats et projet

Chapitre 4	Estimer l'état d'un Système Cyber-Physique de Production	57
4.1	Système à événements discrets	57
4.1.1	Système et modélisation	58
4.1.2	État d'un système	59
4.1.3	Les familles de systèmes	63
4.2	Histoire d'une révolution industrielle	64
4.2.1	La production	64
4.2.2	Industrie 4.0	64
4.2.3	Système cyber-physique - CPS	71
4.3	Système cyber-physique de production - CPPS	73
4.3.1	Architectures des CPPS	73
4.3.2	Pourquoi modéliser et observer un CPPS ?	76
4.3.3	Autonomie et reconfiguration d'un CPPS, fantasme ou future réalité ?	77
4.4	Conclusion	81
Chapitre 5	Synthèse des résultats scientifiques	83
5.1	Classification des travaux de recherche	83
5.1.1	Trajectoire d'un système réel et de son modèle	83
5.1.2	Quatre critères de classification	85
5.1.3	Trois classes de travaux de recherche	87
5.2	Estimation de l'état présent d'un système cyber	87
5.2.1	Amélioration de la qualité des données de production	88
5.2.2	Détection de données erronées de traçabilité unitaire	91
5.3	Estimation de l'état passé & présent d'un système physique	92
5.3.1	Diagnostic pour la reconfiguration d'équipements de production	93
5.3.2	Diagnostic et pronostic pour optimiser le rappel de produits verriers	96
5.3.3	Diagnostic pour la construction d'un jumeau numérique d'un équipement	98
5.4	Estimation de l'état futur d'un système physique	99
5.4.1	Pronostic du taux de rendement synthétique	99
5.4.2	Pronostic de la consommation énergétique d'une chambre froide	102
5.4.3	Pronostic de congestion d'un port maritime à conteneurs	104
5.5	Conclusion	108
Chapitre 6	Projet scientifique	110
6.1	Concept de Jumeau Numérique	111
6.1.1	Première définition d'un Jumeau Numérique	111
6.1.2	Les origines du concept	112
6.1.3	PLM et Jumeau Numérique	113
6.2	Jumeau Numérique de CPPS	114
6.2.1	Particularité d'un JN de CPPS	114

TABLE DES MATIÈRES

6.2.2	Coût et bénéfice d'un JN de CPPS	115
6.2.3	JN associé à chaque niveau de CPPS	116
6.2.4	Place de l'humain dans un JN	117
6.3	JN de CPPS, vers une approche centrée ingénierie système et encapsulation	118
6.3.1	Une approche mutli-échelles	118
6.3.2	Des briques élémentaires multi-physiques	119
6.3.3	Un niveau charnière, la ressource de production	119
6.3.4	Finalité, la gestion de production	120
6.3.5	JN d'un système de production et ses usages	120
6.4	CPPS et Bâtiment, un cycle de vie similaire	122
6.4.1	CPPS et produit mécanique, une histoire commune mais des différences.	122
6.4.2	CPPS et Bâtiment, beaucoup de similitudes	122
6.4.3	BIM, une approche mutli-acteurs au delà de la maquette 3D	123
6.5	Partager des données pour co-construire des Jumeaux Numériques	124
6.5.1	Apport de l'apprentissage automatique pour les JN	124
6.5.2	Construire un JN de CPPS standard	127
6.5.3	Construire un JN d'opérateur	127
6.6	Urgence climatique, un modèle adapté de CPS	128
6.7	Conclusion	129
	Conclusion Générale	131
	Bibliographie	133

Introduction Générale

L'Habilitation à Diriger les Recherches est un diplôme qui «sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique d'un candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large avec une capacité à encadrer de jeunes chercheurs»¹. Ce mémoire aurait pu se limiter à présenter ma stratégie scientifique et les résultats de mes travaux ponctués par un projet de recherche. Cependant, la trajectoire de mes travaux de recherche a été nécessairement influencée par le contexte dans lequel ils ont été menés, rien d'anormal à cela et bien au contraire alors même que mes travaux visent à adapter la trajectoire d'un système de production à son contexte.

Après une thèse à l'INP Grenoble en 2005 au sein du Laboratoire d'Automatique de Grenoble, le contexte de mes activités de recherche se résume ainsi : Maître de Conférences recruté en 2006 à l'Université Lyon 1 rattaché en enseignement à l'IUT B devenu l'IUT Lyon 1 en 2010, et en recherche aux laboratoires PRISMa, LIESP et DISP qui se sont succédés au gré de fusions et de scissions. Comme le mentionne le décret régissant leur statut, «Les enseignants-chercheurs ont une double mission d'enseignement et de recherche»². Même si toutes mes activités se rattachent effectivement à l'une ou l'autre de ces deux missions des universités, j'ai dans les faits exercé trois fonctions différentes : enseignant, chercheur et manager.

Ainsi, ce mémoire est constitué de deux parties. Une première présente l'ensemble de mes activités d'enseignant-chercheur. Elle est constituée de trois chapitres consacrés respectivement à mon activité pédagogique, au management avec mes responsabilités collectives et enfin à mon activité de recherche en retraçant toutes les actions menées sans aborder le fond scientifique.

La problématique scientifique, les résultats obtenus et le projet scientifique sont introduits et détaillés dans la seconde partie constituée de trois chapitres :

Le chapitre 4 vise à préciser la problématique scientifique des travaux de recherche développés depuis 2006.

Elle est centrée sur l'estimation d'état des systèmes à événements discrets appliquée aux systèmes de production. Dans un monde idéal en imaginant disposer d'une estimation extrêmement précise à chaque instant, les systèmes de production auraient d'une part des performances exceptionnelles avec des indicateurs proches des 100% grâce à une anticipation de tous les aléas à venir et d'autre part une capacité d'adaptation extrêmement rapide face à l'évolution des produits à fabriquer et de leur environnement. Mais, les systèmes de production sont des systèmes complexes dont les modèles actuels reproduisent partiellement leur comportement réel et dont l'observation reste très partielle. Le facteur humain est certainement non négligeable mais il existe d'innombrables autres facteurs de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. En effet à ces différentes échelles, les modèles sont le plus souvent disjoints ne permettant pas de refléter les interactions entre ces échelles. Afin de positionner cette problématique scientifique au regard des connaissances actuelles, le chapitre 4 introduit en premier lieu le concept de système à événements discrets. Avant de décliner ce concept aux systèmes de production, les caractéristiques de ces derniers sont identifiées au travers de la quatrième révolution industrielle que nous vivons. Un état de l'art sur la modélisation des systèmes cyber-physique de production (CPPS)³ et les limites actuelles pour les usages souhaités finit de positionner la problématique scientifique.

Le chapitre 5 apporte une vision d'ensemble des résultats scientifiques avec une classification des travaux basée sur quatre critères. Le premier critère concerne l'approche et la méthodologie de construction des modèles. Le second critère est relatif aux éléments dont l'état est modélisé et considéré comme les données d'entrée pour l'estimation. Les éléments dont nous cherchons à estimer l'état constitue le troisième critère.

1. Arrêté du 23 novembre 1988

2. article 2 du décret n°84-431 du 6 juin 1984

3. Cyber-Physical production System

Enfin, l'horizon temporel associé à la fonction visée (détection, diagnostic ou pronostic) forme le quatrième critère. Sur la base de ces critères, la classification amène à identifier trois classes principales. La première concerne l'estimation d'état présent d'un système cyber. L'estimation d'état passé et présent d'un système physique constitue la deuxième classe. Enfin, l'estimation d'état futur d'un système physique forme la troisième et dernière classe. Après cette classification, le chapitre 5 se poursuit par une présentation des travaux associés avec chaque classe avec le même schéma : besoin industriel, problématique scientifique, résultats obtenus et enfin les perspectives.

Le chapitre 6 décrit le projet scientifique de développement d'une approche de conception et de calibration des jumeaux numériques de systèmes de production. Avant de détailler ce dernier, le concept de jumeau numérique est d'abord discuté en veillant à mettre en exergue les caractéristiques principales. La première d'entre elle qui est fondamentale est la notion indissociable de gestion du cycle de vie du concept de jumeau numérique. Tous les secteurs étant désormais concernés par ce concept de jumeau numérique, de l'énergie à la santé jusqu'aux transports et aux bâtiments, sa déclinaison aux systèmes cyber physique de production est débattue en considérant : les particularités des CPPS, le coût et le bénéfice d'un jumeau numérique au regard du cycle de vie du CPPS, les différents niveaux à considérer et enfin la place de l'humain dans un jumeau numérique. De cette discussion émerge le projet scientifique vers une approche centrée ingénierie système et encapsulation pour concevoir un jumeau numérique mutli-échelles et multi-physiques. Ce projet est consolidé en considérant les similitudes entre le cycle de vie d'un bâtiment et un CPPS. De ce rapprochement, une approche de co-construction des jumeaux numériques est proposée à partir du partage de données entre acteurs dans un contexte d'industrie 4.0 où l'accès sécurisé aux données des différents acteurs industriels sera extrêmement simple. Enfin face à l'urgence climatique, cette dimension devait être intégrée au projet scientifique, ce que propose la dernière section.

Un effort particulier a été porté afin de mettre en perspective ces travaux de recherche au regard du domaine d'application en apportant quelques éléments de vulgarisation pour partager ces réflexions avec des collègues enseignants si l'envie leur prenait de découvrir le métier d'enseignant-chercheur.

Curriculum vitæ synthétique



- ✓ Lyon, France
- +33 6 03 66 15 50
- 17 rue de France
69100 Villeurbanne
- @ sebastien.henry@univ-lyon1.fr

Sébastien HENRY

Enseignant-Chercheur, Université Lyon 1
Maître de Conférences Hors Classe
Enseignement - IUT Lyon 1
Recherche - laboratoire DISP

Expérience professionnelle

Responsabilités à l'Université Lyon 1

2016-2024 Membre élu aux conseils centraux, CAC & CFVU

Responsabilités au laboratoire DISP

2016-2025 Membre du comité de direction et du conseil de Laboratoire

2016-2025 Co-responsable de l'axe scientifique SIDO

Responsabilités à l'IUT Lyon 1

2022-2027 Directeur adjoint de l'IUT Lyon 1

Responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel, 2000 étudiants

2018-2022 Chef du département GMP

800 étudiants et 70 personnels, DUT GMP & 7 LPRO

2009-2018 Responsable Licence professionnelle RAVI – 32 alternants

Activités de recherche

1 projet ANR, 1 projet FUI, 3 thèses CIFRE, 1 projet région

5 thèses co-encadrées et soutenues, 2 thèses à venir

6 revues, 28 conférences internationales

Activités d'enseignement

BUT GMP & LPRO RAVI/PAC : automatisme, robotique, vision, supervision
ped de machine, réalité augmentée et développement durable

Ingénieur : supervision et Manufacturing Execution System (MES)

Parcours professionnel

2006-2023 Maître de Conférence à l'Université Lyon 1

2002-2006 Doctorant, moniteur & ATER – Grenoble INP – LAG

2001-2002 Professeur agrégé à Sens (89)

2000-2001 Service national – Maison de l'enfance (21)

1999-2000 IUFM Besançon – Professeur agrégé stagiaire (25)

1998-1999 Bureau d'études ERHEL-HYDRIS Dijon (21)

Compétences

Travail en équipe

Management d'équipe

Organisation et amélioration continue

Montage et gestion de projets pédagogiques et de recherche

Recherche : décision, système de production, IA & Jumeau Numérique

Technologique : robot, automate, vision, supervision & MES, RA & DD

Formation

2005 Doctorat Grenoble-INP, Automatique

2002 DEA Production Automatisée ENS Cachan

1995-1999 Elève à l'ENS Cachan

1998 Agrégation de mécanique

1997 Maîtrise de technologie mécanique

1996 Licence de technologie mécanique

Langues

Français

Anglais

Réseaux

[linkedin.com/in/in-shenry](https://www.linkedin.com/in/in-shenry)

idref.fr/099408171



Curriculum vitæ détaillé

Sébastien HENRY

48 ans, marié & 3 enfants
Maître de Conférences









Hors classe en 2016
RIPEC C3 en 2022 au titre de l'ensemble des missions

Enseignement – composante IUT Lyon 1 	Recherche - laboratoire DISP 
Automatisme, robotique & vision industriels, supervision et MES	Estimation d'état de systèmes à événement discret & jumeau numérique, développement d'outils d'aide à la décision
<p>Responsabilités collectives à l'Université Lyon 1 2020-2024 Membre élu CAC & CFVU Université Lyon 1 Membre de la section disciplinaire compétente à l'égard des enseignants, 1 convocation Membre du comité de suivi plateforme numérique</p> <p>2016-2020 Membre élu CAC & CFVU Université Lyon 1</p> <p>Responsabilités collectives à l'IUT Lyon 1 2022-2027 Directeur adjoint de l'IUT Lyon 1 Responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel 2000 étudiants et 220 personnels</p> <p>2018-2022 Chef du département GMP DUT/BUT GMP et 7 LPRO ~30 000h d'enseignement annuel 550 étudiants et 250 alternants 71 permanents et ~100 vacataires</p> <p>2009-2018 Porteur du projet de création et responsable LPRO RAVI, 32 alternants, partenariat IRI Robotique, Automatisme et Vision Industriels</p> <p>2014-2017 Membre élu du conseil de l'IUT Membre de la commission des personnels</p> <p>2007-2010 Membre élu du conseil de l'IUT</p>	<p>Dates clés 2011-2023, laboratoire DISP Décision et Information pour les Systèmes de production Né de la recomposition de plusieurs laboratoires Équipe MISI (2011-2015) puis axe MOCS (2015-2020) et axe SIDo (2021-2025)</p> <p>2007-2011, laboratoire LIESP Né de la fusion du laboratoire PRISMA avec d'autres équipes</p> <p>2006, laboratoire PRISMA</p> <p>Responsabilités collectives 2015-2025 Membre du comité de direction du laboratoire DISP Membre nommé du conseil de laboratoire DISP</p> <p>2021-2025 Co-responsable de l'axe SIDo, Système d'information et données, ~ 20 permanents impliqués, ~ 15 doctorants, 6 réunions / an.</p> <p>2015-2020 Co-responsable de l'axe MOCS, Modélisation et Optimisation du Cycle de vie des Systèmes, ~ 15 permanents, ~ 10 doctorants, 6 réunions / an.</p> <p>Projets 2023-2026 ANR DT4CPS, 1 thèse + 1 post-doc prévus Partenariat entreprise McPhy, 1 thèse, attente ANRT</p> <p>2021-2022 Membre Action Jumeau Numérique – GDr MACS</p>

<p>Responsabilités nationales & internationales</p> <p>2021-2022 Membre du GT national de rédaction du référentiel de formation du BUT GMP Animateur du GT pour : Parcours Chargé d’Affaires Industrielles Ressources « Ingénierie Systèmes Cyberphysiques »</p> <p>2020 Animateur du GT national de rédaction du référentiel de compétence du BUT GMP</p> <p>Depuis 2020 Représentant réseau S.mart auprès du club MES</p> <p>2019-2021 Membre du comité de pilotage du projet Hybrid’GMP (Aix, Lyon, Rennes, Toulouse)</p> <p>2018-2022 Membre du bureau de l’Assemblée des chefs de département GMP</p> <p>2011-2012 Porteur du projet CMIRA (2012), Université de Long Nam à Ho Chi Min, Vietnam, 12 k€ de fonctionnement et 17,5 k€ d’investissement.</p> <p>Responsabilités pédagogiques</p> <p>2022-2024 Porteur du projet FAFDIP à l’AMI Industrie 4.0 des territoires d’industrie, 1,1 M€ d’investissement</p> <p>2009-2022 Responsable de la plate-forme ASIMOV inter-départements automatisme & robotique industrielle au sein de l’IUT Lyon 1, investissement de 450 k€</p> <p>2006-2022 Responsable modules d’automatisme DUT S1/S2 312 étudiants, CM, TD, TP, gestion des vacataires</p> <p>Depuis 2006 Responsable de plusieurs modules de licences professionnelles de l’IUT Lyon 1</p>	<p>2020-2021 Supergrid Institut, 1 master</p> <p>2018-2019 Partenariat entreprise Infologic, 1 thèse</p> <p>2016-2020 Projet Erasmus Mundus SmartLink, 1 thèse</p> <p>2016-2019 Partenariat avec entreprise Energy Pool, 1 thèse</p> <p>2014-2018 Projet européen Erasmus-Mundus C-Link, 1 thèse</p> <p>2013-2017 Projet région ARC8, MES étendu, responsable scientifique lyon 1, 1 thèse</p> <p>2012-2016 FUI Traçaverre, responsable scientifique Lyon 1, 1 thèse</p> <p>Projets déposés mais non retenus ! 2020, Région, entreprise PFEIFFER, thèse 2020, IAdoc, partenaire AMPERE, thèse 2019, Région, entreprise PFEIFFER, thèse 2019, Région, entreprise Energy Pool, thèse 2017, H2020, porteur DISP, porteur S-REST 2017, FUI, Flexia, entreprise Probayes</p> <p>Encadrements de thèse</p> <p>5 thèses soutenues co-encadrées (50%) 1 thèse co-encadrée (33%) arrêtée 1 thèse co-encadrée (50%) arrêtée</p> <p>Publications, données HAL</p> <p>6 revues avec comité de lecture 2 chapitres d’ouvrages 28 articles de conférences internationales 8 autres publications</p>
<p>Parcours professionnel</p> <p>depuis 2006 Maître de Conférences à l’Université Lyon 1, IUT Lyon 1, dpt GMP, laboratoire DISP</p> <p>2005-2006 ATER INPG – ENSIEG, en position de détachement</p> <p>2002-2005 Doctorat Grenoble INPG, laboratoire LAG, moniteur à l’ENSIEG, disponibilité pour études</p> <p>2001-2002 DEA de Production Automatisée LURPA-ENS Cachan, Agrégé TZR en lycée à Sens</p> <p>2000-2001 Service national</p> <p>1999-2000 Titularisation, Agrégé stagiaire, IUFM de Besançon</p> <p>1998-1999 Expérience industrielle en conception, 4^{ème} année ENS Cachan, entreprise ERHEL-HYDRIS</p> <p>1997-1998 Agrégation de Mécanique</p> <p>1996-1997 Maîtrise de mécanique, ENS Cachan & Paris 6</p> <p>1995-1996 Licence de mécanique, ENS Cachan & Paris 6</p>	

Publications

Référencement	Identifiant	Indicateurs
	099408171	
	sebastien-henry	Toutes les publications référencées
	0000-0003-2660-4075	Toutes les publications référencées
	IVH-5674-2023	16 publications référencées 46 citations h-index 4
	8248196900	22 publications référencées 109 citations h-index 6
	Sébastien HENRY	Toutes les publications référencées Indice h 10

Liste classée des publications

Articles dans revues internationales à comité de lecture

- ACL6 Siraprapa WATTANAKUL, **Sébastien HENRY**, Napaponn REEVEERAKUL, Yacine OUZROUT. A Port Digital Twin Model for Operational Uncertainty Management. The Journal of Modern Project Management, North America, 9, jan. 2022. [\(hal-03579344\)](#)
- ACL5 Alnour Ribault, Samuel Vercreaene, **Sébastien Henry**, Yacine Ouzrout. Economic optimisation of cold production: a matheuristic with artificial neural network approach, International Journal of Production Research, Taylor & Francis, 2020, 52 (13), pp.1-22. IF 8.5. [\(hal-03003595\)](#)
- ACL4 Thierno Diallo, **Sébastien Henry**, Yacine Ouzrout, Abdelaziz Bouras. Data-based fault diagnosis model using a Bayesian causal analysis framework, International Journal of Information Technology and Decision Making, World Scientific Publishing, 2018, 17 (02), pp.583-620. IF2.2. [\(hal-01722846\)](#)
- ACL3 Anis Ben Khedher, **Sébastien Henry**, Abdelaziz Bouras. Architecture for integration of product life cycle management and production. Mundo PM-Project Management, 2012, pp.13. [\(hal-00757264\)](#)
- ACL2 **Sébastien Henry**, Eric Zamaï, Mireille Jacomino. Logic control law design for automated manufacturing systems, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Elsevier, 2012, 25 (4), pp.824 à 836. IF 6.2. [\(hal-00676800\)](#)
- ACL1 Eric Deschamps, **Sébastien Henry**, Eric Zamaï. Automatic design of control laws based on Petri nets formalism for complex Discrete Event Systems, Studies in Informatics and Control, Informatics and Control Publications, 2007, 16 (1). IF 1.6. [\(hal-00145469\)](#)

Chapitres d'ouvrages

- CO2 T. M. L. Diallo, **S. Henry**, Y. Ouzrout. Effective use of food traceability in product recall. Advances in food traceability techniques and technologies, Eds. M. Espiñeira, F. Santaclara, R. Sykes, Elsevier, 2016.
- CO1 A. Ben Khedher, **S. Henry**, and A. Bouras, "Industrialization and manufacturing steps within the Global Product Lifecycle context", Advances in Production Management Systems: New Challenges, New Approaches, Eds. B. Vallespir T. Alix, Springer, pp.400-408, 2010.

Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques...

- ACTI28 Siraprapa Wattanakul, Reeveerakul Napaporn, Sebastien Henry, Yacine Ouzrout. Uncertainty handling in containerized logistics: Unitary Traceability Object approach. 13th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications - IEEE SKIMA 2019, Aug 2019, Ukulhas, Maldives. 8 p. <hal-02429973>
- ACTI27 Alnour Ribault, Samuel Vercaene, Sébastien Henry, Yacine Ouzrout, Lucie Peguet. Economically Optimal Control of a Cold Room Using an Artificial Neural Network and Dynamic Programming. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019, Aug 2019, Berlin, Germany. pp.2002-2007, <10.1016/j.ifacol.2019.11.497>. <hal-02450380>
- ACTI26 Aurélien Cadiou, Sébastien Henry, Vincent Cheutet, Carole Eyssautier. A PLC Variable Identification Method by Manual Declaration of Time-Stamped Events. SOHOMA 2019 International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Oct 2019, Valencia, Spain. pp.313-325, <10.1007/978-3-030-27477-1_24>. <hal-02305681>
- ACTI25 Siraprapa Wattanakul, Sébastien Henry, Mohand Lounes Bentaha, Napaporn Reeveerakul, Yacine Ouzrout. Improvement of the Containerize Performance based on the Unitary Traceability of Smart Logistics Units. PLM'18 - the 15th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2018, Torino, Italy. <hal-01788465>
- ACTI24 S. Wattanakul, S. Henry, L. Bentaha, N. Reeveerakul, Y. Ouzrout. Improving risk management by using smart containers for real-time traceability, 9th International Conference on Logistics and Transport (ICLT 2017). 1-4 November, 2017, Bangkok, Thailand.
- ACTI23 D. Mishra, A. Sekhari, S. Henry, Y. Ouzrout. Data Model in PLM System to support Product Traceability: A use case implementation in Oxygen gas Supply Chain" IFIP international conference on PLM 9-12 July, Seville, Spain, 2017.
- ACTI22 D. Mishra, A. Sekhari, S. Henry, Y. Ouzrout, "Traceability in product supply chain: A global model" 13th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, July 11-13, Columbia, SC, USA, 2016.
- ACTI21 N. H. Tran, S. Henry, and E. Zamaï, Generic and configurable diagnosis function based on production data stored in Manufacturing Execution System, Third European Conference of the PHM Society - PHME16, Bilbao, Spain, 5-8 July 2016.
- ACTI20 D. K. Mishra, A. Sekhari, S. Henry. Towards Realizing the Smart Product Traceability System. 9th IEEE International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications (SKIMA 2015), Kathmandu, Nepal, 15-17 December, 2015.
- ACTI19 D. K. Mishra, S. Henry, A. Sekhari, Y. Ouzrout. Traceability as an integral part of supply chain logistics management: an analytical review. 6th International Conference on Logistics and Transport (ICLT 2015). 17-20 November, 2015, Lyon, France.
- ACTI18 T. M. L. Diallo, S. Henry, Y. Ouzrout. Bayesian Network Building for Diagnosis in Industrial Domain based on Expert Knowledge and Unitary Traceability Data. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'15), Ottawa, Canada, 11-13 May 2015 IFAC-PapersOnLine 48(3): 2411-2416. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.449
- ACTI16 T. M. L. Diallo, S. Henry, Y. Ouzrout. Using Unitary Traceability for an Optimal Product Recall. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS'14), Ajaccio, France, 20-21 Sept 2014. 438: 159-166. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44739-0_20

- ACTI15A. Ben Khedher, S. Henry and A. Bouras, "Quality improvement of product data exchanged between engineering and production through the integration of dedicated information system", ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis (ESDA2012) , Nantes, France, juillet 2012
- ACTI14A. Ben Khedher, S. Henry and A. Bouras, "Integration between MES and Product Lifecycle Management", IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'11), Toulouse, France, 5-9 septembre, 2011.
- ACTI13L. Pietrac, A. Leleve, S. Henry, "On the use of SysML for Manufacturing Execution System design", IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'11), Toulouse, France, 5-9 septembre, 2011.
- ACTI12A. Ben Khedher, S. Henry and A. Bouras, "An analysis of the interaction among design, industrialization and production", International Conference on Product Lifecycle Management Conference (PLM'10), Bremen, Allemagne, 12-14 juillet 2010.
- ACTI11A. Ben Khedher, S. Henry and A. Bouras, "Industrialization and manufacturing steps within the product life cycle management context", International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS09), Bordeaux, France, September 19-23 2009.
- ACTI10E. Deschamps, S. Henry, and E. Zamaï, "Operating part model for on-line diagnosis", 18th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-07), Nashville, USA, actes CDRom, 6p, 29-31 mai 2007.
- ACTI9 E. Deschamps, S. Henry, and E. Zamaï, "Synchronization of Operating Part Model in Failure Context", International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation (CIMCA06), Sydney, Australia, pp204-207, December 29-1 2006.
- ACTI8 E. Deschamps, S. Henry, and E. Zamaï, "Petri Nets Modelling for Control of Discrete Events Systems", IEEE International Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA'06), Pékin, Chine, October 4-6, pp904-911, (2006).
- ACTI7 E. Deschamps, S. Henry, et E. Zamaï, "Models of Knowledge on Manufacturing Systems for Control Law Synthesis", 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Saint-Etienne, France, pp321-326, 17-19 mai 2006.
- ACTI6 S. Henry, E. Zamaï et M. Jacomino, "Controlled-System Model Adapted to the Control Law Synthesis", 16th IFAC World Congress, République Tchèque, actes CDRom, 6p, Juillet 2005.
- ACTI5 E. Deschamps, S. Henry, E. Zamaï et M. Jacomino, "Controlled System Model with Petri Net Formalism for Reconfiguration", IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control (MIM'04), Athènes, Grèce, 21-22 octobre 2004.
- ACTI4 S. Henry, E. Deschamps, E. Zamaï et M. Jacomino, "Control Law Synthesis Algorithm for Discrete-Event Systems", IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'04), Santiago, Chili, 3-5 novembre 2004.
- ACTI3 S. Henry, E. Zamaï et M. Jacomino, "The controlled system modeling and the automated control law synthesis", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'04), The Hague, Pays-Bas, 10-13 Octobre 2004.
- ACTI2 S. Henry, E. Zamaï et M. Jacomino, "Decisional Requirements for Supervision, Monitoring and Control Structures", IEEE International Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA'03), Lille, France, 9-11 Juillet 2003.
- ACTI1 S. Henry et J.M. Faure, "Elaboration of invariant safety properties from fault-tree analysis", IEEE International Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA'03), Lille, France, 9-11 Juillet 2003.

Autres

- AP8 Ribault, A., Ouzrout, Y., Vercreaene, S., & **Henry, S.** (2017). Optimisation économique de la production d'énergie thermique avec stockage. Conférence ROADEF 2017, 22-23 février, 2017, Metz, France.
- AP7 T. M. L. DIALLO, **S. HENRY**, Y. OUZRout. Construction de la structure des Réseaux Bayésiens causaux appliqués au diagnostic. 6èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, 18-19 juin 2015

- AP6 T. M. L. Diallo, S. Henry, Y. Ouzrout. Towards a more efficient use of process and product traceability data for continuous improvement of industrial performances. APMS Doctoral Workshop, 20-21 Sept 2014, Ajaccio, France.
- AP5 A. Ben Khedher, **S. Henry** and A. Bouras, "Intégration des systèmes d'information dédiés aux produits et aux systèmes de production", 13ème colloque national AIP Priméca, mars 2012
- AP4 A. Ben Khedher, **S. Henry** and A. Bouras, "Intégration des systèmes d'information dédiés aux produits et aux systèmes de production", Journées Doctorales du GDR MACS (JD MACS'2011), Marseille, 9-10 juin 2011.
- AP3 A. Ben Khedher, S. Henry and A. Bouras, "Towards integration between product and production information through the PLM-MES interoperability", Doctoral Spring Workshop "Product and Asset Lifecycle Management (DSW-PALM), Islantilla, Espagne, 17-19 Mai 2010.
- AP2 A. Ben Khedher, S. Henry and A. Bouras, "Towards an integration between product and production information through the PLM-MES interoperability", doctoral Workshop of International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS09), Bordeaux, France, September 19-23 2009.
- AP1 **S. Henry**, E. Deschamps, P. Bellemain, E. Zamaï, « Atelier logiciel de synthèse de lois de commande », Journées de la Section Automatique du club EEA consacrées aux Démonstrateurs en Automatique à vocation recherche, Angers, France, 28-29 mars 2006.

Direction de thèses

BEN KHEDDHERE Anis

Université Lyon 2, Allocation ministérielle, 50% A. BOURAS, 50% S. HENRY, Amélioration de la qualité des données produits échangées entre l'ingénierie et la production à travers l'intégration de systèmes d'information dédiés, Début 10/2008, soutenue 27/02/2012, Senior Information Solutions Specialist at Islamic Development Bank (IsDB), 1 revue, 8 conférences internationales et 1 doctoral whorkshop.

DIALLO Thierno

Université Lyon 1, FUI Traçaverre, 50% Y. OUZROUT, 50% S. HENRY, Approche de diagnostic des défauts d'un produit par intégration des données de traçabilité unitaire produit/process et des connaissances expertes, début 01/2013, soutenue 10/12/2015, Maître de conférences à l'Institut supérieur de mécanique de Paris, 1 revue, 3 conférences internationales, 1 chapitre d'ouvrage, 1 doctoral whorkshop.

TRAN Ngoc Hoang

Grenoble INP, ARC8 - Région Rhône-Alpes, 50% E. ZAMAI, 50% S. HENRY, Extension des systèmes MES au diagnostic des performances des systèmes de production au travers d'une approche probabiliste Bayésienne, Début 10/2013, soutenue 07/2018, enseignant-chercheur université Ho Chi Minh, Vietnam, 1 conférence internationale.

RIBAULT Alnour

Université Lyon 2, CIFRE, Energy POOL, 33% Y. OUZROUT, 33% S. VERCRANE, 33% S. HENRY, Optimisation de la consommation d'énergie d'un entrepôt frigorifique : une double approche par la recherche opérationnelle et l'apprentissage automatique, début 01/2017, soutenue 01/2020, 1 revue, 1 conférence internationale et 1 conférence nationale.

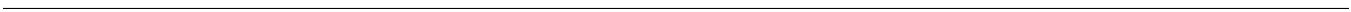
WATTANAKUL Siraprapa, co-tutelle, Université Lyon 2, Chiang Mai University – Thailand, Erasmus Mundus 24 mois en France, 33% N. Reeveerakul (Thailand)), 33% Y. OUZROUT (France), 33% S. HENRY (France), digital twin for the decision making to manage port operation with uncertainties : an approach based on knowledge from machine learning, début 2017, soutenue le 10/2022, lecturer à l'Université de Chiang Mai depuis son retour en Thaïlande en 2018.

CADIOU Aurélien, INSA Lyon, CIFRE, entreprise Infologic, 50% V. CHEUTET, 50% S. HENRY, début 03/2018 à 08/2019, Utilisation d'un jumeau numérique pour modéliser un écosystème industriel – Outils et modèles de description et de configuration d'équipements industriels. Thèse interrompue à l'initiative du candidat, Président de l'Association Nationale des Apprentis de France et permanent de Worldskills France.

MISHRA Kumar Dharmendra, Université Lyon 2, Erasmus Mundus C-Link, 33% Y. OUZROUT, 33% A SEKHARI, 33% S. HENRY, Tracability services for product re-used, début 02/2015 à 2019, thèse interrompue d'abord suite à son retour au Népal comme Associate Professor & Vice-Principal Acme Engineering College Sitapaila, Kathmandu, puis pour raison médicale et suite à son décès.

Partie A

Activités d'enseignant-chercheur



Chapitre 1

Activité pédagogique

La première partie vise à dresser un panorama de l'ensemble de mes activités d'enseignant-chercheur en tant que maître de conférences à l'Université Lyon 1. Ce premier chapitre retrace mon activité pédagogique en commençant par exposer mes conditions d'exercice du métier d'enseignant-chercheur. Cette première section apporte donc des éléments sur les différentes entités au sein desquelles j'exerce mon métier : Université Claude Bernard Lyon 1, IUT Lyon 1, département GMP, équipe d'automatisme. La présentation de mon activité pédagogique commence par une synthèse de l'adaptation de mes enseignements à travers cinq périodes différentes. La section suivante s'intéresse aux responsabilités pédagogiques exercées suivi des actions d'accompagnement et de suivis des étudiants. Dans le contexte actuel de l'enseignement supérieur et des difficultés d'attractivité des métiers de l'industrie, les actions de promotion de l'industrie, de l'IUT Lyon 1 et de l'automatisme sont introduites avec une analyse très personnelle sur la promotion des métiers de l'industrie auprès des lycéens. Enfin à une époque de digitalisation annoncée de tous les pans de la société, la dernière section est focalisée sur mon usage du numérique en enseignement. Après la conclusion qui clôt ce chapitre, le lecteur trouvera une frise chronologique de synthèse de mon activité pédagogique page [29](#).

1.1 Conditions d'exercice du métier d'enseignant-chercheur

Cette section est consacrée à présenter le contexte dans lequel j'exerce mon métier d'enseignant chercheur. Elle apporte ainsi des éléments de contexte sur l'Université Claude Bernard Lyon 1 qui m'emploie, sur l'IUT Lyon 1 ma composante d'affectation, sur le département d'enseignement GMP ¹ auquel je suis rattaché et enfin l'équipe pédagogique d'automatisme à laquelle j'appartiens. Seul le laboratoire de recherche DISP où je mène mes recherches est présenté au chapitre 3 consacré exclusivement à mes activités de recherche.

Université Claude Bernard Lyon 1 - UCBL

En tant que maître de conférences à l'Université Claude Bernard Lyon 1, l'ensemble de mes activités d'enseignant-chercheur est bien évidemment concerné par la présentation faite en ce début de premier chapitre consacré à mon activité pédagogique. Des compléments sur l'organisation de l'Université Lyon 1 seront toutefois apportés dans les chapitres suivants quand cela s'avérera nécessaire.

Université à la pointe de l'innovation, Lyon 1 allie formation de qualité et recherche d'excellence au cœur d'un environnement attractif et bénéficie d'un rayonnement international dans les domaines des sciences, des technologies, de la santé et du sport. L'Université Claude Bernard Lyon 1 forme chaque année plus de 47 000 étudiants répartis sur 3 campus et 11 sites. Depuis plus de 50 ans, elle propose formation d'excellence et recherche de pointe. Elle compte aujourd'hui plus de 4 600 personnels dont 2 800 enseignants-chercheurs au sein de 62 laboratoires de recherche. Elle est la première université française en nombre de brevets déposés en 2022. Elle est aujourd'hui membre de l'Udice ², une alliance de 10 grandes universités françaises œuvrant pour une recherche d'excellence, la performance de l'enseignement supérieur, et le développement d'écosystèmes d'innovation attractifs.

Au sein de l'Université Lyon 1, ma composante d'affectation en enseignement est l'Institut Universitaire de Technologie Lyon 1 (IUT Lyon 1).

1. Génie Mécanique et Productique

2. <https://www.udice.org>

IUT Lyon 1, au coeur de son Université et de sa région

Créé en 1967 et après plus de 50 ans d'existence, l'IUT Lyon 1 est au coeur de son Université et de sa région. D'abord en tant que composante de l'Université Lyon 1, il participe à son rayonnement d'une part avec une offre de formation professionnalisante du bac+3 au bac+5 (BUT, Licence professionnelle et Master) et d'autre part au travers de l'implication de ses enseignants-chercheurs au sein des laboratoires de recherche de l'Université Lyon 1. Avec trois sites répartis sur deux départements, l'Ain et le Rhône, l'IUT Lyon 1 attire des candidats issus de toute la région Auvergne-Rhône-Alpes, voire au delà. Avec plus de 1500 alternants au sein d'entreprises de toute la région et avec une très forte insertion professionnelle régionale confirmée enquête après enquête³, l'IUT Lyon 1 forme chaque année plus de 5 300 futurs professionnels et contribue ainsi à apporter aux entreprises régionales les compétences humaines dont elles ont besoin.

Depuis septembre 2021 et avec la première promotion de BUT diplômée à l'été 2024, c'est une nouvelle page de l'histoire des IUT qui s'écrit avec la transformation du DUT en BUT (Bachelor Universitaire de Technologie). Au-delà d'une durée de formation en 3 ans, projetant le diplôme dans le système européen LMD (Licence – Master – Doctorat), c'est l'ensemble de la formation qui évolue et innove au travers d'une approche par compétence. Le BUT c'est une formidable opportunité pour un parcours sécurisé dans le cadre du projet personnel et professionnel de nos étudiants avec une employabilité solide à Bac+3 ou Bac+5, pour l'ouverture à l'international et pour les défis que relèveront nos futurs diplômés.

Après plus de 20 ans d'expérience de l'alternance et la création de presque 50 licences professionnelles avant la réforme du BUT, l'IUT Lyon 1 a souhaité maintenir plus de vingt-cinq licences professionnelles pour offrir, notamment à des étudiants issus de BTS, la possibilité de renforcer leurs compétences par une spécialisation et obtenir le grade de licence ouvrant ainsi la porte à des postes d'assimilé cadre, voire de cadre.

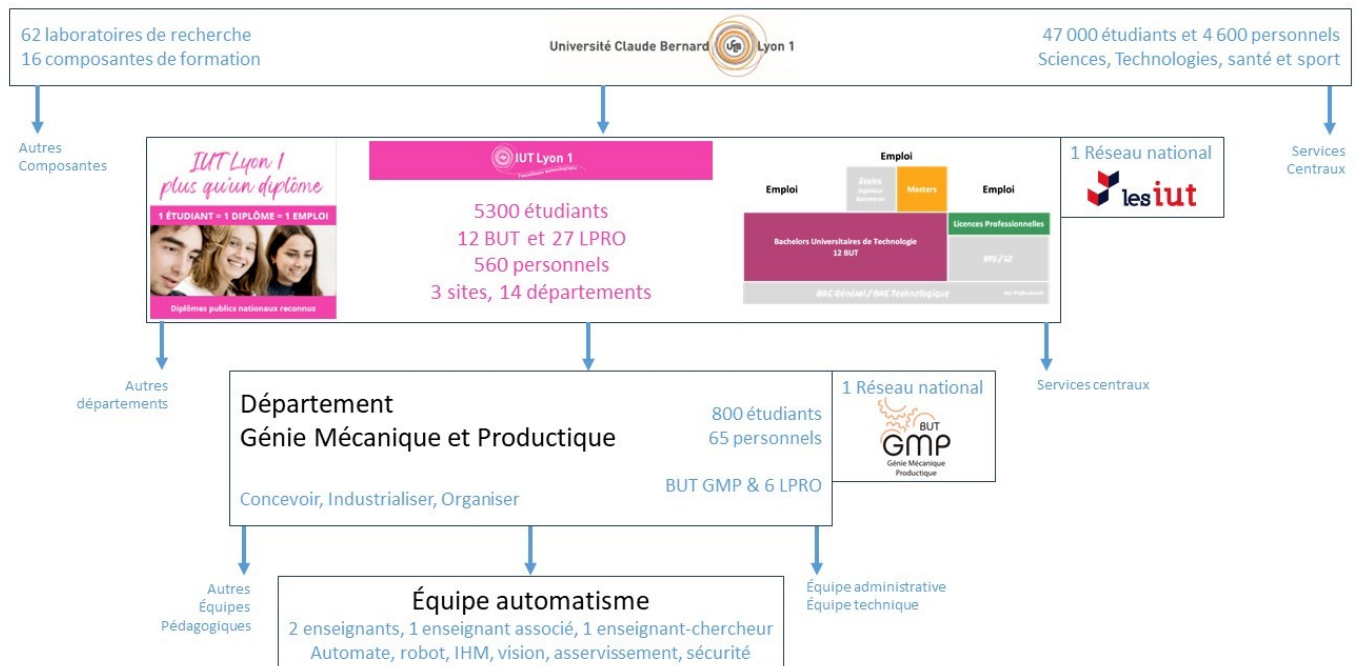


FIGURE 1.1 – Contexte de mon activité pédagogique.

Comme mentionné sur la figure 1.1, l'IUT Lyon 1 compte aujourd'hui plus de 5 300 étudiants répartis entre 12 mentions de BUT et 27 licences professionnelles. L'ensemble des étudiants et des 560 personnels sont répartis sur trois sites : Bourg-en-Bresse dans l'Ain, Villeurbanne Doua sur le campus de Lyon-Tech la Doua dans le Rhône et Villeurbanne Gratte-Ciel au centre ville.

Dans ce chapitre sauf précision contraire, le terme enseignant désigne tous les statuts de personnels qui assurent des enseignements :

- Enseignant du secondaire détaché dans l'enseignement supérieur (agrégé, certifié et de lycées professionnels), titulaire de la fonction public avec un service statutaire annuel de 384 heures d'enseignement.

3. <https://www.univ-lyon1.fr/formation/orientation-stages-et-emploi/insertion-professionnelle>

1.1. CONDITIONS D'EXERCICE DU MÉTIER D'ENSEIGNANT-CHERCHEUR

- Enseignant-chercheur, titulaire de la fonction public avec un service statutaire annuel de 192 heures d'enseignement.
- Enseignant contractuel, historiquement plus connu sous le statut de PAST, en contrat à durée indéterminée de trois ans renouvelables sur ressources propres de l'IUT. Avec un service statutaire annuel de 192 heures d'enseignement, ces enseignants doivent avoir une activité principale dans le secteur privé (salarié, dirigeant d'entreprise, profession libérale, consultant).
- Enseignant vacataire qui intervient pour un nombre variable d'heures, de quelques heures à plus de cent avec un contrat annuel limité à des enseignements sans responsabilité pédagogique.

En dehors des enseignants contractuels, les enseignants assurent d'une part le suivi et l'accompagnement des étudiants, et d'autre part des responsabilités pédagogiques. Celles-ci recouvrent la responsabilité de licence professionnelle ou en DUT/BUT de nombreuses responsabilités : direction des études, emploi du temps, stages, alternance, communication, relations internationales, numérique, recrutement, tutorat, relations avec les lycées, poursuites d'études, projets, et qualité ! En effet, l'IUT Lyon 1 est certifié Qualiopi⁴ mais également QUALIUT⁵ né du fruit de la collaboration des IUT Ain-Rhône-Loire (ARL).

Ces certifications qualité concernent l'ensemble de l'organisation de l'IUT Lyon 1 basée sur des services centraux de proximité et quatorze départements d'enseignement.

Départements d'enseignement

Dès mon recrutement en 2006 à l'IUT Lyon 1 conformément au profil du poste, je suis intervenu dans les départements Génie Mécanique et Productique (GMP) et Génie Industriel et Maintenance (GIM). Le développement de la robotique industrielle m'a conduit à intervenir pour d'autres départements : Génie Électrique et Informatique Industrielle (GEII) et Génie Biologique à Bourg-en-Bresse orienté vers le secteur de l'industrie agro-alimentaire. Le département GMP est mon département de rattachement principal au sein duquel j'effectue la majeure partie de mon service d'enseignement. Intervenir sur plusieurs départements est une contrainte organisationnelle notamment pour s'impliquer dans la vie de deux départements comme cela a été le cas en GMP et GIM, mais c'est surtout une grande richesse par la diversité des étudiants, des collègues côtoyés et des organisations internes. Cependant de manière globale, chaque département est organisé de manière identique avec une équipe administrative, une équipe technique, et des équipes pédagogiques. Nous reviendrons plus en détail sur l'organisation du département GMP avec ses 800 étudiants et plus de 30 000 heures d'enseignement annuel dans le cadre du chapitre sur mes responsabilités. Pour ce chapitre, seuls quelques éléments d'organisation en lien avec la pédagogie sont précisés ici afin de mieux cerner le contexte de mon activité pédagogique.

Etant un élément important d'organisation, les effectifs de première année de BUT sont différents pour chaque mention de BUT : 78 en BUT Biologie à Bourg-en-Bresse, 104 en BUT GIM, 208 en BUT GEII et 312 en BUT GMP par exemple.

Les 312 étudiants de première année de DUT/BUT GMP sont répartis en 12 groupes de 26 étudiants dits de Travaux Dirigés (TD) et en 24 groupes de 13 étudiants dits de Travaux Pratiques (TP). En raison d'une orientation pas assez mûrie pour certains étudiants et de difficultés académiques pour d'autres, les effectifs de deuxième et désormais troisième année sont de 260 étudiants répartis en 10 groupes de TD et 20 groupes de TP. L'équipe administrative est constituée de trois personnes et l'équipe technique de quatre. Les 60 enseignants hors vacataires sont répartis au sein de plusieurs équipes pédagogiques disciplinaires. Sur la base d'une structure annuelle d'emploi du temps de DUT/BUT, le responsable de l'emploi du temps gère les évolutions de cette structure et affecte les ressources de type «salle». L'affectation des ressources humaines est sous la responsabilité des équipes pédagogiques dont celle d'automatisme à laquelle j'appartiens.

Équipe d'automatisme GMP

Sur la plateforme Asimov d'automatisme et de robotique sur le site Villeurbanne Gratte-Ciel de l'IUT Lyon 1, l'équipe d'automatisme du département GMP assure désormais annuellement environ 1 800 heures d'enseignement au sein de quatre BUT (GMP, TCSI, GEII et Bio) et de quatre licences professionnelles (PAC, RAVI, MSI et MBI). Après une longue période de stabilité, la constitution de l'équipe a beaucoup changé en même temps que la crise du COVID et le déploiement du BUT GMP :

- 2006 à 2019, 2 enseignants, 1 enseignant-chercheur, et 2 à 4 vacataires avec exceptionnellement un ACE.

4. <https://certification.afnor.org/qualite/referentiel-national-qualite-decret-2019-formation-professionnelle>

5. <https://certification.afnor.org/qualite/engagement-de-service-qual-iut>

- 2019 à 2023, départ en retraite des 2 enseignants, recrutement de 2 nouveaux collègues
- depuis septembre 2023, recrutement d'un enseignant contractuel qui est par ailleurs responsable automatisation sur un site du groupe SEB. L'envie d'enseigner et l'accompagnement de ce projet par l'entreprise sont un bel exemple de liens très étroits entre une Université et une Entreprise en partageant une ressource humaine.

Il y a peu de sens à évoquer une activité quelle qu'elle soit sans d'abord préciser son contexte. Cela étant fait, la section suivante s'intéresse à l'évolution périodique de mes enseignements.

1.2 Adapter périodiquement mes enseignements

La répartition des enseignements s'effectuant au sein des équipes pédagogiques et afin d'assurer ceux relevant de l'équipe d'automatisme, mon service d'enseignement a évolué en fonction du contexte particulier de chaque année (ressources humaines, effectifs étudiants, évolution de l'offre de formation), comme représentée sur la figure 1.2.

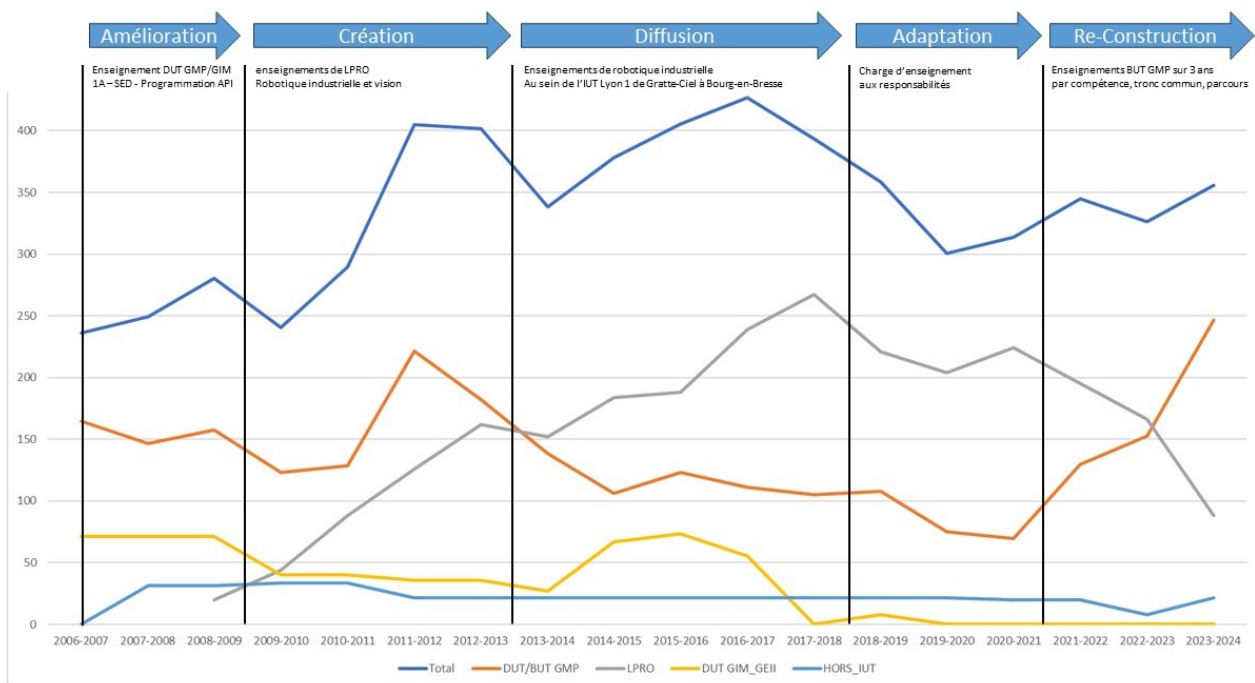


FIGURE 1.2 – Évolution de mon service d'enseignement

Si la constitution de l'équipe d'automatisme a été stable jusqu'en 2019, l'évolution de l'offre de formation a été très importante et a impacté mon service d'enseignement. Dans cette situation, réaliser un grand tableau avec la liste de tous mes enseignements n'aurait eu que peu de sens car il aurait été particulièrement indigeste à lire ! J'ai préféré une analyse de mes services d'enseignement depuis 2006, mettant en exergue cinq périodes avec leur spécificité décrite dans la suite de cette section.

Améliorer les enseignements d'automatisme en DUT 1A GMP & GIM

Cette première période de 2006 à 2009 a d'abord été celle de l'intégration au sein des départements GMP & GIM et des équipes pédagogiques. Lors de mon recrutement, j'intervenais dans quatre modules d'automatisme de première année dont les objectifs et les volumes horaires étudiants sont indiqués sur la figure 1.3. Pour ces quatre modules, j'ai repris seul les cours magistraux (CM) et souhaité intervenir également en TP ce qui n'était pas prévu en DUT GIM.

Mes apports pour ces enseignements ont d'abord été de développer les supports numériques pour les CM puis améliorer l'articulation entre les CM, TD et TP. Quelques exemples de ces supports réalisés sont consultables à

1.2. ADAPTER PÉRIODIQUEMENT MES ENSEIGNEMENTS

Diplôme	Semestre 1			Semestre 2				
	Objectif	CM	TD	TP	Objectif	CM	TD	TP
DUT GMP	Base de l'automatisme	3	6	6	Automatisme d'un poste de travail	5	12	12
DUT GIM	Automatisme combinatoire	9	9	0	Automatisme séquentiel	8	6	12

FIGURE 1.3 – Modules d'enseignement améliorés durant la première période.

l'adresse indiquée en note de bas de page ⁶. Au delà de ces supports, un projet déposé en 2008 pour les enseignements de DUT GMP ayant conduit à revoir l'organisation des modules et la plateforme de TP est présenté dans la section consacrée aux projets pédagogiques.

Créer des enseignements de robotique et vision industrielles

Avec l'ouverture en 2009 de la licence professionnelle en robotique industrielle dénommée initialement «Chargé d'Intégration en Robotique Industrielle - CIRI» et une implication dans la licence professionnelle «Ingénierie de Production», une seconde période de 2009 à 2013 a été consacrée à la création de nouveaux contenus pédagogiques de CM, de TD et TP dans le domaine de la robotique industrielle, de la vision industrielle, des interfaces homme-machine et enfin de la communication entre équipements industriels. La liste des modules créés est indiquée sur la figure 1.4 avec un volume d'heures étudiant pour chaque module sans détail de la répartition entre CM, TD et TP.

Diplôme	Modules créés	Heures étudiants
LPRO CIRI	Automatisme, développer et mettre ne service une application API	12
LPRO CIRI	Robotique, initiation à la programmation des robots Fanuc et Staubli	32
LPRO CIRI	Robotique, études d'avant-projet d'implantation d'une cellule robotisée	20
LPRO CIRI	Robotique, analyse d'une application existante par l'ingénierie système	8
LPRO CIRI	Robotique, introduction aux principes de la robotique industrielle	8
LPRO GP	Automatisme, démarche de programmation d'API	12
LPRO GP	Automatisme, développement d'IHM	8
LPRO GP	Automatisme, communication inter-équipements, protocole Modbus	4
LPRO GP	Informatique, bases des réseaux de communication	6

FIGURE 1.4 – Modules d'enseignement créés durant la seconde période de 2009 à 2013.

En effet, les effectifs de LPRO entre 16 et 24 alternants avec un seul enseignant par module offrent une plus grande liberté pédagogique d'organisation permettant durant une même séance de quatre heures d'alterner entre CM, TD et TP. Cette liberté d'organisation se traduit aussi par une évolution permanente des contenus en fonction de l'évolution des effectifs, des équipements de TP notamment et de la montée en compétence de l'enseignant! Plusieurs supports réalisés pour ces enseignements peuvent être consultés à l'adresse indiquée précédemment ⁷.

Diffuser l'enseignement de la robotique industrielle

Après cette période de création de nouveaux enseignements et face au développement de la robotique industrielle en France, la troisième période a été celle de la diffusion dans d'autres formations de l'IUT Lyon 1, et en dehors, de la robotique industrielle. En effet, l'équipe d'automatisme du département GMP étant la seule à disposer de compétences et d'une plateforme en robotique industrielle a été sollicitée pour intervenir dans d'autre formations dans les domaines de la maintenance (LPRO MSI et M2IAC), de l'informatique industrielle (DUT GEII), de l'agro-alimentaire (LPRO O2PA). Au delà des principes de la robotique, le contenu et l'organisation étaient adaptés à chaque formation au regard des métiers visés par la formation et du volume horaire du module. Par exemple en DUT GEII, un module optionnel de deuxième abordait en 32 heures le couplage entre robotique et vision. Alors que dans le domaine de l'agro-alimentaire, le module était plus consacré aux études de faisabilité et au choix de robots pour des applications dans ce secteur avec ses contraintes particulières. Pour la maintenance, le module apportait les connaissances nécessaires à la manipulation d'un robot et à l'impact potentiel des opérations de maintenance sur les applications de robotique. L'augmentation de mon service d'enseignement induit par ce besoin de diffusion devait s'arrêter.

6. <https://box-ng.univ-lyon1.fr/s/E2m9yG5nnWeTsAE>

7. <https://box-ng.univ-lyon1.fr/s/E2m9yG5nnWeTsAE>

Adapter ma charge d'enseignement à mes responsabilités

La responsabilité de la direction du département GMP prise en 2018 a nécessité une adaptation de mon service d'enseignement me permettant de conjuguer enseignement, recherche et la fonction de chef de département GMP avec le management des équipes administratives, techniques et pédagogiques. En m'assurant toujours de la transition avec un collègue, mes interventions se sont arrêtées en DUT GIM et en DUT GEII tout en réduisant mes interventions en DUT GMP et au sein des différentes licences professionnelles. Ainsi sur trois ans, ma charge d'enseignement a diminué de plus d'une centaine d'heures tout en assurant la continuité des modules.

Construire les enseignements d'automatisme de BUT GMP

La cinquième et dernière période concerne le déploiement du BUT GMP avec la première promotion recrutée en 2021 qui sera diplômée en 2024. Actuellement encore en phase de construction des enseignements de troisième année, cette période va se poursuivre quelques années par une phase d'amélioration. Pour l'automatisme comme illustré sur la figure 1.5, la réforme du BUT a conduit à une refonte complète des enseignements dans le cadre d'une approche par compétence, avec une répartition des enseignements sur trois ans, et avec des parcours d'ouverture vers les enjeux industriels. Au delà du référentiel de compétences, l'approche par compétence s'est traduite dans le référentiel de formation par la distinction entre d'une part les apprentissages des connaissances et savoir-faire apportés par les «ressources», et d'autre part les SAE⁸ pour l'application des connaissances et des savoir-faire dans le contexte d'une mission en entreprise. Par nature, une SAE implique plusieurs équipes pédagogiques indiquées dans le tableau 1.5 pour les SAE dans lesquelles l'équipe d'automatisme est impliquée. Basée sur des 4 à 5 compétences majeures avec des ressources et des SAE, cette approche par compétence apporte une vision globale au diplôme tout en décloisonnant les disciplines par les SAE. Cela contribue à donner du sens aux étudiants et espérons le à contribuer à la réussite des étudiants.

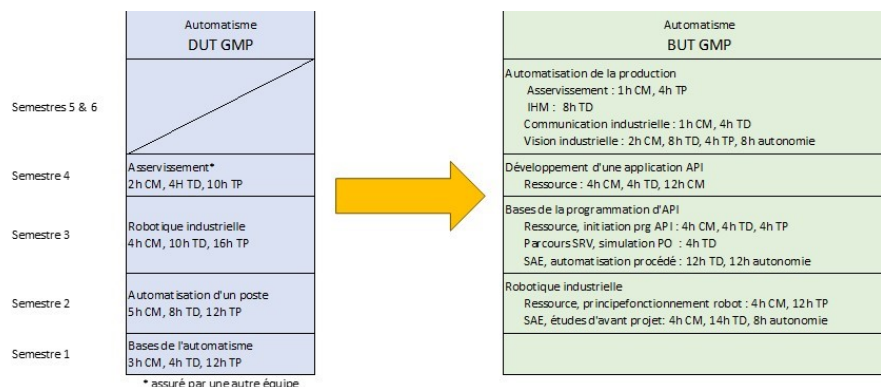


FIGURE 1.5 – Du DUT au BUT, évolutions de l'enseignement de l'automatisme industriel.

Le Programme Pédagogique du BUT GMP dont j'ai été particulièrement impliqué dans la rédaction en tant qu'animateur de plusieurs groupes de travail nationaux (cf. chapitre 2) fixe deux tiers des contenus et des volumes horaires. Le tiers restant est donc défini localement au regard du contexte socio-économique régional. Au delà de mon action nationale présentée dans le chapitre suivant et en raison du renouvellement complet de l'équipe d'automatisme durant la période de définition de la nouvelle maquette, j'ai géré la définition de la nouvelle progression pédagogique d'automatisme en BUT GMP à l'IUT Lyon 1 représentée sur la figure 1.5. Basé sur une expérience de plus de dix ans d'enseignement en DUT et LPRO, de très nombreuses visites d'entreprises au travers le suivi de stagiaires et d'alternants, des projets pédagogiques présentés dans ce chapitre et de mon activité de recherche dans le domaine de l'industrie 4.0 et des Systèmes Cyber-Physique, la volonté a été de se projeter vers une progression amenant les futurs diplômés de BUT GMP à être apte à comprendre les multiples facettes de l'automatisation auxquelles ils seront confrontés dans les métiers de la conception de machines spéciales, d'industrialisation et d'organisation industrielle dans tous les secteurs. Au sein de cette structure prévue sur les trois années, l'équipe d'automatisme mène depuis début 2021 un travail titanesque de développement des contenus et de mise en œuvre sur les aspects théoriques et pratiques aussi bien logiciels que matériels. Depuis 2021, je

8. Situation d'Apprentissage et d'Évaluation

1.3. EXERCER DES RESPONSABILITÉS PÉDAGOGIQUES

serai intervenu sur l'ensemble des modules de cette progression sauf celui du parcours «Manager les Processus Industriels».

Le réseau national des départements GMP devra ensuite permettre de partager entre les équipes d'automatisme pour enclencher un cercle vertueux d'amélioration et à plus long terme préparer la rédaction du prochain programme national. Après cette section consacrée à mes enseignements dont des éléments complémentaires figurent sur la frise chronologique de synthèse page 29, la section suivante est consacrée à mes responsabilités pédagogiques.

1.3 Exercer des responsabilités pédagogiques

Mes responsabilités pédagogiques sont détaillées sur la frise chronologique de synthèse 29. Cette section apporte quelques précisions sur chacune de ces responsabilités sans toutefois les détailler pour éviter une lecture fastidieuse.

Gérer des modules et des UE

La responsabilité d'un module et d'une UE est de s'assurer de leur organisation tant du point de vue ressource humaine de la répartition à l'affectation sur le logiciel d'emploi du temps, que des aspects plus pratique comme l'organisation des évaluations jusqu'aux photocopies pour les TD et TP. Cette responsabilité couvre également le suivi de la saisie de toutes les notes dans le respect du délai fixé par le responsable de la formation pour la préparation des jurys. Ces missions parfois très administratives pour des UE ou module avec des forts effectifs sont indispensables au bon déroulement des enseignements.

Coordonner l'équipe d'automatisme

La coordination de l'équipe d'automatisme prise en charge de 2007 à 2022 vise plus particulièrement à assurer les échanges avec la direction du département GMP et pour certains projets avec la direction de l'IUT. Elle concerne d'une part les aspects budgétaires de la préparation du budget prévisionnel en fonctionnement et en investissement jusqu'au suivi et aux demandes exceptionnelles, et d'autre part les ressources humaines avec la gestion des vacances de leur recrutement à leur paiement ainsi que la gestion des campagnes d'emplois pour les demandes de renouvellement et de création de postes permanents. Avec deux départs en retraite, en 2019 et 2022, et la création d'un poste d'enseignant contractuel en 2023, cet aspect ressource humaine a concerné plus particulièrement la fin de cette responsabilité. Cette coordination a été d'autant plus simple de 2018 à 2022 en étant chef de département GMP !

Développer les plateformes de TP

Depuis mon recrutement en 2006, la volonté a été de développer d'abord la plateforme de TP d'automatisme du département GMP sur laquelle j'intervenais. La figure 1.6 illustre l'évolution des équipements de cette plateforme de la programmation en liste d'instructions sur les automates Texax Instrument 164 jusqu'à l'achat de sept écrans tactiles industriels pour le module Interface Homme-Machine de troisième année de BUT GMP. J'ai en particulier géré la définition des besoins et les demandes de financement pour ces équipements puis participé avec les équipes, pédagogique et technique, à leur intégration pédagogique.

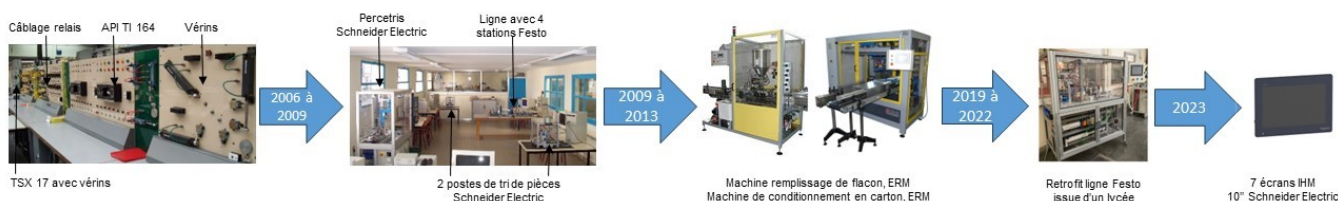


FIGURE 1.6 – Évolution des équipements de la plateforme de TP d'automatisme de 2006 à 2023.

Ayant porté dès 2008 le dossier de création d'une licence professionnelle en robotique industrielle, j'ai en parallèle identifié des besoins d'investissements qui se sont concrétisés par la création de la plateforme Asimov

commune à plusieurs départements. La figure 1.7 représente l'évolution du parc de robots qui était composé en 2006 d'un robot Kuka avec un contrôleur AFMA Robot et un robot Puma 500 d'Unimation. J'ai là aussi gérer ces investissements comme cela est précisé dans la section suivante consacrée aux projets.

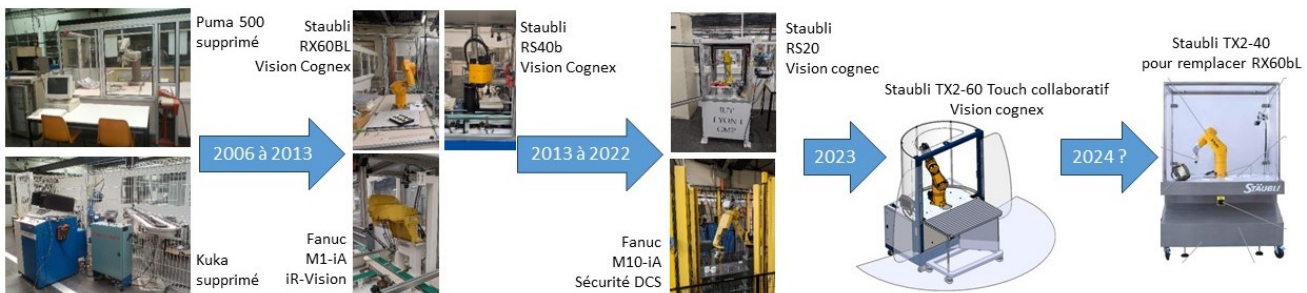


FIGURE 1.7 – Évolution des équipements de la plateforme de TP de robotique de 2006 à 2023.

Le développement de ces deux plateformes de TP a nécessité de nouveaux espaces mieux adaptés pour intégrer l'ensemble des nouveaux investissements. L'arrivée des nouveaux équipements a donc été accompagnée de quatre déménagements ayant amené à la configuration actuelle illustrée sur la figure 1.8.

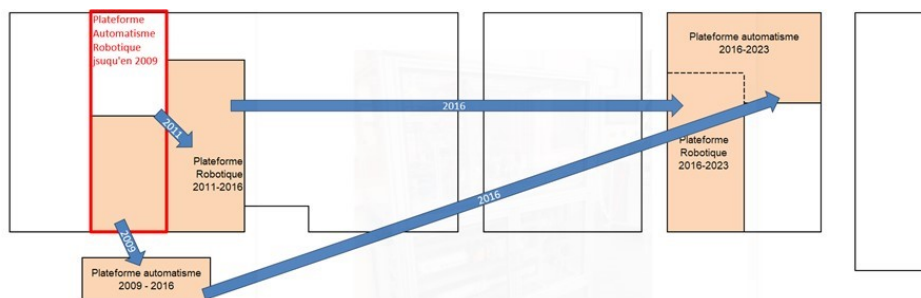


FIGURE 1.8 – 4 déménagements pour adapter les plateformes TP aux besoins pédagogiques.

Ma première mission a été de trouver de nouveaux espaces, définir les implantations et l'ensemble des réseaux associés (électrique, réseau et air comprimé) en relation avec le service travaux de l'IUT, le service informatique et l'équipe technique du département GMP. Le déménagement des équipements a été assuré en interne par l'équipe d'automatisme et l'équipe technique.

L'ensemble de ces investissements pédagogiques et des travaux ont nécessité des financements obtenus par des projets pédagogiques collaboratifs.

Construire des projets pédagogiques collaboratifs

Chaque projet indiqué sur la frise chronologique de synthèse page 29 ne sera pas détaillé afin d'éviter au lecteur une lecture fastidieuse. Il sera juste fait un focus sur les sources de financement. De 2007 à 2009, le projet pédagogique d'automatisme de 65 000 € a été financé dans le cadre des investissements annuels du département GMP sur la base d'un projet pédagogique d'évolution des modules d'automatisme. Le développement de la plateforme de robotique a nécessité un financement plus conséquent de 450 000 € obtenu via des co-financements de l'Université, de l'IUT et du département GMP. De 2009 à 2013, l'obtention de ces financements résulte de plusieurs facteurs : un projet avorté avec la société Festo qui a eu le mérite de mobiliser des décideurs, la création de la licence professionnelle en robotique industrielle soutenue par le président du conseil de l'IUT et la volonté de porter ce projet.

Les deux projets internationaux MIRA financés par la région ont conduit à des investissements en automatisme et en robotique au sein de l'Université de Nong Lam à Ho Chi Min. L'investissement de l'équipe d'automatisme dans ces deux projets jusqu'à la formation au Vietnam des collègues a aussi favorisé le soutien de la direction du département GMP aux demandes de financements complémentaires en automatisme et robotique.

Le projet ActiveRobotec porté par le CETIM et le pôle de compétitivité Via Méca a été lauréat d'un financement FEDER qui a donné lieu à l'organisation de la réunion officielle de lancement. Une subvention de 60 000 € devait

1.4. ACCOMPAGNER ET SUIVRE DES ÉTUDIANTS

être attribuée à l'IUT Lyon 1. Mais, les conventions n'ont jamais été signées avec les partenaires au détriment d'une autre action jugée plus prioritaire à l'époque. Cette expérience confirme donc le dicton concernant la peau de l'ours⁹ !

Durant quatre ans de 2014 à 2018, une collaboration a été développée avec le CEA pour des essais de faisabilité en robotique industrielle dans le cadre des projets tuteurés de seconde année de DUT GMP. Ces projets ont mené à des pré-études et des essais réels avec le robot M10-iA pour lequel un préhenseur et des éléments périphériques ont été développés par les étudiants. Durant ces quatre années, j'ai assuré la gestion des contrats avec le CEA et l'encadrement des étudiants avec deux autres collègues.

Enfin en tant que chef de département GMP et après des premières discussions en 2018 d'investissement pour un centre d'usinage vertical à commande numérique, il est apparu un besoin plus globale de renouvellement du parc de machines d'usinage à commande numérique. Au regard du financement nécessaire initialement envisagé d'environ 500 000 €, les échanges pendant plusieurs années avec la direction de l'IUT ont conduit début 2022 au dépôt du projet FAFDIP¹⁰ dans le cadre de l'AMI national «Territoires d'industrie 4.0 : anticiper les compétences de demain». Lauréat en juin 2022 d'une subvention de 450 000 € HT de la BPI¹¹, le projet FAFDIP représente 1,1 million d'euros TTC¹² d'investissement sur une période de deux ans avec un co-financement apporté par l'IUT et l'Université. D'une envergure plus grande, ce projet FAFDIP accompagne la nouvelle offre de formation du département GMP avec un BUT en trois ans et l'ouverture de cinq parcours, et le maintien de six licences professionnelles. Complété par deux subventions d'investissement d'environ 250 000 € au total obtenues en 2023 auprès de l'OPCO 2i au titre du CFA Lyon 1, les investissements de 2022 et 2024 durant la période d'éligibilité des dépenses du projet FAFDIP concerneront plusieurs équipes pédagogiques :

- Industrialisation en usinage : 3 tours CN, 2 centres d'usinage CN, 1 découpe laser métallique, 2 bras de métrologie avec un scan 3D haute résolution.
- Industrialisation en tôlerie : une plieuse électrique à commande numérique.
- Industrialisation en soudage : un robot collaboratif de soudage et un casque de réalité virtuelle pour la validation d'installation de soudage.
- Conception : des casques de réalité virtuelle pour les revus de projet, une salle Innov 3D pour le prototypage dans le cadre du parcours de BUT GMP «Innover pour l'Industrie».
- Robotique : 1 cellule complète avec un robot collaboratif, et des robots collaboratifs pour remplacer ceux existants.
- Automatisation : des casques de réalité augmentée pour le développement d'application dans le cadre du parcours de BUT GMP «Digitaliser» et pour être utilisés en enseignement de robotique en BUT GMP 1A.

Étant porteur du projet FAFDIP et au regard des contraintes financières et administratives pour assurer la gestion de ce projet couplé avec le projet CIGMP23 déposé auprès l'OPCO 2i, j'assure jusqu'en 2024 la gestion de ces investissements en collaboration avec la cheffe du département GMP qui m'a succédé.

Suite à cette section consacrée à la présentation de mes responsabilités pédagogiques, la section suivante aborde l'accompagnement et le suivi des étudiants.

1.4 Accompagner et suivre des étudiants

Au delà des enseignements, l'accompagnement et le suivi des étudiants s'effectuent dans le cadre de projets tuteurés en DUT GMP 2A et BUT GMP 3A, de suivis de stagiaires et d'alternants. L'implication dans ces activités apparaît sur la frise chronologique de synthèse page 29 au travers du nombre d'étudiants accompagnés et suivis chaque année. Afin de compléter cet aspect quantitatif, cette section vise à apporter des compléments qualitatifs.

Encadrer des projets DUT GMP 2A et BUT 3A

Dans le cadre du DUT GMP, chaque étudiant devait participer au sein d'une équipe à un projet tuteuré en seconde année qui représentait environ 200 heures de travail sur l'année. Au regard des métiers visés par la formation dans les domaines de la conception, de l'industrialisation et de l'organisation industrielle, les sujets proposés par les enseignants et parfois des étudiants étaient très variés de la conception à la réalisation d'engins agricoles, à

9. Il ne faut pas vendre la peau de l'ours avant de l'avoir tué

10. Former pour Accélérer, Fiabiliser et Digitaliser l'Industrialisation 4.0 de Pièces et apporter les compétences aux territoires d'industrie de la région Auvergne-Rhône-Alpes

11. Banque Public d'Investissement

12. Pour leur activité pédagogique, les Universités payent TTC

l'organisation d'actions dans le cadre de la cordée de la réussite Optim avec des lycées et des collègues. La trentaine de projets que j'ai encadré parfois en binôme avec un collègue a aussi porté sur des sujets variés et impliqué 127 étudiants de DUT GMP et GIM : développement d'un banc didactique pour l'automatisme, essais de faisabilité en robotique en partenariat avec le CEA, conception et réalisation de pièces pour une application de robotique en partenariat avec la startup Paint'Up, création d'animations et participations au mondial des métiers et à la fête de la science, développement d'applications de réalité augmentée, etc.

En fonction des périodes, des réunions de suivi avaient lieu quasiment chaque semaine afin d'accompagner les étudiants de la phase d'analyse des besoins et de formalisation des spécifications, à la phase de recherche de solution et ensuite de réalisation. Ces projets sont l'occasion de découvrir les étudiants dans un autre contexte et de voir leur capacité à travailler au sein d'un groupe en étant acteur de leur projet. Ces projets mettent aussi en évidence d'autres compétences : autonomie, réactivité, créativité et communication notamment. Cependant, l'évaluation de ces compétences qui sont pourtant de vrais atouts professionnellement restent délicate et notamment par des équipes pédagogiques ayant majoritairement une formation scientifique et technique.

Les projets en troisième année de BUT GMP auront lieu pour la première fois cette année en janvier et février dans le cadre des cinq parcours. D'un volume horaire plus faible, leur organisation concernant au maximum deux groupes TD au sein d'un même parcours sera également différente avec des sujets liés au parcours et donc moins variés. J'encadrerai des projets de développement d'applications de réalité augmentée dans le cadre du parcours «digitaliser».

Suivre des stagiaires

Depuis mon recrutement comme mentionné sur la frise chronologique de synthèse page 29, j'ai toujours assuré le suivi de stagiaires en seconde année de DUT GIM et GMP, et désormais de BUT GMP. L'accompagnement de l'étudiant durant ses dix semaines de stage vise d'abord à s'assurer du bon déroulement de son stage (intégration dans l'entreprise, sujet en adéquation avec la formation, suivi au sein de l'entreprise) et d'apporter une aide pour la préparation du rapport et de la soutenance. La rencontre avec le tuteur entreprise et le stagiaire est aussi un moment important d'évaluation bien évidemment du travail réalisé mais surtout du comportement général de l'étudiant peu habitué à certains retours. La visite sur le lieu du stage est enfin l'occasion pour moi de mieux connaître le tissu industriel régional, 90 suivis de stage et quasiment autant d'entreprises découvertes !

Accompagner des alternants

Les 94 alternants accompagnés sont majoritairement des étudiants des licences professionnelles RAVI¹³ et GP¹⁴. Avec 100% d'alternants en troisième année de BUT GMP dès la première promotion cette année, j'accompagnerai désormais aussi des alternants de BUT GMP. Cet accompagnement se déroule durant toute la durée du contrat et en pratique de la première semaine de formation jusqu'à la soutenance finale en septembre pour les LPRO et en juillet pour les BUT. Durant une année, les échanges avec l'alternant et son entreprise sont plus nombreux et conduisent notamment à deux visites au sein de l'entreprise. Avec plusieurs bilans réalisés en entreprise, l'alternant connaît ses points d'amélioration et les efforts à fournir. Il peut mesurer sa progression au cours de l'année. Si les difficultés sont rares dans le cadre des stages, elles sont globalement plus nombreuses à gérer notamment pour celles et ceux dont cette année alternance constitue la première expérience significative en entreprise. Exceptionnellement, il s'avère malheureusement nécessaire de gérer une rupture de contrat. Par ailleurs, cette année d'alternance est parfois aussi révélatrice de difficultés d'expression écrite et orale par un manque de pratique antérieure mais avec le plus souvent une progression remarquable durant l'année d'alternance.

Après cette brève section sur l'accompagnement et le suivi des étudiants, la section suivante aborde mes actions pour la promotion de l'industrie, de l'IUT Lyon 1 et de l'automatisme.

1.5 Promouvoir l'Industrie, l'IUT Lyon 1 et l'automatisme

Entre 1970 et 2020, la France est le pays européen qui s'est le plus désindustrialisé, avec une perte de 2,5 millions d'emplois industriels depuis 1974. Cette chute est concomitante avec la chute de la part de l'industrie manufacturière dans la valeur ajoutée de l'ensemble de l'économie, qui est passée de 25% en 1961 à 11% en

13. LPRO RAVI - Robotique, Automatisme et Vision Industriels

14. LP RO GP - Génie de la Production

2010. Si l'industrie et ses métiers jouissaient d'une forte attractivité, cela a considérablement changé entre les années 1980 et 2000. Mais aujourd'hui et en particulier dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, les projections à dix ans font état d'un besoin considérable de ressources humaines dans le domaine industriel qui a déjà actuellement des difficultés à recruter à tous les niveaux de formation. Cette section présente donc les actions menées pour la promotion de l'industrie, de l'IUT Lyon 1 et de l'automatisme.

Aider à l'orientation des lycéens

L'orientation des lycéens est un très vaste champs auquel l'IUT et ses personnels peuvent contribuer modestement dans la limite de leur capacité, notamment humaine. Mes principales actions personnelles sont résumées sur la frise chronologique de synthèse page 29.

De mon expérience professionnelle et personnelle sur ce sujet de l'orientation, il en ressort aujourd'hui l'analyse suivante. Quand certains domaines de formation comme celui de la santé sont présentés aux lycéens de manière globale comme un et un seul secteur professionnel, les formations aux métiers de l'industrie¹⁵ sont aux mieux présentées de manière éparpillée (une école par là, un institut par si, un CFA par ailleurs), au pire totalement absentes des actions d'orientation organisées par les lycées ne sachant certainement pas identifier un représentant de ce secteur face à une myriade de prétendants qui sont par ailleurs bien incapable d'assurer une intervention dans chaque lycée. Un peu comme les fédérations sportives qui cherchent à avoir une base la plus large possible de pratiquants pour faire émerger des élites, une stratégie commune coordonnée à l'ensemble des formations aux métiers de l'industrie serait de nature à améliorer la visibilité de ce secteur professionnel et donc l'attractivité des formations. Ceci est un vrai déficit avec des formations relevant de différentes organisations indépendantes et sans action politique facilitatrice. Régionalement, les actions en cours ne sont pas de nature à engager cette convergence. Ceci constitue un bel exemple de système multi-agents autonomes ne faisant pas émerger un comportement global performant comme cela sera évoqué au chapitre 4.

Vulgariser l'automatisme et la robotique auprès du grand public

Les actions de vulgarisation auprès du grand public des métiers industriels et en particulier de l'automatisme concernent plusieurs participations au mondial des métiers à Eurexpo durant quatre jours sur le stand de la métallurgie, des participations à la fête de la science avec la création de deux animations en robotique industrielle durant les trois jours du village des sciences sur le site Doua de l'IUT Lyon 1, et dernièrement l'organisation sur le site Villeurbanne Gratte-Ciel des sélections régionales des Worldskills en mécatronique suivi de l'accompagnement pour la finale nationale en septembre 2023 de notre équipe constituée de deux alternants de LPRO RAVI. Les périodes de ces actions sont indiquées sur la frise chronologique de synthèse page 29. Ces actions très importantes de vulgarisation auprès du grand public des métiers de l'industrie se heurtent à la limite de nos capacités humaines notamment pour des actions se déroulant le week-end.

Participer aux événements industriels et d'experts

Enfin, ma contribution à la promotion de l'industrie, de l'IUT Lyon 1 et de l'automatisme passe par des interventions dans des événements professionnels avec des conférences et la tenue de stands figurant sur la frise chronologique de synthèse page 29. Au delà de l'aspect promotion, ces événements sont aussi l'occasion de développer des relations avec des partenaires socio-économiques.

Après cette présentation des actions de promotion, la dernière section de ce chapitre est consacrée à la digitalisation de mon activité pédagogique.

1.6 Digitaliser l'enseignement

Dans le contexte actuel de digitalisation de tous les secteurs de la société, celui de l'enseignement est pleinement concerné tant d'un point de vue des dispositifs d'apprentissage que des contenus enseignés. Cette dernière section de ce chapitre consacrée à l'activité pédagogique dresse un bilan des actions relatives à la digitalisation

15. Pour être moins réducteur mais plus flou, il peut être évoqué les métiers techniques et scientifiques

Développer l'hybridation via une plateforme pédagogique

La première de ces actions concerne ce qui est aujourd'hui dénommée l'hybridation entre d'une part des temps de face à face enseignant et étudiants, et d'autre part des temps de travail en autonomie avec l'aide de ressources numériques pour accompagner et renforcer les apprentissages. Si la crise sanitaire liée au COVID a accéléré l'usage des outils numériques, elle aura aussi montré les limites d'un apprentissage sans présentiel et apporté un argument aux détracteurs de l'hybridation. Au delà de l'aspect purement technique, l'hybridation se heurte toutefois à deux freins majeurs : la capacité de travail en autonomie d'une certaine frange d'étudiants à laquelle j'ai certainement appartenu, et le statut des enseignants fixant un service statutaire en heures devant étudiants. Sans distinction des étapes de conception, d'industrialisation et de production dans une approche de gestion du cycle de vie des activités pédagogiques, un frein statutaire persistera encore longtemps. Étant hors de mon champ d'action, ces limites ne seront pas discutées davantage.

Concernant les aspects plus techniques, l'Université Lyon 1 a disposé très tôt d'un service dédié à ces aspects numériques. Unique en France tant par son envergure que par ses innovations et ses succès sur le terrain, iCAP est le service commun de pédagogie numérique de l'établissement¹⁶. ICAP est au service des équipes pédagogiques de l'établissement pour contribuer à améliorer la qualité des enseignements et la réussite des étudiants. Dans ce contexte comme mentionné sur la frise chronologique de synthèse page 29, j'ai utilisé les plateformes pédagogiques successives de l'Université Lyon 1 : Spiral de 2006 à 2010, puis Spiral Connect de 2010 à 2017 et enfin Claroline connect jusqu'en 2022. Les difficultés à développer et maintenir une plateforme pédagogique spécifique ont amené l'Université Lyon 1 à adopter la plateforme Moodle en 2022 que je n'ai pas encore eu le temps d'exploiter.

Au delà des plateformes pédagogiques, les outils numériques offrent d'autres possibilités d'organisation et d'activité lors des séances de TD et TP.

Virtualiser un système automatisé pour apprendre en autonomie

L'utilisation en TP de systèmes réels reste indispensable aux étudiants pour visualiser certains phénomènes et appréhender physiquement des concepts. Mais, le recours à des outils numériques permet d'envisager différemment des séances de TD et de TP. Cette approche s'applique à l'enseignement de l'automatisme qui nécessite de pouvoir simuler d'une part une partie physique constituée à minima de produits et d'actionneurs avec leur effecteur et d'autre par une partie cyber pour contrôler la partie physique, comme par exemple un automate programmable industriel (API) avec un écran tactile d'une Interface Homme-Machine (IHM). Ainsi depuis 2006, les outils numériques ont d'abord offert des interfaces de programmation plus conviviales, passage en 2007 du logiciel PL7-2 au logiciel Automgem, jusqu'à offrir la possibilité d'émuler des contrôleurs industriels avec le passage en 2009 aux logiciels Unity Pro et Vijéo Designer de Schneider Electric respectivement pour la programmation des API et des IHM. L'émulation des contrôleurs a permis par exemple une initiation commune au logiciel Unity Pro pour tous les étudiants sans nécessité une machine réelle par étudiant jusqu'à des séances de TD de formation à la programmation d'IHM et d'analyse de la communication inter-équipements sans nécessiter un API et une IHM par binôme.

En effet, ces logiciels sont prévus pour simuler la partie cyber d'un système automatisé et de manière un peu détournée et assez simpliste de créer un simulateur en 2D de la partie physique. Afin d'améliorer la simulation de la partie physique en 3D avec des interactions mécaniques réalistes entre les éléments (produits, actionneurs, effecteurs), le logiciel Factory IO de simulation de partie physique a permis en 2022 dans le cadre de la seconde année de BUT GMP la mise en place d'une SAE¹⁷ avec des séances de TD encadrées et des séances en autonomie permettant aux étudiants de travailler sans risque pour eux et les équipements. Les travaux pratiques qui précèdent cette SAE restent eux sur des systèmes réels pour acquérir les bases de l'automatisme industriel. La première difficulté de l'enseignement de l'automatisme avec un papier et un crayon en TD reste la capacité d'abstraction pour comprendre le fonctionnement d'une partie physique à contrôler. Avec une représentation statique sur une feuille, la seconde difficulté est la capacité à visualiser dans sa tête les évolutions au cours du temps du système physique et du système cyber tous deux en interactions. L'usage des outils de simulation numérique permet de lever ses barrières afin d'aborder les bases de l'automatisme avant d'avoir la capacité à spécifier le comportement attendu d'une machine. Un système automatisé qui n'intègre pas de robot se compose de nombreux actionneurs avec un seul degré de liberté dont les mouvements doivent être coordonnés au cours du temps. La simplicité des mouvements bien que parfois extrêmement nombreux amène les industriels à très peu recourir à la simulation du système physique, à quelques exceptions qui pourraient se généraliser à l'avenir. En revanche pour un «super actionneur» tel un robot avec des mouvements complexes dans l'espace en 3D, les outils de simulation sont très présents industriellement.

16. <https://icap.univ-lyon1.fr/>

17. Situation d'Apprentissage et d'Évaluation

Simuler un robot et une caméra pour optimiser les investissements

Si disposer pour chaque étudiant d'un API avec une réelle partie physique ayant des actions sur des produits a déjà un coût difficile à justifier, quelques milliers d'euros par système automatisé, disposer pour chaque étudiant d'une cellule robotisée est totalement déraisonnable au vu du coût de quelques dizaine de milliers d'euros par cellule. Heureusement comme évoqué précédemment, la complexité des mouvements d'un robot industriel avec six ou quatre axes a amené les fabricants de robots à proposer des logiciels de simulation intégrant la partie cyber et la partie physique. En 2006 en DUT GMP, les étudiants programmaient sur ordinateur et devaient passer ensuite individuellement sur le robot PUMA ou KUKA pour tester leur programme, ce qui laissait très peu de temps à chaque étudiant pour tester son programme puis le corriger. Avec l'ouverture de la licence professionnelle en robotique industrielle et les investissements évoqués précédemment, les logiciels de simulation ont été introduits comme mentionné sur la frise chronologique de synthèse page 29. Nous disposons aujourd'hui des logiciels SRS 2022 et Roboguide V9 respectivement pour les robots Staubli et Fanuc.

Enfin en 2013 avec la création d'un module de vision industrielle pour la LPRO RAVI et l'achat de deux caméras Cognex, l'enseignement a été facilité par l'usage du logiciel de programmation de ces caméras qui intègre un émulateur de caméra. Les caméras réelles restent toutefois nécessaires pour les prises d'images et pour l'enseignement de la calibration des caméras qui reste un point délicat de la mise en œuvre de cette technologie.

Ainsi, les outils de simulation offrent des nouvelles solutions pédagogiques. Cependant, il reste parfois pour les étudiants des difficultés à appréhender des concepts associés à des éléments invisibles sur le système réel même si les outils de simulation permettent de les visualiser sur un écran à une échelle différente. Afin de répondre à cette problématique pédagogique et de former à une technologie naissante dans l'industrie, la réalité augmentée fait son entrée dans les enseignements de BUT GMP à l'IUT Lyon 1.

Voir l'invisible avec la réalité augmentée pour mieux comprendre

A partir de dispositifs de visualisation tels qu'un smartphone ou des lunettes spécifiques, la réalité augmentée permet de superposer sur une image réelle des éléments virtuels. Les filtres Snapchat sont le parfait exemple pour les plus jeunes. Un autre exemple est la possibilité de visualiser virtuellement dans son salon ou sa chambre du mobilier et des décorations avant de les acheter. Cette technologie est aujourd'hui naissante dans l'industrie avec toutefois quelques limitations techniques qui devraient disparaître à terme comme l'autonomie ou la charge sur la tête que représente le casque de visualisation. En revanche, les usages et les bénéfices de cette technologie sont déjà bien identifiés industriellement pour l'assistance : aux opérations manuelles de production et de maintenance, la conduite de machine, les contrôles qualités notamment. Cette technologie offre également pédagogiquement de belles perspectives pour permettre aux étudiants de voir l'invisible afin de mieux comprendre les concepts enseignés : visualiser en temps réel des déformations sur une pièce, voir les repères des machines à commande numérique d'usinage comme des robots, assister les étudiants aux manipulations en travaux pratiques. Cependant, l'enseignement nécessite de pouvoir développer à bas coûts des applications de réalité augmentée faciles à adapter aux évolutions des besoins pédagogiques.

La première expérience a été menée dans le cadre d'un projet tuteuré de DUT GMP en 2017-2018. Avec le moteur Unity de jeu multi-plateforme et le plugin Vuforia Engine, cette première expérience fut un échec ! Ces outils requièrent des compétences en informatique et sont inadaptés pour des étudiants en génie mécanique. Après cet échec et une recherche de solution plus adaptée aux compétences des étudiants et aux miennes, la solution Vuforia Studio proposée par l'éditeur américain PTC du logiciel de CAO CREO a été retenue. Pour pénétrer le marché de l'industrie, PTC a considéré que la réalité augmentée devait être une flèche de plus à l'arc des personnels des services de conception, d'industrialisation et d'organisation industrielle. Le logiciel Vuforia Studio rend donc accessible le développement d'application de réalité augmentée à des personnes avec des compétences en génie mécanique. Dès les projets tuteurés l'année suivante en 2018-2019 et les deux années suivantes, les résultats obtenus étaient plus que remarquables pour des développements réalisés par des étudiants de seconde année de DUT. Fort de cette expérience et l'achat de quatre casques HoloLens 2 de Microsoft, les premiers enseignements de la réalité augmentée auront cette année en troisième année de BUT GMP dans le cadre du parcours Digitaliser. L'objectif est aussi de mettre à jour et finaliser les applications sur les robots pour utiliser cette technologie dans les enseignements de robotique industrielle en seconde année de BUT GMP.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré à la présentation de mon activité pédagogique. Après avoir introduit mes conditions d'exercice du métier d'enseignant-chercheur, mes contributions majeures en enseignement ont été décrites à travers cinq périodes distinctes depuis 2006 montrant l'adaptation de mes enseignements à un contexte pédagogique qui évolue. Mes actions d'accompagnement et de suivis des étudiants ont été brièvement retracé à travers l'encadrement de projets tuteurés, le suivi de stagiaires et l'accompagnement d'alternants. Face à une attractivité des métiers de l'industrie en inadéquation avec les opportunités de carrière, la nécessité de leur promotion ainsi que celle de l'IUT Lyon 1 m'a conduit à m'impliquer dans des différentes actions présentées dans la section suivante. Enfin, la digitalisation progressive de mon activité pédagogique est dépeinte dans la dernière section de ce chapitre.

Année	...2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Statut	ATER INPG	MCF - Université Lyon 1																				

Adapter ses enseignements	Période	1 ^{ère} période Amélioration enseignements DUT GMP 1A Programmation API & technologie			2 ^{ème} période Création enseignements LPRO Robotique industrielle & vision				3 ^{ème} période Diffusion des enseignements de robotique au sein de l'IUT Lyon 1 de Gratte-Ciel à Bourg-en-Bresse					4 ^{ème} période Adaptation de la charge d'enseignement aux responsabilités			5 ^{ème} période Construction enseignements BUT sur 3 ans et par compétence					
	Formations	DUT GMP & GIM 1A			DUT GMP & GIM 1A LPRO CIRI & GP				DUT GMP 1A & 2A, DUT GIM 1A & 2A DUT GEII 2A, module optionnel robot & vision LPRO RAVI, GP, MSI, M2IAC, O2PA					DUT GMP 1A & 2A LPRO RAVI, GP, MSI, M2IAC, O2PA			BUT GMP 1A, 2A & 3A tronc commun et parcours CPD & SRV LPRO RAVI, PAC et M2IAC					
	UE/Module	GMP, Modules autom., S1/S2, 312 étu. GIM, Modules autom., S1/S2, 104 étu.			DUT GMP, Modules autom., S1/S2, 312 étu. DUT GIM, Modules autom., S1/S2, 104 étu. LPRO CIRI, plusieurs module et toutes UE, 16 étu. LPRO IP/GP, module automatisme, 24 étu.				DUT GMP, Modules autom., S1/S2, 312 étu. DUT GIM, Modules autom., S1/S2, 104 étu. GIM, modules supervision et réseau, S4, 78 étu. LPRO CIRI/RAVI, plusieurs modules et toutes UE, 32 étu. LPRO IP/GP, module automatisme, 24 étu. LPRO MSI, M2IAC, O2PA, module robotique, 90 étu.					DUT GMP, Modules autom., S1/S2, 312 étu. (fin en 2021) en 2021, BUT GMP, ressource/SAE robotique, S2, 312 étu en 2022, BUT GMP, ressource/SAE automatisme S3/S4, 260 étu. LPRO RAVI, plusieurs modules, 32 étu. LPRO GP, module automatisme, 24 étu. LPRO MSI, M2IAC, O2PA, module robotique, 90 étu.			BUT GMP parcours SRV, module RA, S5/S6, 24/48 étu. LPRO PAC, module automatisme, 16 étu. LPRO M2IAC, module robotique, 24 étu.					
	Equipe	équipe d'automatisme du dpt GMP : 2 enseignants, 1 enseignant-chercheur, 2 ou 3 vacataires chaque année gestion départ retraite & intégration nouveau collègue pour les 2 postes d'enseignant (2019 et 2022), création d'un poste d'enseignant contractuel à mi-temps (2023)																				
	Plateforme TP	Plateforme automatisme : Gestion investissements Déménagement dans une salle dédiée Gestion parc informatique			Plateforme d'automatisme : Amélioration & maintenance Plateforme de robotique : Gestion des investissements Agrandissement et réaménagement Gestion du parc informatique				Plateformes d'automatisme et de robotique : Amélioration et maintenance Déménagement dans la hall GMP Gestion du parc informatique					Plateformes d'automatisme et de robotique : Préparation investissements Amélioration et maintenance Gestion du parc informatique								
Projets pédagogiques	Organisation 3 journées régionales pédagogiques DUT GMP automatisme			Université/IUT/GMP - Plateforme mutualisée Asimov Investissements 455 k€, 15 000 heures étu/an automatisme/robotique/vision				BPI - FAFDIP Investissements 1,1 M€					OPCO 21 - CIGMP23 Investissements 250 k€									
Plus de 2 millions d'euros de projets financés et gérés	Projet pédagogique automatisme DUT GMP Systèmes automatisés (65 k€)			Projet régional CMIRA Ho Chi Min - Vietnam Automatisme (25k€)				FEDER - ActiveRobotec Porteur pôle Via Méca & CETIM 60 k€ IUT Lyon 1					CEA - Robotique industrielle Etudes de faisabilité : 20 k€ Projets tuteurs DUT GMP									
Activité pédagogique	Accompagner et suivre les étudiants	127 étudiants encadrés en projet tuteuré DUT GIM et GMP		3	4	6	8	15	10	18	22	5.5	10	6	5.5	0	3	10.5	fin DUT 2A et des projets !			
		90 stagiaires suivis DUT/BUT GMP et GIM	9	7	9	6	9	6	4	6	5	7	4	3	4	3	3	2	3			
		94 alternants accompagnés en LPRO et BUT GMP			2	4	3	6	7	7	7	8	7	7	9	7	6	7	7			
Promouvoir l'industrie, l'IUT et l'automatisme	Etudiant	Journées de l'Enseignement Supérieur de l'académie (mercredi/jeudi fin janvier) et Journée Portes Ouvertes de l'IUT Lyon 1 (samedi en février/mars)																				
	Grand public					5 participations au Mondial métiers Gestion de 1 animation				4 participations à la fête de la Science Village des sciences de l'IUT Lyon 1 Gestion de 2 animations					Worldskills Sélection régionale							
	Spécialiste					Salon Industrie Conférence					Salons Innorobo & Industrie Stand	Journée AIP Automatisme Conférence					JNER & Olympiades Conférences	Journée Smart Automatisme Conférence				
Digitaliser l'enseignement	Développer l'hybridation via une plateforme pédagogique	Plateforme pédagogique Spiral de l'Université Lyon 1 pour : 4 modules d'automatisme de DUT Gestion de la LPRO CIRI avec site web de promotion			Plateforme Spiral Connect - Université Lyon 1 : Gestion des 4 modules d'automatismes de DUT Gestion des modules de robotique en LPRO avec remise documents étudiants Gestion de la LPRO CIRI/RAVI avec un site web				Plateforme Claroline Connect - Université Lyon 1 Hybridation d'enseignement Gestion modules robotique LPRO avec remise documents étudiants Gestion LPRO RAVI mais sans site web !					Plateforme moodle...								
	Virtualiser un système automatisé pour apprendre en autonomie	Programmation API Automgen			Programmation API, Unity Pro - Schneider Electric Programmation IHM, Vijeo Designer - Schneider Electric Communication API-IHM - Wirreshark, Analyse réseau									Simulation mécanique Factory IO								
	Simuler un robot et une caméra dans leur environnement				Simulation robotique SRS 7 robots Staubli Robguide v7 robots Fanuc				Simulation robotique SRS 2013 avec modélisation environnement Vision industrielle, Cognex					Simulation robotique SRS 2016, amélioration de la modélisation 3D			Simulation robotique SRS 2022 Roboguide V9					
	Voir l'invisible avec la réalité augmentée pour comprendre													1 ^{er} projet Unity			Projets suivants - usage pédagogique Vuforia Studio - PTC			Enseignement BUT GMP Parcours SRV usage pédagogique et industriel		
Enseignement hors IUT				Master Informatique parcours CODE responsable UE3 et module Pilotage INSA Lyon Projet Manufacturing Execution System				INSA Lyon, Projet Manufacturing Execution System (MES)														

Chapitre 2

Management et activités collectives

Ce second chapitre de la première partie visant à dresser un panorama de l'ensemble de mes activités d'enseignant-chercheur est consacré aux activités de management et à la présentation des différentes responsabilités collectives exercées. Dans le cadre des trois responsabilités de formation exercées depuis 2008, les actions menées sont présentées conjointement à une description de ces responsabilités. L'expérience conduit à aborder la question du management à la fin de cette première section. La seconde section offre un panorama des responsabilités collectives exercées en donnant les éléments essentiels sans apporter des éléments quantitatifs trop fastidieux à lire.

2.1 Management et responsabilités de formation

2.1.1 Responsable pédagogique de licence professionnelle en robotique

La première responsabilité de formation exercée a été celle du parcours 100% en alternance de licence professionnelle en robotique industrielle de 2008 à 2018 comme illustré sur la figure 2.1. La première phase a concerné la création de la formation du recensement des besoins industriels régionaux à la définition de la maquette pédagogique jusqu'à la mise en place de trois partenariats : le Centre de Formation d'Apprentis de l'Industrie de la Métallurgie à Lyon (CFAI), le lycée La Mache à Lyon et la société Robotique Concept à Belleville sur Saône. L'aide de ces partenaires a été précieuse dans l'identification du besoin industriel et dans la définition des contenus pédagogiques des 450 heures de formation répartis sur treize puis quatorze semaines pour la réalisation d'études d'avant-projet.

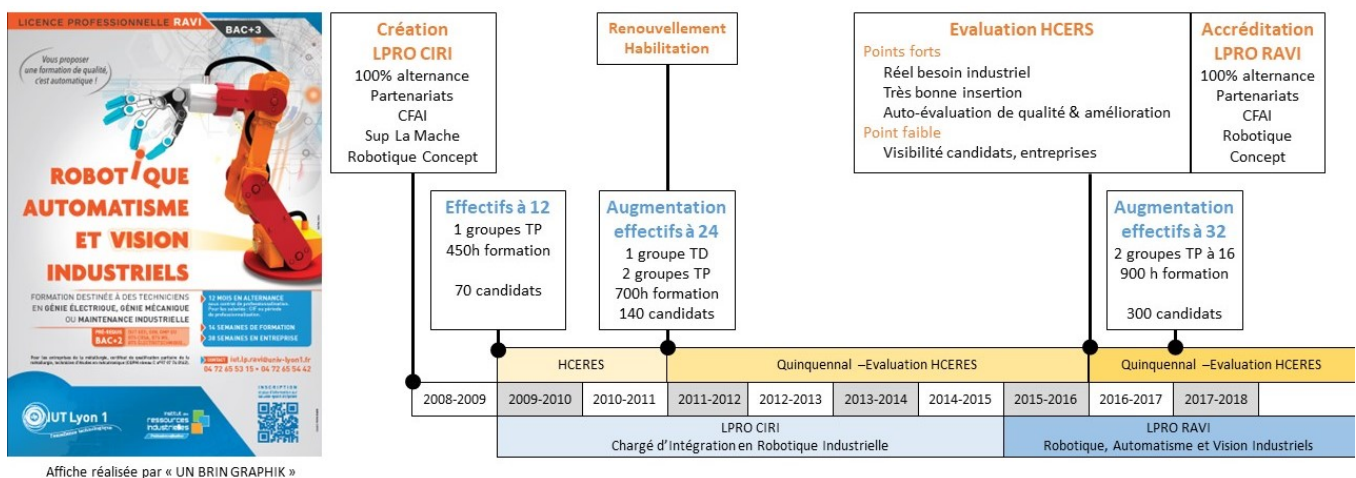


FIGURE 2.1 – Évolution de la licence professionnelle en robotique industrielle

Le besoin de compétence en robotique industrielle concerne tout aussi bien les fournisseurs de machines spé-

ciales, dénommés plus couramment «les intégrateurs», que les services industrialisation et maintenance sur des sites de production, dénommés plus couramment «les exploitants». Le premier intitulé CIRI¹ de la formation étant trop orienté vers la première catégorie, il a été décidé de le changer en 2016 lors de la nouvelle accréditation par RAVI². Cette intitulé a aussi pour avantage d'être plus explicite pour les candidats et d'avoir un acronyme facile à retenir !

Sous les effets cumulés d'un besoin industriel plus important et d'un travail de communication sans relâche auprès des entreprises et des candidats via par exemple une affiche réalisé par un prestataire spécialisé en communication «Un Brin Graphik» reprise sur la figure 2.1, les effectifs ont augmentés progressivement d'un groupe de 13 alternants en 2009 à 32 alternants en 2018 avec des offres d'alternance non pourvues et des candidats en liste d'attente. Dans un domaine avec très peu d'enseignants formés et face à la charge que représente une augmentation des effectifs, ces derniers ont été limités à 32 avec deux groupes de 16 au lieu de 48 comme envisagé un temps avec nos partenaires. Le manque de ressources humaines limite donc ici la réponse aux besoins industriels régionaux.

La fonction de responsable pédagogique d'une licence professionnelle recouvre toute la gestion de la formation :

- **Coordination** : relations avec les partenaires, rédaction des dossiers HCERES d'évaluation et d'accréditation.
- **Relations avec les entreprises** : promotion de la formation, validation et diffusion des offres, formation et information des tuteurs en entreprise.
- **Recrutement des alternants** : promotion de la formation, étude et sélection des dossiers, jury de recrutement, audition des candidats en formation continue.
- **Pédagogique** : emploi du temps, collecte et diffusion des notes, gestion des absences, accueil des alternants, recherche et gestion des enseignants et intervenants industriels, évaluation de la formation et préparation du jury de validation.

Remplacé par un membre de l'équipe d'automatisme, cette responsabilité a pris fin en septembre 2018 suite à une nouvelle responsabilité : la direction du département GMP³.

2.1.2 Chef du département GMP

L'intitulé de la fonction «Chef de département» peut paraître désuet vue de l'extérieur mais c'est ainsi que ce nomme le responsable d'un département dans un IUT. J'ai donc pris en septembre 2018 la fonction de chef de département GMP à l'IUT Lyon 1. Au sein de la première région industrielle de France et avec une offre de formation d'enseignement supérieur peu développée au nord et au sud de Lyon, ce département a la particularité d'avoir depuis longtemps l'effectif de DUT le plus important en France. En effet, la capacité nominale en première année de DUT/BUT est de 312 étudiants répartis au sein de trois groupes CM de 104 étudiants, divisés en 12 groupes TD de 26 étudiants et en 24 groupes TP de 13 étudiants, voire même de 36 groupes TP de 9 étudiants pour les TP comportant des risques tels que l'usinage et le soudage.

Plus de 80 ans d'histoire ont conduit au département GMP actuel depuis la création en 1940 d'un Centre de Formation Accéléralé de la Métallurgie par Jean GALLET. Après avoir eu différents statuts, l'IUT B est créé en 1967 avec un double département : le département GMP. Le déménagement dans les locaux actuels rue de France à Villeurbanne accueillera progressivement d'autres départements : GEII en 1970, TC en 1973, GIM en 1992 et TCSI en 2010 en même temps que la création de l'IUT Lyon 1 réunissant les deux IUT de l'Université Claude Bernard Lyon 1. Je remercie l'association des Anciens de la Rue de France (ARF) qui fait perdurer l'histoire du département GMP.

Avec environ 800 étudiants et plus de 30 000 heures d'enseignement assurées chaque année, le fonctionnement du département GMP repose sur une équipe administrative constituée de trois personnes, une équipe technique normalement composée de quatre personnes, une équipe de direction avec cinq membres et des responsables issus des équipes pédagogiques qui comptent 60 enseignants de différents statuts évoqués au chapitre 1. La figure 2.2 représente l'organigramme complet avec les équipes et toutes les responsabilités indispensables au fonctionnement du département GMP.

La mission d'un chef de département peut se résumer ainsi : assurer le développement et le fonctionnement du département à travers d'une part l'animation des équipes et d'autre part la gestion budgétaire & RH. Au-delà de la gestion, le chef de département doit impulser et/ou soutenir des nouveaux projets pour le développement du

1. Chargé d'Intégration en Robotique Industrielle

2. Robotique Automatisme et Vision Industriels

3. Génie Mécanique et Productique

2.1. MANAGEMENT ET RESPONSABILITÉS DE FORMATION

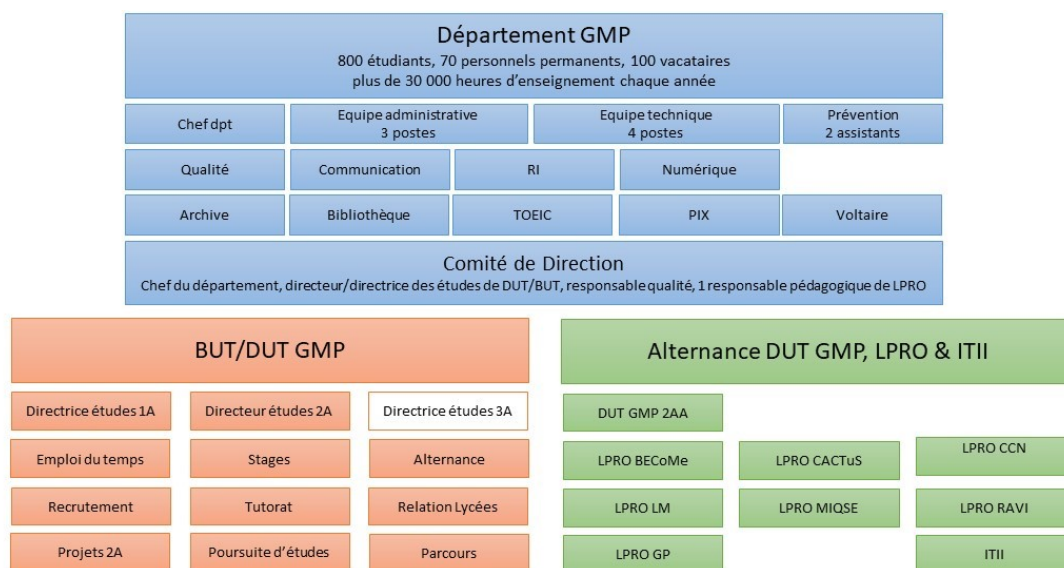


FIGURE 2.2 – Organigramme du département GMP en mai 2022

département au regard de la politique interne du département, des orientations de l'IUT/Université et des acteurs socio-économiques. La fonction de chef de département recouvre principalement trois tâches :

- Ressources Humaines : management des équipes, administrative et technique, évolution de carrière de tous les personnels et gestion de la campagne emplois.
- Budget : heures, fonctionnement, investissement et travaux.
- Animation des équipes : direction, administrative, technique, pédagogique.

Un IUT n'est pas la somme de ces départements. Le chef de département doit donc penser son département au sein de l'IUT et de l'Université. En tant que maillon d'une chaîne, entre la direction de l'IUT et ses équipes, il doit s'assurer de la cohésion de cette chaîne même quand cette dernière a tendance à l'écarteler. De 2018 à 2022, trois périodes caractérisent l'action des quatre années de mandat comme illustré sur la figure 2.3.

La première période d'environ 18 mois correspond à la prise de fonction constituée de deux axes : l'amélioration de l'organisation du département et le développement des relations avec les différents acteurs internes et externes nécessaires au pilotage. Concernant l'organisation, les bonnes pratiques vues ailleurs et les outils numériques pour le suivi ont été les deux piliers des actions engagées. Certainement pas parfaite, elle a permis de faire face aux deux périodes suivantes inattendues par leur ampleur.

La seconde période de 24 mois a été mondiale et concernée toutes les formations. Cependant en dehors des quatre mois d'interruption des enseignements en présentiel de mars à juin 2020 avec un maintien des enseignements à distance coordonnées par la direction des études, tout a été ensuite mis en œuvre durant l'année Universitaire 2020-2021 pour assurer en présentiel d'une part les TP représentant 40% de la formation indispensable à l'acquisition des connaissances, et d'autre part les évaluations pour la validation des acquis et l'équité entre les étudiants. Cette période de 24 mois est un excellent exemple de résilience par une mobilisation de toutes les équipes ayant conduit à cinq modes de fonctionnement dégradés différents : tout à distance, TD et TP en présentiel ayant nécessité de modifier la structure d'emploi du temps, TP expérimentaux uniquement en présentiel sur dérogation du rectorat, tous les TP en présentiel et enfin à nouveau les TP et les TD en présentiel dans le respect de jauges du nombre de présents dans les bâtiments. Les évaluations ont toutes été réalisées en présentiel durant l'année 2020-2021. L'implication de toutes les équipes a été exemplaire durant toute cette période qui nous paraît déjà bien loin et nous manque absolument pas !

Enfin, la troisième période de 30 mois concerne la réforme du BUT GMP, de la parution du décret en décembre 2019 à la définition de la maquette pédagogique locale sur les trois années avec cinq parcours et l'alternance à 100% en troisième année, jusqu'à la réalisation de la première année et la préparation de la seconde année. La stratégie adoptée localement a été de demander aux équipes pédagogiques des propositions dans un cadre fixé au préalable et ce avant même la parution du référentiel national fixant 2/3 du volume horaire. Nous n'allions pas passer d'une formation de génie mécanique à une formation de gestion et d'administration des entreprises, les contenus allaient donc évoluer en se basant sur l'existant et l'expérience acquise depuis plus de cinquante ans. L'existant représentant plus des 2/3 fixé nationalement, il y avait donc très peu de risque à laisser les équipes pédagogiques

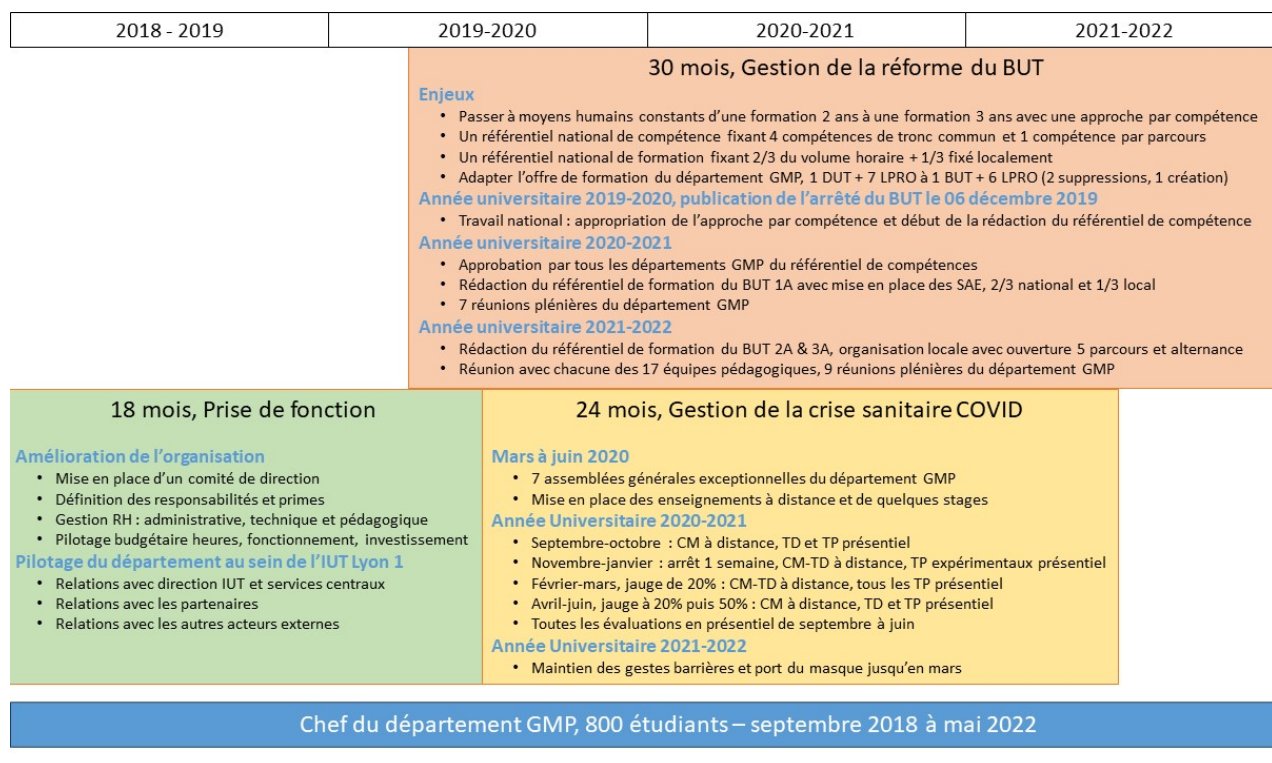


FIGURE 2.3 – Principales missions durant quatre ans de mandat

proposer des nouvelles répartitions sur trois ans pour les ressources avec un volume maximum à ne pas dépasser tout en pilotant l'organisation globale et la mise en place des SAE⁴. Même si la démarche a pu surprendre une minorité de collègues qui attendaient de recevoir un programme national, cette stratégie a permis aux équipes de co-construire la maquette locale de BUT GMP et donc de s'approprier cette maquette devenue la leur. Toutes les équipes pédagogiques ont énormément œuvré pour construire cette maquette à travers un nombre incalculable de réunions au sein des équipes, entre des équipes et celles organisées au niveau du département. Après 50 ans de DUT avec des changements mineurs de PPN en PPN⁵ qui fixait 100% des contenus et de la structure, la réforme du BUT est un changement majeur dans la vie des IUT et de toutes les équipes administratives, techniques et pédagogiques ! La figure 2.4 illustre l'offre de formation du département GMP avant 2021 et la nouvelle offre de formation à partir de la rentrée 2023 suite à la réforme du BUT et à l'adaptation des licences professionnelles.

Entre la fin de mon mandat en 2022 concomitant avec la fin de la première année de BUT et les premiers diplômés en 2024, cette action de mise en place du BUT GMP s'est donc prolongée bien après la fin de mandat et a été reprise avec une grande implication par Estelle HOMEYER, la nouvelle cheffe de département GMP. J'espère avoir laissé un chantier «propre» avec des spécifications «correctes».

Ces quatre années de mandat de chef de département GMP ont été une formidable expérience que j'ai à peine vu passer ! Mon second mandat de trois ans devait normalement se terminer en août 2024 mais j'ai accepté de prendre en avril 2022 une nouvelle fonction, celle de directeur adjoint de l'IUT Lyon 1, responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel avec ses 2 000 étudiants.

2.1.3 Directeur adjoint de l'IUT Lyon 1, responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel

Après deux mandats de Christophe VITON et dix ans à la direction avec la gestion de l'IUT Lyon 1 nouvellement créé en 2010, du COVID et de la réforme du BUT, une nouvelle équipe de direction s'est mise en place le 01 avril 2022 ! Michel MASSENZIO candidat à la fonction de directeur de l'IUT Lyon 1 a constitué cette nouvelle équipe de direction pour laquelle il m'a sollicité pour la fonction de directeur adjoint, responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel, fonction qu'il occupait depuis dix ans. Je le remercie pour sa confiance.

4. Situations d'Apprentissage et d'Évaluation

5. Programme Pédagogique National qui fixait 100% du volume horaire

2.1. MANAGEMENT ET RESPONSABILITÉS DE FORMATION

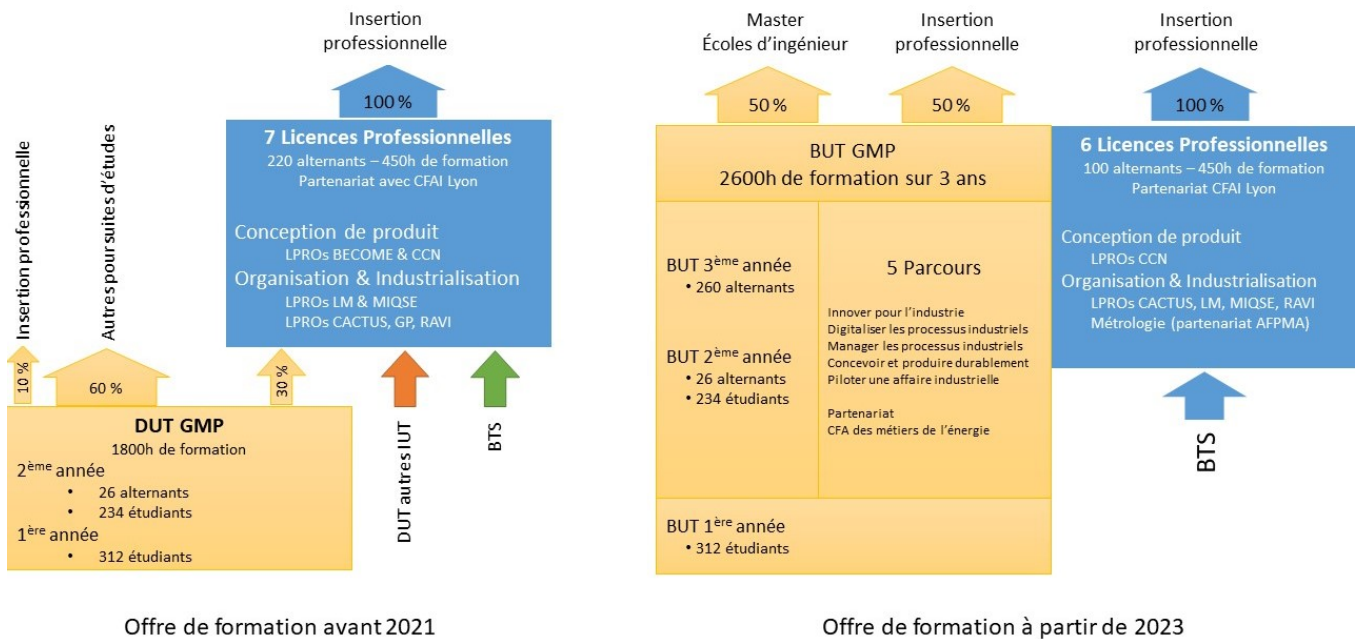


FIGURE 2.4 – Évolution de l'offre de formation du département GMP

Comme présenté au chapitre 1, l'IUT Lyon 1 compte plus de 5 300 étudiants et 560 personnels répartis sur trois sites illustrés sur la figure 2.5 : Bourg-en-Bresse, Villeurbanne Doua et Villeurbanne Gratte-Ciel. Quatorze départements et les services centraux de l'IUT Lyon 1 sont répartis sur ces trois sites.

3 sites

SITE VILLEURBANNE DOUA

Départements

- ▶ Chimie
- ▶ Génie biologique
- ▶ Génie chimique, Génie des procédés
- ▶ Génie civil, construction durable
- ▶ Informatique
- ▶ Gestion des entreprises et des administrations



SITE VILLEURBANNE GRATTE-CIEL

Départements

- ▶ Génie électrique et informatique industrielle
- ▶ Génie industriel et maintenance
- ▶ Génie mécanique et productive
- ▶ Techniques de commercialisation
- ▶ Techniques de commercialisation, orientation Systèmes Industriels



SITE BOURG-EN-BRESSE

Départements

- ▶ Génie biologique
- ▶ Métiers de la Transition et de l'Efficacité Énergétiques
 - ▶ Informatique
- ▶ Gestion des entreprises et des administrations



FIGURE 2.5 – IUT Lyon 1, 3 sites et 14 départements

L'organisation de l'IUT Lyon 1 repose sur une équipe de direction, treize services centraux et quatorze départements répartis sur les trois sites comme illustré sur l'organigramme de la figure 2.6. L'équipe de direction est

constituée :

- Directeur de l'IUT Lyon 1
- Trois directeurs de pôles : formation, communication et HSE
- Trois directeurs adjoints responsable de site (Bourg-en-Bresse, Villeurbanne Doua et Villeurbanne Gratte-Ciel)

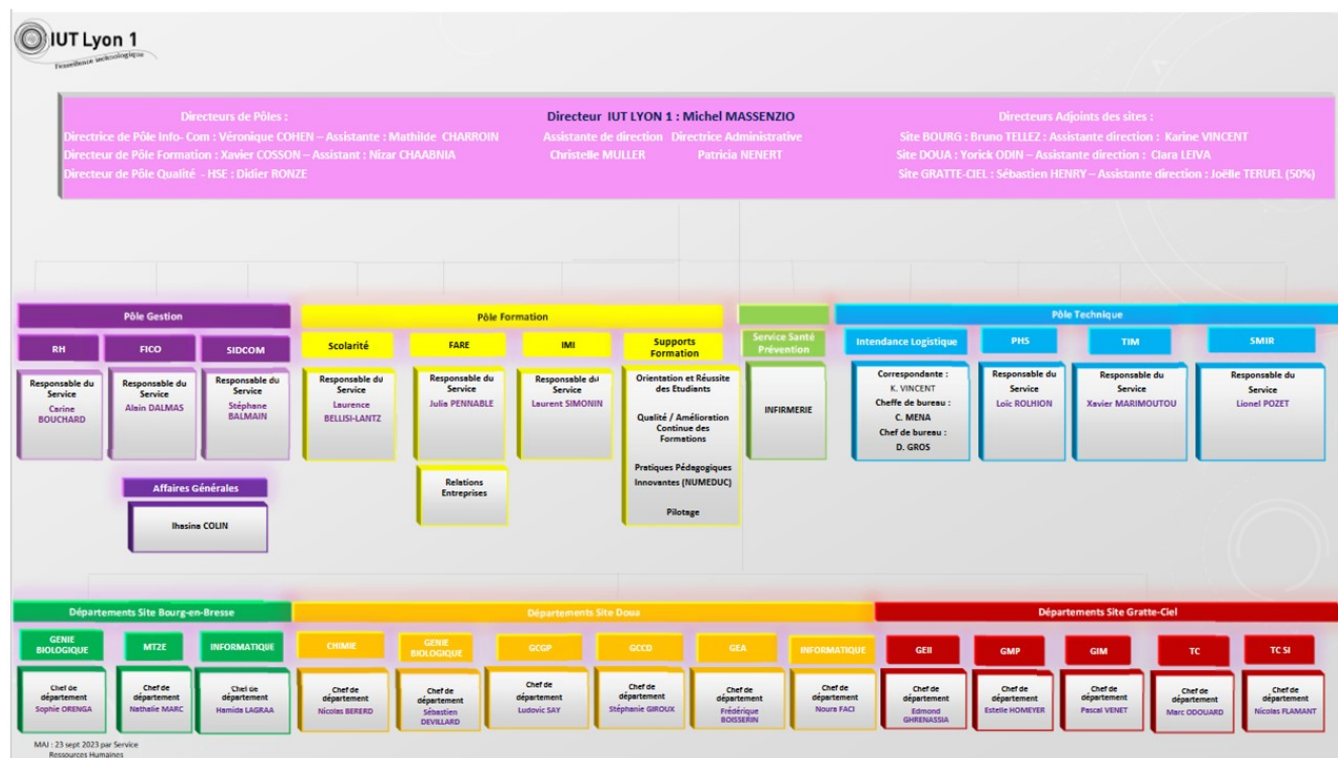


FIGURE 2.6 – Organigramme de l'IUT Lyon 1 issu de son site web

Les directeurs de pôle ont une fonction transversale sur un domaine en lien avec les acteurs internes et externes :

- Formation en relation en interne avec la DEVU⁶ de l'Université Lyon 1, le service scolarité, le service informatique, les affaires générales pour la gestion des recours et les quatorze départements.
- Communication en relation interne avec le service communication et le SOIE⁷ de l'Université Lyon 1, le service informatique et les quatorze départements.
- HSE⁸ en relation en interne avec le service sécurité de l'Université Lyon 1, le service Prévention Hygiène et Sécurité de l'IUT Lyon 1, les assistants de prévention et les quatorze départements.

L'intitulé de la fonction de directeur adjoint responsable de site est un peu long mais il mentionne deux aspects de la fonction :

- La responsabilité du fonctionnement d'un site en interactions avec les services du pôle de gestion et du pôle technique, et les départements du site
- La direction adjointe de l'IUT induit juridiquement une délégation de signature pour des aspects budgétaires et des ressources humaines.

En plus d'assurer le fonctionnement d'un site, les directeurs adjoints s'impliquent par ailleurs dans des projets transversaux ne relevant pas directement des trois pôles cités précédemment. Enfin, ils sont des relais entre l'équipe de direction et les départements du site. Cette fonction comporte de nombreux aspects d'une part liés au fonctionnement d'un site (intendance et logistique, sécurité incendie, sûreté des personnes) en lien avec de nombreux acteurs extérieurs, et d'autre part liés à la vie des départements et des services présents sur le site dans des situations parfois un peu particulières !

6. Division des études et de la vie universitaire
 7. Service d'Orientation et d'Insertion Professionnelle des étudiants
 8. Hygiène Sécurité et Environnement

2.1. MANAGEMENT ET RESPONSABILITÉS DE FORMATION

Le site Villeurbanne Gratte-Ciel de l'IUT Lyon 1 accueille cinq départements : GEII⁹, GIM¹⁰, GMP¹¹, TC¹² et TCSI¹³. Avec plus de 220 personnels, le site accueille plus de 2000 étudiants répartis dans les 5 départements avec des plateformes technologiques supports d'une part aux 40% de travaux pratiques des formations de BUT et LPRO, et d'autre part aux SAE dans le cadre de l'approche par compétence. Le site Villeurbanne Gratte-Ciel a une superficie totale de plus de 30 000 m² avec de nombreux espaces extérieurs. Enfin, les sept bâtiments du site représentent plus de 21 300 m² de locaux. Ce site situé en plein cœur de la ville de Villeurbanne vit en interactions avec son environnement urbain. Les bâtiments du site sont l'objet d'un projet de rénovation énergétique d'envergure de tous les bâtiments sauf les deux plus récents. Suite aux premiers projets lancés dès 2012, une part significative du financement a été obtenue via la 7^{ème} génération de CPER¹⁴ 2021-2027 complétée avec des ressources propres de l'Université Lyon 1 et de l'IUT. Un accord cadre de maîtrise d'œuvre sur une durée de dix ans a été notifié en janvier 2023 marquant le début de la phase opérationnelle de la rénovation énergétique. Après des phases d'études et le dépôt du permis de construire, le bâtiment C qui accueille des services centraux et des salles du département GEI sera fermé durant l'année 2024 pour être rénové. Le financement acquis permet d'ores et déjà les études et la rénovation d'un second bâtiment. Pour la rénovation des autres bâtiments, la recherche de financements complémentaires est en cours.

Par analogie avec la fonction de chef de département et les 18 mois nécessaires à la prise de fonction pleine et entière, je suis dans cette période pour la fonction de directeur adjoint responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel de l'IUT Lyon 1. Dans quelques années, j'aurai certainement une vision plus précise et plus claire de la fonction. En attendant, la présentation de cette fonction s'achève ici.

Dans la fonction de chef de département comme dans celle de directeur adjoint, il y a un élément commun : le management du personnel.

2.1.4 Management du personnel

Le terme management est étrangement absent de toutes les rubriques et de tous les indicateurs dans les dossiers d'évaluation de ma carrière que j'ai pu rédiger, du suivi de carrière par le CNU¹⁵ à la hors classe des maîtres de conférences jusqu'à la troisième composante de la RICPEC¹⁶. Le management de personnels a été une découverte d'abord en tant que chef de département GMP puis en tant que directeur adjoint de l'IUT Lyon 1 en devenant le supérieur hiérarchique direct de personnels administratifs et techniques. Ce management passe d'abord par une définition précise des missions de ces personnels dans leur fiche de poste et par les entretiens professionnels réalisés chaque année. En plus de l'aspect très formel du compte-rendu, ces entretiens sont surtout des moments d'échange plus informels avec les personnels permettant chaque année de faire le bilan de l'année écoulée et de se projeter dans l'année à venir. L'identification des difficultés associées aux besoins de service permet de définir des objectifs précis et réalistes pour les agents. Au delà de ces moments institutionnels annuels, il y a aussi une forme plus quotidienne de management. Parmi les différents types de management, c'est certainement le management directif que je pratique le moins préférant les autres formes (persuasif, participatif et délégué).

Au delà du management des personnels avec un lien hiérarchique direct, le management des collègues enseignants avec lesquels il n'existe pas de lien hiérarchique «fort» est certainement encore plus délicat et nécessiterait sans doute d'être mieux formé et préparé. En effet, le management est au cœur des préoccupations des entreprises. C'est un levier reconnu comme essentiel de performance depuis plus de quarante ans désormais. L'organisation des entreprises a fortement évolué dans les années 1980 avec un rôle de plus en plus central du manager après plusieurs décennies de prédominance de l'expert métier. Une analyse plus avancée de cette évolution est totalement hors de mes compétences, je m'arrêterai donc là. Cependant comme dans toute organisation, le management est certainement aussi un levier de performance au sein des Universités. Au lieu de performance, l'excellence aurait été certainement le terme plus approprié dans le contexte de l'enseignement supérieur durant cette dernière décennie. Cette question du management n'est pas contradictoire avec un fonctionnement universitaire basé sur la collégialité et l'évaluation par les pairs. Quand des décisions relèvent de la collégialité et des pairs, d'autres décisions après concertations avec toutes les parties prenantes relèvent d'un responsable parfois peu pré-

9. Génie Électrique et Informatique Industrielle

10. Génie Industriel et Maintenance

11. Génie Mécanique et Productique

12. Techniques de Commercialisation

13. Techniques de Commercialisation orientation Systèmes Industriels

14. Contrat Plan État Régions

15. Conseil national des universités

16. RIPEC - Régime Indemnitaire des Personnels Enseignants et Chercheurs entré en vigueur en janvier 2022

paré à certaines situations avec une dimension humaine importante. Dans la fonction de chef de département, la première difficulté sans doute sous-évaluée est certainement là.

Après cette section consacrée au management et aux responsabilités de formation, les responsabilités collectives exercées depuis 2006 sont abordées dans la section suivante.

2.2 Responsabilités collectives

La frise chronologique de synthèse page 41 répertorie l'ensemble des responsabilités collectives assurées depuis 2006. Les premières sont celles exercées au titre de l'Université Lyon 1.

2.2.1 Université Lyon 1

Après avoir été membre du comité consultatif de la 61^{ème}, j'ai été de 2016 à 2020 membre élu du Conseil Académique (CAc) de l'Université Lyon 1 et de la Commission Formation et Vie Universitaire (CFVU) qui instruit les questions en lien avec la formation, la pédagogie et la vie universitaire. En formation restreinte aux enseignants-chercheurs, le CAc est l'organe compétent pour l'examen des questions individuelles relatives au recrutement, à l'affectation et à la carrière des enseignants-chercheurs. En formation plénière, il est consulté ou peut émettre des vœux sur les orientations des politiques de formation et de recherche. Ce premier mandat au sein des conseils centraux a d'abord été une découverte de la diversité de l'Université Lyon 1 tant en formation qu'en recherche. Par la suite, j'ai été à nouveau élu pour un second mandat de 2020 à 2024 au sein du CAc et de la CFVU. Dans le cadre de ce second mandat, je suis membre de la section disciplinaire compétente à l'égard des enseignants-chercheurs et des enseignants et membre du comité de suivi de la plateforme numérique. De plus, je suis membre du groupe de travail initialement pour le Plan de Sauvegarde Énergétique (PSE) lancé fin 2022 transformé en groupe de travail pour la Transition Environnementale et le Développement Durable (TEDS) qui se réunit actuellement tous les quinze jours. Enfin depuis début octobre, je suis membre d'un groupe de travail pour la rédaction du COMP de l'Université Lyon 1, Contrats d'Objectifs, de Moyens et de Performance 2024-2026. Les responsabilités collectives exercées au sein du laboratoire de recherche DISP sont présentées dans la section suivante

2.2.2 Laboratoire DISP

Depuis 2016 au sein du laboratoire DISP¹⁷ dans lequel je mène mon activité de recherche, j'exerce plusieurs responsabilités collectives : membre du comité de direction, responsable d'un axe scientifique et membre nommé du conseil de laboratoire.

Durant le quinquennal 2006 à 2020 avec ma collègue Aicha SEAKHARI SEKLOULI, nous avons été responsable de l'axe scientifique «Modélisation et Optimisation du Cycle de vie des Systèmes» que nous avons animé avec le double objectif de créer des synergies entre les membres de l'axe et d'accompagner les doctorants dans leur travaux. L'avis global sur l'axe MOCS de l'évaluation HCERES en 2020 mentionnait «un très bon positionnement scientifique, sa capacité à financer ses travaux par des projets subventionnés ou avec les industriels. Les contributions scientifiques de l'axe sont originales et confirment la tendance générale observée pour l'ensemble de l'unité. L'encadrement doctoral est conséquent (25 thèses co-encadrées par au moins un permanent de MOCS) et réalisé en forte collaboration avec des partenaires académiques et industriels. Cela montre la forte visibilité et les réseaux mis en place par les enseignants-chercheurs de l'axe.»

Pour accentuer la dynamique engagée, les deux axes MOCS et ASI¹⁸ ont conduit à la naissance de l'axe SIDO¹⁹ dans le cadre du quinquennal 2021 à 2025. D'abord avec Néjib MOALLA puis avec Jannik LAVAL, nous assurons la responsabilité de cet axe avec toujours la même volonté d'apporter une cohésion entre ses membres.

Le comité de direction (CoDir) du laboratoire DISP est constitué de la direction et des responsables de chaque axe. A ce titre, je suis membre depuis 2016 du CoDir du laboratoire DISP qui se réunit environ une à deux fois par mois en fonction des périodes et des sujets à traiter.

Suite à la présentation des responsabilités collectives exercées au sein du laboratoire de recherche DISP, celles assurées au niveau de l'IUT Lyon 1 sont présentées dans la section suivante.

17. Décision et Information pour les Systèmes de Production

18. Agilité des Systèmes d'information

19. Systèmes d'Information et Données

2.2.3 IUT Lyon 1

D'abord membre élu au conseil des départements GMP et GIM entre 2006 et 2009, j'ai ensuite été membre élu du conseil de l'IUT B avant la création de l'IUT Lyon 1 dont j'ai été également membre du conseil de 2014 à 2017. Lors de ce second mandat, j'ai siégé à la commission des personnels enseignants de l'IUT Lyon 1. Enfin de 2019 à 2022, j'ai été membre de la commission des personnels enseignants et de la commission recherche et transfert de technologie au sein desquelles je siège toujours en tant que directeur adjoint. Ces deux commissions participent notamment à la rédaction des avis de carrière et sont consultées lors de la campagne annuelle d'emplois. J'ai par ailleurs assuré des responsabilités collectives au niveau du réseau national des départements GMP.

2.2.4 Réseau national des départements GMP

Dans le cadre de l'Assemblée des Chefs de Département GMP (ACD GMP), j'ai été membre élu du bureau de 2018 à 2022 en charge de la préparation des quatre ACD annuelles. Dans le cadre de l'action national Hybrid GMP, j'ai été membre du comité de pilotage.

Lors de la réforme du BUT GMP, un groupe de travail national a été constitué avec onze chefs de département GMP et huit membres issus de la Commission Pédagogique Nationale (CPN). J'ai assuré l'animation de ce groupe de travail durant toute l'année 2020 pour la rédaction du référentiel de compétences. En complément des réunions hebdomadaires du GT (Groupe de Travail), voire plus, plusieurs réunions nationales en visioconférence ont été organisées d'abord avec les partenaires socio-économiques fin août 2020 et ensuite avec l'ensemble de la communauté pédagogique GMP issue des 42 départements GMP en France. Par exemple, la réunion du 08 octobre 2020 a réunie plus de 200 participants. Les principales étapes de la rédaction du référentiel de compétences de BUT GMP ont été :

- Janvier 2020, analyse des métiers et première proposition des parcours
- Mai 2020, identification des parcours de BUT après un vote en ACD GMP
- Septembre 2020, version 1 du référentiel de compétence après des échanges avec les partenaires socio-économiques, l'ACD GMP et le laboratoire LABSET en charge de l'accompagnement sur l'approche par compétence.
- Décembre 2020, version finale du référentiel de compétence après plusieurs réunions nationales par compétence.

Après une année 2020 extrêmement bien remplie entre la COVID, le GT BUT GMP national et le début des travaux sur le déploiement local du BUT GMP, il était temps de laisser la place d'animateur après avoir finalisé la rédaction du référentiel national de compétences. Je suis ensuite resté membre du GT BUT GMP national pour la rédaction du référentiel de formation jusqu'en mars 2022 avec un rythme de réunion toujours aussi soutenu et avec des échanges parfois plus délicats au sein de la communauté national GMP quand il s'agit de la question de la répartition des heures²⁰ ! Pendant plus de deux ans, le GT BUT GMP national a mené en équipe ce chantier. Les échanges au sein de ce groupe ont été passionnés mais toujours extrêmement constructifs et dans le respect de toutes et tous au profit de l'ensemble de la communauté GMP. Avant de conclure ce chapitre, la responsabilité collective la plus récente est évoquée.

2.2.5 Réseau national GIS S.mart

Depuis 2021 avec un collègue de l'INSA de Lyon, nous représentons le réseau national S.mart²¹ auprès du club MES²².

Le Groupement d'Intérêt Scientifique S.mart fédère une communauté académique ouverte pour conduire la mutation scientifique, technologique et sociétale vers une Industrie du Futur soutenable. Les valeurs portées par la communauté du GIS S.mart sont le Collectif, le Partage, la Diversité. L'objectif est de fédérer le réseau national d'acteurs académiques concernés par l'Industrie du Futur.

Le Club MES²³ regroupe les acteurs significatifs du secteur : éditeurs, intégrateurs, sociétés de conseil, organismes de formation, organismes de normalisation. L'objectif majeur est la promotion du MES au niveau national au travers d'événements (Assises du MES, Tour de France) et de livres blancs. Le Club MES pilote également une communauté de pratique où les utilisateurs peuvent partager leurs expériences.

20. Avec pour la première fois un tiers d'adaptation locale imposée, il n'y avait en réalité aucun enjeu !

21. Systems.Manufacturing Academics Resources Technologies, <https://s-mart.fr/>

22. <https://www.club-mes.org/>

23. Manufacturing Execution Systeme

Parmi les différentes commissions du club MES, la commission formation vise à créer un espace d'échange et de partage entre les acteurs industriels et les acteurs académiques. Après une première tentative manquée en raison des grèves en 2021 lors de la journée Expérience MES à Paris, une journée est prévue en novembre 2023 à Lyon avec une vingtaine de participants pour évoquer entre académiques avec quelques membres industriels du club MES les questions d'enseignement et de recherche en lien avec le MES. Cette responsabilité collective récente ponctue ce second chapitre.

2.3 Conclusion

Dans ce second chapitre, un panorama des responsabilités de formation et collectives exercées a été dressé. Les trois responsabilités de formation ont été présentées avec les principales actions menés pour chacune d'elle : responsable pédagogique de licence professionnelle en robotique industrielle, chef du département GMP et enfin directeur adjoint de l'IUT Lyon 1 responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel. Les deux dernières responsabilités amènent à la question de la formation au management de personnels et de la considération de cette question au sein du système Universitaire français. Ensuite dans la seconde section, les responsabilités collectives exercées sont balayées à différents niveaux : Université Lyon 1, laboratoire DISP, IUT Lyon 1, réseau national des départements GMP et au sein du réseau national S.mart. Suite à ce chapitre, le troisième chapitre aborde maintenant l'activité de recherche.

Année	...2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Statut	ATER INPG	MCF - Université Lyon 1																				

Management & Responsabilités	De formation	Intitulé		Création LPRO CIRI	Responsable LPRO						Chef de département GMP			Directeur adjoint IUT Lyon 1 responsable du site Villeurbanne Gratte-Ciel						
		Formation			CIRI : Chargé d'Intégration en Robotique Industrielle			RAVI Robotique, Automatismes et Vision Industriels			DUT/BUT GMP 7 LPRO en alternance			5 départements : GEII, GIM, GMP, TC et TC-SI						
		Particularités			100% en alternance, site de production (industrialisation/maintenance) & fabricants machines spéciales Attractivité : de 70 candidatures en 2009 à plus de 300 en 2018, 50% DUT & 50% BTS en partenariat avec IRI/AFPI/CAI - UIMM Lyon et l'entreprise Robotique Concept						Projet BUT GMP - IUT Lyon 1 passage en 3 ans, approche par compétence 32 000h enseignement / an Crise COVID			Services centraux de l'IUT Lyon 1 présents sur le site : Alternance, Bibliothèque, Communication, Financier, Informatique, Intendance, NumEdu, PHS, Qualité, Reprographie, RH, scolarité, Travaux & maintenance						
		Effectif étudiants			1 groupe TP max 16		1 groupe TD, 2 groupes TP max 24			2 groupes TP max 32	~800 étudiants/an dont ~250 alternants DUT/BUT GMP 1A : 312 étudiants DUT/BUT GMP 2A : 260 étudiants dont 26 alternants 7 LPRO : ~220 alternants			~2000 étudiants/an						
		Ressources Humaines			Equipe pédagogique mixte : IUT Lyon 1, IRI & industriels ~14 enseignants & ~10 industriels						Equipe administrative : 3 Equipe technique : 4 Equipe pédagogique titulaire : 60 Vacataire : ~70			Responsable hiérarchique direct de : 1 assistante direction, 1 infirmière & 1 chef de service intendance ~220 personnels sur le site (départements et services centraux)						
		Financier			CA ~128 k€ / an		CA ~192 k€ / an			CA 256 k€ / an	Fonctionnement : ~220 k€ / an Investissement : ~150 k€ / an Budget global : ~500 k€ / an			Fonctionnement (gardiennage + entretien) : ~550 k€ / an Travaux rénovation énergétique du site : 20 M€ Travaux & informatique : budget mutualisé IUT Lyon 1						
		Evaluation/Accréditation HCERES / CPN / CFVU			Habilitation LPRO CIRI	Evaluation / Habilitation LPRO CIRI				Evaluation / Accréditation LPRO RAVI			Evaluation mi-parcours Dpt GMP	Evaluation / Accréditation Dpt GMP			Accréditation LPRO Metro		Evaluation / Accréditation IUT Lyon 1	
	Collectives	Université Lyon 1			Membre élu du Comité Consultatif de la 61ème section				Membre élu CAC & CFVU Université Lyon 1			Membre élu CAC & CFVU Université Lyon 1 Membre section disciplinaire enseignant Membre comité suivi plateforme numérique Membre GT PES-TEDS Membre GT COMP								
		Laboratoire DISP									Membre du Comité de Direction Membre du conseil de laboratoire Responsable de l'axe MOCS			Membre du Comité de Direction Membre du conseil de laboratoire Responsable de l'axe SIDO HCERES évaluation et projet						
		IUT Lyon 1			Membre élu du conseil de l'IUT B					Membre élu du conseil de l'IUT Lyon 1 Membre de la commission des personnels					Membre de la commission recherche et transfert de Technologie Membre de la commission des personnels					
		Réseau IUT, dpts GMP			Membre élu conseil de département GMP puis GIM								Membre du bureau ACD GMP Animateur GT national référentiel compétence BUT GMP Membre GT national référentiel formation BUT GMP Membre du comité de pilotage Projet national Hybrid'GMP							
		GIS Smart												Représentation GIS Smart au sein du club MES						
		CoS MCF			1 U. Lyon 2 1 U. JF		1 U. PS 1 U. Lyon 2			1 U. Lyon 1 1 U. Lyon 2		1 U. Lyon 2	1 U. Lyon 1 1 INSA	1 U. Lyon 1 1 INSA	1 U. Lyon 1	1 U. Lyon 1	1 U. Lyon 1	1 U. Lyon 1		
		CoS Enseignant					1 U. Lyon 2			2 U. Lyon 1		4 U. Lyon 1	2 U. Lyon 1	3 U. Lyon 1	1 U. Lyon 1	3 U. Lyon 1	7 U. Lyon 1			

Chapitre 3

Activité de recherche

Après la présentation de mon activité pédagogique et de mes responsabilités de formation & collectives, une synthèse de mon activité de recherche est présentée dans ce troisième chapitre. Le positionnement scientifique, les résultats et le projet scientifique sont abordés en détail dans la partie B après ce chapitre. Celui vise donc simplement à d'abord donner un aperçu du contexte de mon activité de recherche depuis 2006 à travers la présentation des trois unités de recherche auxquelles j'ai été rattaché. Mon implication dans des projets de recherche est ensuite détaillée avec ceux dont j'assume la responsabilité scientifique au titre de l'Université Lyon 1, puis ceux auxquels j'ai participé avant de dresser la liste des projets n'ayant pas été lauréats. Une autre facette de l'activité de recherche est ensuite introduite par les actions d'expertise scientifique. Enfin, ce chapitre récapitule mon implication dans la formation par et à la recherche avant de s'achever par ma production scientifique.

3.1 Contexte de mon activité de recherche

En parallèle de mon poste d'agrégé en mécanique au Lycée JANOT et CURIE à Sens (89) durant l'année 2001-2002, mes premiers pas de chercheur ont eu lieu au LURPA¹, à l'époque sur le site de Cachan, dans le cadre de mon DEA² intitulé «Elaboration de propriétés de sûreté à partir de la méthode de l'arbre des causes» sous la direction du Professeur Jean-Marc FAURE. En disponibilité pour études avec une allocation de recherche du ministère et un monitorat à l'ENSIEG³, j'ai effectué durant trois ans de 2002 à 2005 ma thèse au LAG⁴ sous la direction du Professeur Eric ZAMAI et du Professeur Mireille JACOMINO. Ma thèse intitulée «Synthèse de Lois de Commande pour la Configuration et la Reconfiguration des Systèmes Industriels Complexes» a été soutenue en octobre 2005. ATER à temps plein à l'ENSIEG durant l'année Universitaire 2005 à 2006, j'ai poursuivi mon activité de recherche au LAG. Depuis mon recrutement en 2006 à l'Université Lyon 1 et suite aux évolutions des structures de recherche représentées sur la figure 3.1, j'ai connu trois laboratoires et deux périodes de restructuration : PRISMA⁵, LIESP⁶ et DISP⁷. Ces trois laboratoires sont maintenant présentés en commençant par celui au sein duquel j'ai été recruté.

3.1.1 Laboratoire PRISMa

Le laboratoire PRISMa était un laboratoire multi-établissements⁸ travaillant dans le domaine de la conception et la gestion des systèmes de production de biens et de services. Au 1^{er} janvier 2006, le laboratoire réunissait 65 personnes autour de ces thèmes : 11 professeurs, 19 maîtres de conférences, 3 autres enseignants, 31 doctorants et un personnel administratif. Sur les trente enseignants-chercheurs permanents, onze étaient de l'Université Lyon 1. Le laboratoire était animé par Joël Favrel, Directeur et Alain Guinet, Directeur adjoint. Le laboratoire PRISMa était

-
1. Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
 2. Diplôme d'Études Approfondies
 3. École Nationale d'Ingénieurs Électriciens de Grenoble
 4. Laboratoire d'Automatique de Grenoble
 5. PProductique et Informatique des Systèmes Manufacturiers
 6. Laboratoire d'Informatique pour l'Entreprise et les Systèmes de Production
 7. Décision et Information pour les Systèmes de Production
 8. INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Université Lyon 2 Lumière

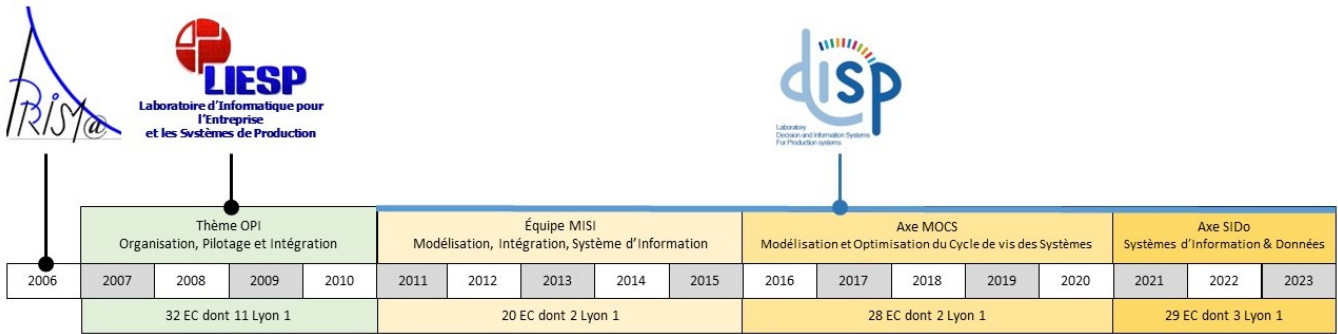


FIGURE 3.1 – Évolution des structures de recherche depuis mon recrutement en 2006

organisé en quatre équipes réparties sur trois sites : département Génie Industriel de l'INSA Lyon sur le campus de la Doua, département Informatique de l'Université Lyon 1 sur le campus de la Doua et l'IUT Lumière à Bron.

J'ai été recruté au sein de l'équipe du Professeur Michel MARTINEZ sur le profil de poste suivant : «La Recherche s'effectuera dans l'axe Gestion des données et connaissances pour l'ingénierie simultanée du Laboratoire PRISMa. Une expérience est nécessaire dans le domaine de la gestion du cycle de vie des produits pour l'intégration des systèmes d'ingénierie dans un environnement global (PDM, PLM, EAI...). Les travaux de recherche incluront la gestion des processus de conception/fabrication pour l'intégration des connaissances métiers dans le développement des produits». Lors de mon recrutement au regard de ce profil de poste, mon projet de recherche visait à développer une approche de gestion du cycle de vie des systèmes automatisés de production afin d'agrèger leurs différentes représentations. La figure 3.2 illustre ce projet avec la diapositive utilisée lors de mon audition en 2006. Bien que ce projet scientifique n'est pas pu être pleinement mené, il raisonne tout de même avec le projet présenté au chapitre 6 sur la conception et la synchronisation de Jumeaux Numériques.

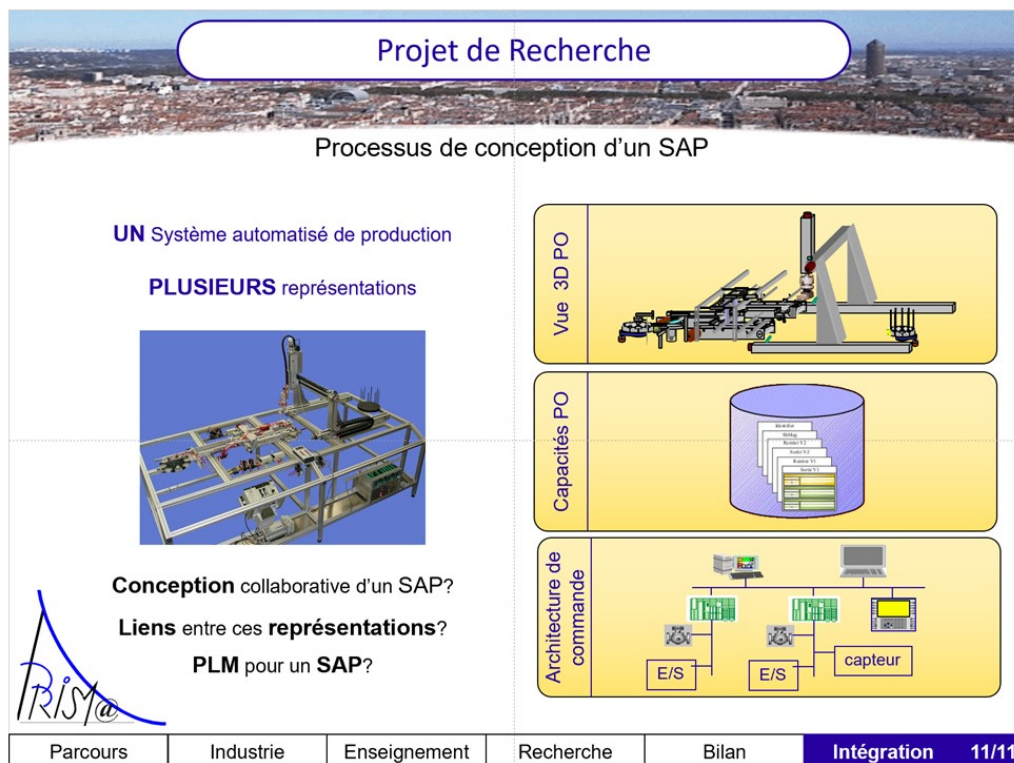


FIGURE 3.2 – Projet scientifique d'intégration lors de mon recrutement en 2006

Suite à mon recrutement, l'équipe comptait quatre membres, un professeur et trois maîtres de conférence, tous rattachés à l'IUT Lyon 1. Malgré la disparition du laboratoire PRISMa quatre mois après mon recrutement

3.1. CONTEXTE DE MON ACTIVITÉ DE RECHERCHE

en septembre 2006, j'ai découvert dès mon arrivée une période de restructuration avec le rapprochement des laboratoires PRISMa et ICTT qui a conduit à la création du laboratoire LIESP.

3.1.2 Laboratoire LIESP

Le laboratoire LIESP a été créé le 01 janvier 2007 avec un projet portant sur le quadriennal 2007-2010. S'appuyant sur les compétences des membres des entités PRISMa et ICTT, il était structuré autour de quatre thèmes :

Thème 1 , Modèles pour l'analyse et l'aide à la décision, responsables A.Aussem (UCBL1) – H.Keddouci (UCBL1)

- Extraction de connaissance et algorithmes d'apprentissage pour l'aide à la décision
- Algorithmes de graphes dynamiques

Thème 2 , Organisation, Pilotage et Intégration, responsables V.Botta- Genoulaz (INSA) – A.Bouras(ULL2)

- Gestion et intégration des données produit et des connaissances métiers
- Intégration de l'information dans les entreprises
- Mutualisation et pilotage des ressources matérielles et humaines
- Configuration et management de chaînes logistiques

Thème 3 , Architectures distribuées et collaboratives, responsables F.Biennier (INSA) – C.Gertosio (UCBL1)

- Systèmes autonomes industriels
- Infrastructure des systèmes industriels distribués

Thème 4 , Interaction collaborative médiatisée, responsables B.David (ECL) – F.Tarpin-Bernard (INSA)

- Systèmes interactifs individuels et collectifs collaboratifs
- Environnements informatiques pour l'apprentissage humain.

En 2009 dans le dossier d'évaluation pour la préparation du quadriennal 2011-2014, le laboratoire LIESP comptait 32 enseignants-chercheurs dont 11 de l'Université Lyon 1, 33 doctorants et 3 personnels administratifs. Au regard de cette nouvelle organisation et du départ en retraite du professeur Michel MARTINEZ en 2008, les trois maîtres de conférences de l'IUT Lyon 1 dont moi ont rejoint le thème 2 et plus particulièrement les deux premières items de ce thème : Gestion et intégration des données produit et des connaissances métiers, et Intégration de l'information dans les entreprises. Pour mon intégration au sein de ce thème, le professeur Abdelaziz BOURAS m'a proposé en 2009 de co-encadrer la thèse de M. Anis BEN KHEDER financée par une allocation de recherche ministérielle sur la base d'un sujet faisant le lien entre les deux items évoqués précédemment autour des systèmes d'information d'entreprise et mes connaissances et compétences sur les systèmes de production. L'intitulé du sujet de thèse initial de M. Anis BEN KHEDER était «Intégration des systèmes d'information dédiés aux produits et à l'atelier de production».

Le contexte de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche évoluant avec de nouveaux indicateurs et de nouvelles stratégies conduisit à la création au 01 janvier 2011 du laboratoire DISP sur la base principalement des membres du thème 2 du laboratoire LIESP.

3.1.3 Laboratoire DISP

Le contexte de création du laboratoire DISP figurait ainsi dans le dossier d'évaluation de l'AERES⁹ en 2014 : «Le laboratoire DISP a été créé à la demande de la tutelle principale et s'est construit dans la continuité du thème « Organisation, Pilotage et Intégration » (noté A) du LIESP. Il est principalement adossé pour la part INSA sur le département Génie Industriel et pour la part Lyon 2 sur l'IUT Lumière.» En 2014 dans le dossier d'évaluation, le laboratoire DISP comptait alors 22 enseignants-chercheurs permanents dont pour l'Université Lyon 1, un membre (moi), plus un membre associé.

Lors du quinquennal 2011-2015, le laboratoire DISP était structuré en deux axes :

OCP Organisation, Coordination, Pilotage

- Gestion des Opérations
- Intégration et Alignement
- Pratiques collaboratives et Performance

MISI Modélisation, Intégration, Système d'Information

- Gestion du cycle de vie des produits et des services

9. Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur

- Ingénierie des connaissances dans un contexte cycle de vie produit/service
- Services collaboratifs pilotés par les processus métiers

Au sein de l'équipe MISI, mon activité de recherche était plus centrée sur la gestion du cycle de vie des produits et des services. Dans le cadre du projet quinquennal 2016-2020 et afin de favoriser les interactions entre les deux sites, le campus Lyon-Tech la Doua et l'IUT Lumière à Bron, une nouvelle structuration a été mise en place avec trois axes :

PSP Pilotage des Systèmes de production de biens et de services

- Niveau stratégique, configuration et collaboration
- Niveau tactique et opérationnel, dimensionnement et planification, tournée de véhicules, ordonnancement et planification, décision dirigée par les masses de données en santé

ASI Agilité des Systèmes d'Information

- Ingénierie des systèmes informatiques
- Qualification, capitalisation et gouvernance au sein des SI

MOCS Modélisation et Optimisation du Cycle de vie des Systèmes

- Cycle de vie des données produits
- Évaluation des activités et gestion des données de conception
- De l'usage à la fin de vie du produit, des données à exploiter

En 2019 dans le dossier d'évaluation, le laboratoire DISP comptait alors 28 enseignants-chercheurs permanents dont 2 de l'Université Lyon 1 suite au recrutement d'un nouveau collègue maître de conférences en 27^{me} section rattaché en enseignement au département GMP de l'IUT Lyon 1. Durant ce quinquennal 2016-2020, j'ai été responsable de l'axe MOCS avec ma collègue Aicha SEKHARI. Cette responsabilité a été présentée au chapitre précédent. Mon activité de recherche au sein de l'axe MOCS a concerné plus particulièrement la valorisation des données associées au cycle de vie des produits et des systèmes. Enfin suite à l'analyse menée en 2019 dans le cadre de l'évaluation HCERES, le projet pour le quinquennal 2021-2025 est structuré autour de deux axes et de trois domaines d'application. Les deux axes sont :

G2O Gestion et Optimisation des Organisations : organiser, piloter et améliorer la performance des systèmes de production de biens et de services et des chaînes logistiques dans des environnements dynamiques et incertains.

SIDo Systèmes d'Information et Données : caractériser, formaliser et implémenter la transformation digitale des entreprises par l'évolution des systèmes d'information avec une vision de cycle de vie des données, des produits / services et des systèmes complexes.

Je mène actuellement mon activité de recherche dans le cadre de l'axe SIDo dont je suis responsable avec mon collègue Jannik LAVAL. La structuration actuelle du laboratoire DISP est illustrée par la figure 3.3 avec l'objectif scientifique du laboratoire, sa double expertise, ses deux axes scientifiques et ses trois domaines d'application.

Après cette section consacrée à la présentation du contexte de mon activité de recherche repris sur la frise chronologique de synthèse page 53, la section suivante aborde les projets de recherche dans lesquels j'ai été impliqué.

3.2 Projets de recherche

Depuis 2006, j'ai été impliqué dans plusieurs projets de recherche d'abord en tant que responsable scientifique au titre de l'Université Lyon 1 puis comme participant. Cette section se termine par la liste des projets déposés mais malheureusement non financés !

3.2.1 Responsable scientifique

Projet FUI Traçaverre - 2012 à 2016

Le projet FUI Traçaverre concernait le développement d'un système de gestion de la traçabilité et de l'authentification des produits emballés dans du verre comme illustré sur la figure 3.4. Suite à des recherches préliminaires sur les technologies de marquage et de relecture de codes Datamatrix sur verre par Saverglass le porteur du projet, il est apparu que les procédés pressentis pour la sérialisation et le suivi des articles emballés dans du verre sont



FIGURE 3.3 – Présentation du laboratoire DISP

de nature à révolutionner la filière du verre dans son ensemble, par l'amélioration des fonctionnalités apportées à l'emballage en verre, matériau millénaire, mais également par sa signature numérique rendant actif l'emballage en verre lui-même, tout en préservant les aspects esthétiques chers aux clients.

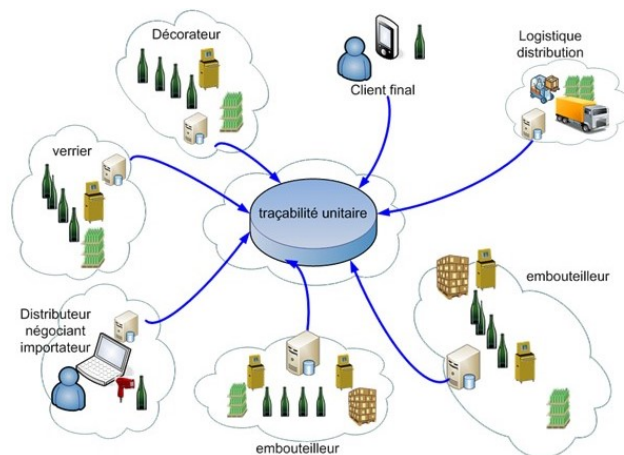


FIGURE 3.4 – Les acteurs de la traçabilité unitaire dans la filière des vins et spiritueux.

S'appuyant sur différentes technologies innovantes, la traçabilité unitaire, appuyée sur un système d'information dédié performant, répond à la préoccupation majeure des embouteilleurs, notamment en terme de réponse aux préoccupations de l'hygiène alimentaire avec le plan de maîtrise sanitaire. En effet, la traçabilité au niveau de la bouteille, et non plus du lot, permet de suivre très finement toutes les opérations subies par la bouteille et son contenu, en corrélant les informations de chaque article avec les événements horodatés de la production, parfois brefs, qui peuvent se produire à l'échelle industrielle. Il était donc d'ores et déjà pressenti des interactions fines entre le système d'information de traçabilité unitaire et les systèmes de traçabilité des process, dont le partenaire Courbon est expert. La possibilité de réduire une population suspecte à quelques dizaines plutôt qu'à un lot complet par le

biais d'une traçabilité ascendante et descendante précise, que le défaut se situe au niveau de la bouteille, de son décor, de son embouteillage, son habillage, son produit ou toute autre opération, constitue un potentiel conséquent d'amélioration de l'efficacité de la production à fabriquer des produits de qualité. Par ailleurs, la traçabilité unitaire ouvre également des perspectives de détection de marché gris (détournement du marché initialement prévu) et de la contrefaçon par des opérations de re-remplissage.

Le consortium était composé de trois entreprises et quatre laboratoires :

- Saverglass, spécialiste mondial de la fabrication, de la personnalisation et de la décoration de bouteilles en verre haut de gamme.
- Camus, producteur de Cognac depuis cinq générations
- Courbon Software, éditeur de logiciels MES pour les industriels de différents secteurs (agroalimentaire, pharmaceutique, chimie, manufacturier)
- INSA de Lyon avec le LIRIS, Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'Information, pour la lecture des datamatrix gravés sur du verre avec des équipements mobiles et l'identification des marchés gris par l'analyse des traces
- Université Lyon 1 avec le DISP, Laboratoire de Décision et Information pour les Systèmes de Production, pour l'analyse des défauts verriers et l'optimisation des campagnes de rappels.
- Université de Lille avec l'IEMN, Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, pour la conception d'étiquette RFID compatible avec les produits verriers.
- INRIA avec l'équipe FUN, pour le développement d'intergiciel RFID.

La thèse de M. Thieno DIALLO dont les résultats sont présentés au chapitre 5 a été financé par ce projet. Pour l'Université Lyon 1, établissement bénéficiaire du financement pour les travaux relevant du DISP, j'ai assuré la responsabilité scientifique de ce projet et sa gestion avec l'appui de Lyon Ingénierie Projet¹⁰, filiale de l'Université Lyon 1.

Projet ANR DT4CPS - 2024 à 2028

Le second projet dont je suis responsable scientifique au titre de l'Université Lyon 1 est le projet ANR «Digital Twin for Cyber-Physical System» lauréat de l'appel à projet générique 2023. Ce projet de recherche collaborative (PRC) relève de l'axe H.19 : Industrie et usine du futur : Homme, organisation, technologies. Initié en 2020 par le professeur Bernard RIERA, la coordination a été reprise par le professeur Alexandre PHILIPPOT lors de cette troisième soumission.

Outre l'aspect coordination de projet du WP0, le projet DT4CPS s'appuie sur le scénario représenté en figure 3.5. On y retrouve la nécessité de disposer d'une architecture entre un Jumeau Numérique (JN) et un Jumeau Physique (JP) multi-échelles et donc multi-modèles permettant l'échange de données. Sur la phase de production, l'exploitation du JN ne pourra se faire que si celui-ci est aligné avec son JP. Il en découle une première phase de calibration du JN puis une deuxième de synchronisation entre jumeaux avant une dernière phase dynamique de correction en cas de défaut d'alignement. Une demande de reconfiguration (logique ou physique) du SCPP passera par une étape de déphasage des jumeaux afin d'évaluer les capacités de reconfigurabilité du système sur le JN par une mise en service virtuelle avant de reconfigurer le JP en garantissant la sûreté de fonctionnement lors de cette étape. Le SCPP se retrouve alors comme dans la phase initiale et nécessite à nouveau de passer par les étapes de calibration/synchronisation/correction.

Le consortium du projet ANR DT4CPS est constitué de trois laboratoires : CReSTIC, coordonnateur du projet, QUARTZ et DISP. Le projet comporte donc cinq Work Package (WP) avec les objectifs suivants :

- WP0, Coordination
- WP1, Méthodologie pour la mise en place d'un JN multi-échelles, un postdoctorant DISP
- WP2, Garantir l'alignement des jumeaux, avec un doctorant co-encadré QUARTZ/DISP
- WP3, Méthodes et outils pour la commande et la reconfiguration, un doctorant co-encadré CReSTIC/QUARTZ
- WP4, Cas d'usage, démonstrateurs et expérimentations, un postdoctorant CReSTIC.

Le lancement officiel du projet aura lieu en janvier 2024 mais le recrutement du premier postdoctorant est en cours pour le WP1. Pour le laboratoire DISP, l'établissement bénéficiaire de la subvention est l'Université pour laquelle j'assume la responsabilité scientifique du projet avec le support de Lyon Ingénierie Projet.

10. <https://www.univ-lyon1.fr/universite/organisation/lyon-ingenierie-projets>

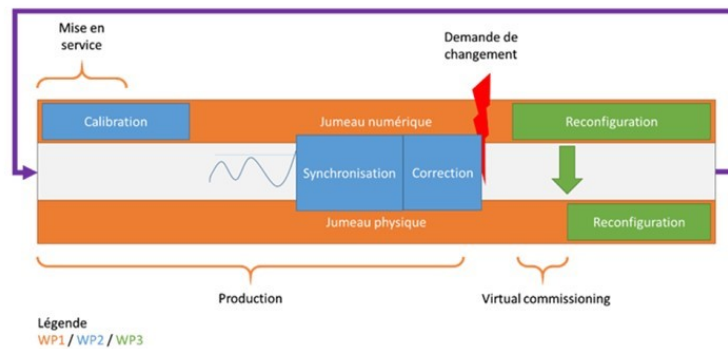


FIGURE 3.5 – Les acteurs de la traçabilité unitaire dans la filière des vins et spiritueux.

Thèse CIFRE en partenariat avec McPhy

Actuellement en attente du retour de l'ANRT¹¹, une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) est en préparation entre l'entreprise McPhy Energy à Grenoble et l'Université Lyon 1 pour le financement de la thèse de M. Ismail RAMDE. McPhy Energy est une entreprise française du secteur de l'énergie, développant des solutions de production, distribution et stockage d'énergie en utilisant l'hydrogène comme vecteur énergétique. La demande auprès de l'ANRT étant en cours d'expertise à l'heure de la rédaction de ce mémoire, le projet ne sera pas précisé davantage.

Après cette présentation des projets gérés au sein de l'Université Lyon 1 et dont je porte la responsabilité scientifique, les projets auxquels j'ai participé sont maintenant présentés brièvement.

3.2.2 Participant

Erasmus Mundus cLink, 2012-2016, Université Lyon 2

Clink (Centre of excellence for Learning, Innovation, Networking and Knowledge) est un projet de l'UE (ERASMUS MUNDUS) visant à favoriser les partenariats des pays émergents d'Asie (Bangladesh, Bhoutan, Népal, Pakistan, Chine, Inde, Malaisie et Thaïlande) avec les pays de l'UE (Allemagne, Roumanie, Hongrie, France et Royaume-Uni) pour renforcer les collaborations existantes développées dans le cadre du projet EAST-WEST Asia Link, eLINK et eTourism. L'objectif principal du consortium cLINK est de renforcer la capacité de coopération internationale entre les universités des pays asiatiques et européens en facilitant le transfert de personnes, de savoir-faire, de culture et de meilleures pratiques dans la formation de la prochaine génération de chercheurs et de personnel universitaire.

Ce projet a notamment permis d'accueillir au laboratoire DISP de nombreux étudiants de master et de doctorant ainsi que des enseignants-chercheurs. Il a notamment permis de financer les deux premières années de thèse en France de M. MISHRA Dharmendra que j'ai co-encadrée à 33% et dont les résultats sont présentés au chapitre 5.

Erasmus Mundus Smart Link, 2014-2018 Université Lyon 2

Le projet SmartLink (South-east-west Mobility for Advanced Research, Learning, Innovation, Network and Knowledge) vise à favoriser la coopération internationale entre les établissements d'enseignement supérieur européens (EES) et les EES des pays émergents d'Asie à travers la promotion de la mobilité à tous les niveaux d'études. Le projet a soutenu 116 mobilités de l'Asie vers l'Europe et 44 mobilités d'Europe vers l'Asie. La coopération SmartLink couvre diverses disciplines avec un fort accent sur la recherche et la formation dans le domaine des technologies intelligentes pour un large éventail de domaines d'application : communication, gouvernance, gestion agricole, gestion des déchets, gestion de l'énergie, gestion de la santé publique, éducation, gestion des transports/logistique.

Ce projet a notamment permis de financer les deux premières années de thèse en France de Mme Siraprapa WATTANAKUL que j'ai co-encadrée à 50% et dont les résultats sont présentés au chapitre 5.

11. Association Nationale de la Recherche Technologique

Allocation recherche régionale

En collaboration entre les laboratoires GSCOP et DISP, ce projet comportant une demande d'allocation de recherche a été déposé dans le cadre de l'appel à projet 2013 régional, Communauté de recherche académique, ARC 8 «Industrialisation et sciences de gouvernement». Il avait pour objectif l'étude de fonctionnalités génériques et paramétrables de diagnostic et de pronostic pour l'amélioration de la réactivité aux aléas de fonctionnement dans le domaine pharmaceutique en partenariat avec la société Courbon Software.

Ce projet a financé la thèse de M. Hoang NGOC que j'ai co-encadré à 50% et dont les résultats sont présentés au chapitre 5.

CIFRE - Energy Pool

Cette convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE) a été établie entre l'entreprise Energy Pool à Lyon et l'Université Lyon 2 dans le cadre de la thèse de M. Alnour RIBAUULT que j'ai co-encadré à 33%. Les résultats de cette thèse sont présentés au chapitre 5.

CIFRE - INFOLOGIC

Cette convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE) a été établie entre l'entreprise INFOLOGIC à Valence et l'INSA de Lyon dans le cadre de la thèse de M. Aurélien CADIOU que j'ai co-encadré à 50%. Les résultats de cette thèse sont présentés au chapitre 5.

Action GDR MACS - JN systèmes de production

L'action «Jumeaux Numériques de Systèmes de Production» du GDR MACS ¹² a été portée par les professeurs Nabil ANWER, Cédric BELER, Vincent CHEUTET et Bernard RIERA. Cinq membres dont moi ont par ailleurs été impliqués dans cette action. Elle a été pensée dès le début en forte interaction entre le GDR MACS, la SAGIP et le GIS S.Mart, afin de fédérer les membres concernés de ces trois communautés. Une diffusion auprès de plusieurs partenaires industriels a aussi été faite, vu le fort aspect applicatif du sujet. En bilan, plus de 280 personnes se sont inscrites aux quatre ateliers, dont au moins 30 industriels. Dans un contexte de crise de la COVID, quatre web-séminaires sur un sujet précis, permettant au plus grand nombre de participer ont été réalisés :

- Atelier 1, 28 juin 2021 : Quelle est la place de l'humain dans le Jumeau Numérique ? Du simple observateur, au décisionnaire à un «composant» à part entière du Jumeau.
- Atelier 2, 21 octobre 2021 : Comment tester et valider un Jumeau Numérique ? Quels test-bed ou proofs of concept sont possibles ? Une certification est-elle possible ?
- Atelier 3, 6 janvier 2022 : Comment développer un Jumeau Numérique ? Quelle standardisation d'un Jumeau Numérique ?
- Atelier 4, 24 mars 2022 : Systèmes de Jumeaux : application au territoire, supply chain, etc.

Après cette brève présentation des projets dans lesquels j'ai été impliqué, la section suivante dresse la liste des projets déposés mais qui n'ont malheureusement pas été financés.

3.2.3 Déposés et non financés

Le montage de projets est une partie intégrante de mon activité de recherche. Les demandes de financement ne sont pas toujours couronnées de succès mais leur rédaction est un travail de collaboration avec différents partenaires et une expérience indispensable pour progresser dans cet exercice. La liste des projets déposés avec des partenaires mais non financés est la suivante :

- 2014, ANR RobotTalk, Robot Cognition Laboratory (INSERM, U Lyon 1), laboratoire DISP (U Lyon 1) et entreprise Rhonalpex
- 2014, H2020 SME Robotic, Bristol Robotics Laboratory, INSERM (U Lyon 1), FORTIS Technical University of Munich, COMAU
- 2015, EU ECHORD SmartRobot, Robot Cognition Laboratory (INSERM, U Lyon 1), laboratoire DISP (U Lyon 1) et entreprise Rhonalpex
- 2016, FUI Flexia, SOFRADIR, ProBayes, Ordinal Software, laboratoires DISP (U Lyon 1) et GSCOP

12. <https://action-jn.sciencesconf.org/>

3.3. EXPERTISE SCIENTIFIQUE

- 2017, H2020 S-REST, Université Lyon 2, Hypercliq, Atos Spain, Institute of Biomechanics of Valencia, Huate école spécialisée de suisse occidentale, Adimme, eZee suisse, Asana weartech, Ci3 RTD, ENVIE et TXT.
- 2018, Région pack ambition recherche, 2M2EProd, laboratoires DISP (U Lyon 1) et entreprise Pfeiffer Vacuum
- 2019, FlexEnergi, laboratoire DISP (U Lyon 2) et entreprise Energy Pool
- 2020, Jumeau Numérique de réseaux électriques, Supergird Institut, laboratoire DISP (U Lyon1) et AMPERE
- 2021, IA Doc Université de Lyon, projet AI Factory, laboratoires DISP (U Lyon 1) et AMPERE
- 2022, IRT SystemX, Jumeaux Numériques d'usine.

Suite à cette section de présentation des projets dans lesquels je me suis impliqué, la section suivante est consacrée à un récapitulatif des sollicitations en tant qu'expert scientifique.

3.3 Expertise Scientifique

Les sollicitations en tant qu'expert scientifique concerne la participation à des jurys de thèse, à des comités de suivi individuel de thèse et enfin la relecture d'articles de revues et de conférences.

3.3.1 Jury de thèse

A ce jour, j'ai été sollicité quatre fois pour être examinateur de travaux de thèse :

- DUONG Quoc Bao, Approche probabiliste pour l'estimation dynamique de la confiance accordée à un équipement de production : vers une contribution au diagnostic de services des SED, Université Grenoble Alpes, 2012.
- Dang-Trinh NGUYEN, Diagnostic en ligne des systèmes à événements discrets complexes : approche mixte logique/probabiliste, Université de Grenoble Alpes, 2015.
- Douha MACHERKI, Contribution à la gestion de l'adaptabilité et de l'évolutivité des systèmes cyber-physiques de production (CPPS - Cyber-Physical Production Systems), CY Cergy Paris Université en cotutelle avec École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2022.
- BAUDET Amaury, Development of an Intrusion Detection System (IDS) for SCADA systems (intitulé provisoire), INSA Lyon, 2024.

3.3.2 Comité de suivi individuel de thèse

Par ailleurs, j'ai été sollicité pour être membre d'un comité de suivi individuel de thèse actuellement en cours :

- ABDELLAOUI-SARA, Détection des Cyber-attaques contre les Systèmes de Surveillance des Appareils de Voie Ferroviaires, INSA Lyon, 2022-2025.

3.3.3 Conférences et revues

En tant qu'expert scientifique, je suis également régulièrement sollicité pour la relecture d'articles de revues et de conférences internationales :

- Revues : IJCIM, IJPD, IJPLM, IJCIM
- Conférences : EDSA, ETFA, ICALT, SKIMA, PLM

Après ces actions d'expertise scientifique, la section suivante dresse le bilan des actions en faveur de la formation à la recherche.

3.4 Encadrement doctoral et de master

Les 7 doctorants co-encadrés et les 2 autres dont j'assurerai la co-direction figurent sur la frise chronologique de synthèse page 53 et les résultats de leurs travaux sont détaillés dans le chapitre 5. Cette section sera donc limitée à donner la liste des étudiants de Master encadrés :

- Somayeh GHAHREMANI, Apports des langages de planification automatique pour la génération de programmes de commande, Master Informatique CODE, Université Lyon 1, 2007.

- Guy Richard SAMEDY, Synthèse de lois de commande avec des contraintes de précedence liées à des opérations non-contrôlables, Master Informatique CODE, Université Lyon 1, 2007.
- Mohamed Labi KRID, Méthode de conception d'un Manufacturing Execution System, Master Génie des systèmes automatisés, co-encadré à 50% avec Laurent PIETRAC, INSA Lyon, 2008.
- Shehzaib SUNNY, Implementation of the Windchill MPM Link module to integrate Windchill PLM solution and Global Screen Intra MES (Manufacturing Execution System) solution, programme international eLINK, Université Lyon 2, 2010
- Mohammad Nazrul ISLAM, Academic and Industrial based Literature on Digital Manufacturing and Manufacturing Process Management, programme international eLINK, Université Lyon 2, 2010
- ALVES PEREIRA FILHO Josse Eduardo, Automatic reconfiguration of an HVDC network based on automated planning and acting, Ecole Centrale de Nantes, Supergrid Institut, co-encadré à 50% avec Eric ZAMAI, 2021.

3.5 Production scientifique

L'ensemble de la production scientifique figure sur la frise chronologique de synthèse page 53 et toutes les références bibliographiques sont classées dans le CV détaillé présenté au début de ce mémoire. Le lecteur est invité à se reporter à ces deux éléments. Enfin, les références sont cités dans la présentation des résultats au chapitre 5.

3.6 Conclusion

Ce chapitre conclue la première partie de synthèse de mes activités d'enseignant-chercheur depuis 2006. Il a été consacré à la présentation de mon activité menée dans différentes entités et au sein de différents équipes et axes. Après avoir exposé ces différentes restructurations, ce chapitre a dressé un bilan des projets de recherche dans lesquels j'ai été impliqué, d'abord en tant que responsable scientifique puis comme participant. Mener des projets de recherche nécessite d'abord de pouvoir les financer en répondant à divers appels à projet : européens, nationaux avec les appels ANR et FUI, et enfin régionaux. Une part importante de l'activité de recherche est donc consacrée à la recherche de financement et à la rédaction de projets. Pour cette raison, la liste des projets déposés mais non financés a été dressée dans ce chapitre. L'expertise d'un enseignant-chercheur est sollicitée pour différentes actions qui ont été récapitulées. Puis, une section a été consacrée à mon implication dans la formation à et par la recherche au travers un récapitulatif des encadrements de doctorants et de stagiaire de master. Une section sur la production scientifique ponctue ce chapitre sur mon activité de recherche.

Partie B
**Problématique scientifique, résultats et
projet**

Chapitre 4

Estimer l'état d'un Système Cyber-Physique de Production

Ce premier chapitre de la seconde partie de ce mémoire vise à préciser la problématique scientifique de mes travaux de recherche développés depuis 2006. Sans surprise et sans dévoiler un élément clé de la suite de ce chapitre au point de gêner le plaisir du lecteur, un système cyber-physique est composé d'une part d'un système cyber et d'autre part d'un système physique, ce qui fait déjà trois systèmes différents dans le monde réel : le système dans son ensemble, le système cyber et le système physique. Ces systèmes réels sont ceux précisément dont nous souhaitons améliorer les performances en développant des outils d'aide à la décision. Ajouté à cela le modèle de chacun de ces systèmes, lui même nommé couramment système comme pour les systèmes à événements discrets, nous sommes alors face à potentiellement six systèmes différents, trois qui existent dans le monde réel servant par exemple à produire et trois autres qui sont leur représentation formalisée avec un certain point de vue dans un objectif bien déterminé.

Afin de préciser ces éléments et ceux sur lesquels les travaux présentés dans cette seconde partie portent en particulier, la première section rappelle donc la notion de système, de modèle, d'état et enfin les différentes approches de modélisation par un système à état continu, par un système à état discret ou par un système hybride. Il est toujours essentiel pédagogiquement de rappeler les éléments qui pourraient paraître comme des évidences. Après cette première section basée bien évidemment sur le livre incontournable "Introduction to Discrete Event Systems" [Cassandras and Lafortune, 2008], l'histoire de la quatrième révolution industrielle actuellement en cours est conté à travers une synthèse des initiatives internationales et une discussion sur le concept sous-jacent fondamental de système cyber-physique (Cyber-Physical System - CPS). Par déclinaison de ce concept aux systèmes de production, le concept de Système Cyber-Physique de Production (Cyber-Physical Production System - CPPS) est introduit dans la troisième section qui amène à s'interroger sur les raisons de la modélisation et de l'observation des CPPS. Les notions d'autonomie et de reconfiguration sont régulièrement mentionnées dans les extrêmement nombreuses publications scientifiques sur les CPPS. Ces deux notions sont discutées avant de conclure ce chapitre amenant à la problématique scientifique de mes recherches.

4.1 Système à événements discrets

Ma problématique scientifique globale étant d'estimer l'état d'un système cyber-physique de production, les concepts de système et d'état constituent donc le socle de cette problématique. Ils sont l'objet de cette première section avec une attention particulière à la classe des systèmes à événements discrets qui sont devenus une partie intégrante de notre monde qui recherche en permanence à améliorer les organisations dans un contexte de transformation digitale qui s'accélère.

En effet dans notre vie quotidienne immergée dans un monde de performance et de technologie de plus en plus numérique, nous pouvons faire deux constats. Premièrement, le contrôle et le pilotage des processus physiques par un système cyber est largement basé sur des événements tout en intégrant des systèmes continus. Deuxièmement, l'amélioration des performances des organisations repose sur la modélisation de processus qui dépendent "d'événements instantanés" tels que la validation d'une commande par un clic de souris sur site web, la réception d'une facture qui m'informe de devoir payer, le passage d'un feu de circulation au vert, la réception d'une notification

sur mon smartphone, un message publié sur un réseau social jusqu'à l'appui sur une touche du clavier. Chaque jour dans notre vie quotidienne, des événements déclenchent nos actions qui génèrent elles mêmes de nouveaux événements pour d'autres, actions et personnes. Alors même que très peu de personnes connaissent finalement le concept scientifique d'événement et les outils mathématiques associés, avoir fini ces devoirs est un événement extrêmement important dès l'âge de six ans jusqu'à parfois plus de vingt trois ans ! Avant d'aborder cette notion d'événement, commençons d'abord par celui de système.

4.1.1 Système et modélisation

Comme tout concept, il existe plusieurs définitions de celui de système. La première définition correspondant au concept moderne de système est issue du livre "Le Traité des systèmes" publié en 1749 par Etienne Bonnot de Condillac [Bonnot de Condillac, 1749] qui en donne la définition suivante : "le système est ce qui permet à l'esprit humain de saisir l'enchaînement des phénomènes". Les systèmes n'existent pas dans la nature, mais sont des projections de l'esprit humain pour la modélisation et l'analyse des phénomènes naturels et artificielles notamment depuis le XX siècle.

Ce concept très général est de manière intuitive facilement accepté et très peu questionné alors même qu'une définition exacte n'est pas simple à formuler et à interpréter comme le démontre les très nombreuses publications dans le domaine de la théorie des systèmes [Moigne, 1994]. L'objet de cette section n'étant pas de présenter cette théorie, nous prendrons comme exemple deux définitions du concept de système, une plus destinée au grand public et une autre issue d'un standard.

- Larousse : Ensemble d'éléments considérés dans leurs relations à l'intérieur d'un tout fonctionnant de manière unitaire.
- IEEE : Une combinaison de composants qui agissent ensemble pour exécuter une fonction impossible avec aucune des pièces prises individuellement.

Dans ces deux définitions, nous retiendrons d'une part la notion d'interaction entre des composants et d'autre part la finalité du système en terme de fonction. Mais, ces deux définitions ne mentionnent pas la finalité du concept de système contrairement à celle d'Etienne Bonnot de Cornillac qui fait référence à la compréhension de "l'enchaînement des phénomènes" par l'esprit humain au XVIII siècle mais aussi désormais par les calculateurs.

Cependant, c'est le modèle d'un système réel qui nous permettra d'atteindre cet objectif. Le processus de modélisation commence par l'identification d'un ensemble de variables mesurables associées à un système donné. Ensuite comme indiqué sur le figure 4.1, nous considérons les entrées comme un sous-ensemble des variables que nous pouvons faire varier dans le temps. Enfin, nous considérons les sorties comme un autre sous-ensemble des variables sur lesquelles les effets des entrées ont un intérêt particulier.

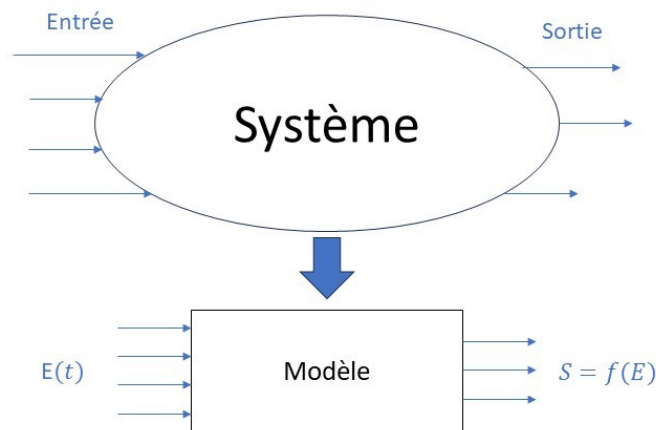


FIGURE 4.1 – Processus simple de modélisation d'un système.

La figure 4.2 illustre ce processus de modélisation pour un système réel extrêmement simple composé d'un tube, d'un piston avec une tige. Si ce système est modélisé avec la position x du piston comme entrée et le débit volumique D_v comme sortie, alors ce modèle représente le comportement d'une pompe à vélo ! En revanche, si le débit D_v est considéré comme une entrée et la position x comme une sortie, alors nous avons modélisé un vérin pneumatique...

4.1. SYSTÈME À ÉVÉNEMENTS DISCRETS

Cet exemple simple illustre le rôle essentiel du "modélisateur" qui doit identifier ces variables d'entrées et de sorties au regard de la fonction du système et selon un point de vue particulier dépendant de la finalité du modèle. Pour conclure, un système est quelque chose de réel alors qu'un modèle est une abstraction. Le modèle ne fait qu'approcher le véritable comportement du système réel. Malgré ces différences et après un rude effort de modélisation, cette distinction est facilement abandonnée. Les termes système et modèle sont couramment utilisés de manière interchangeable comme le mentionne [Cassandras and Lafortune, 2008]. L'intitulé de cette section illustre parfaitement bien ces propos "état d'un système à événement" discrets". Il aurait du être "état d'un modèle à événement discret". Cette distinction sera néanmoins encore un peu conservée dans cette section.

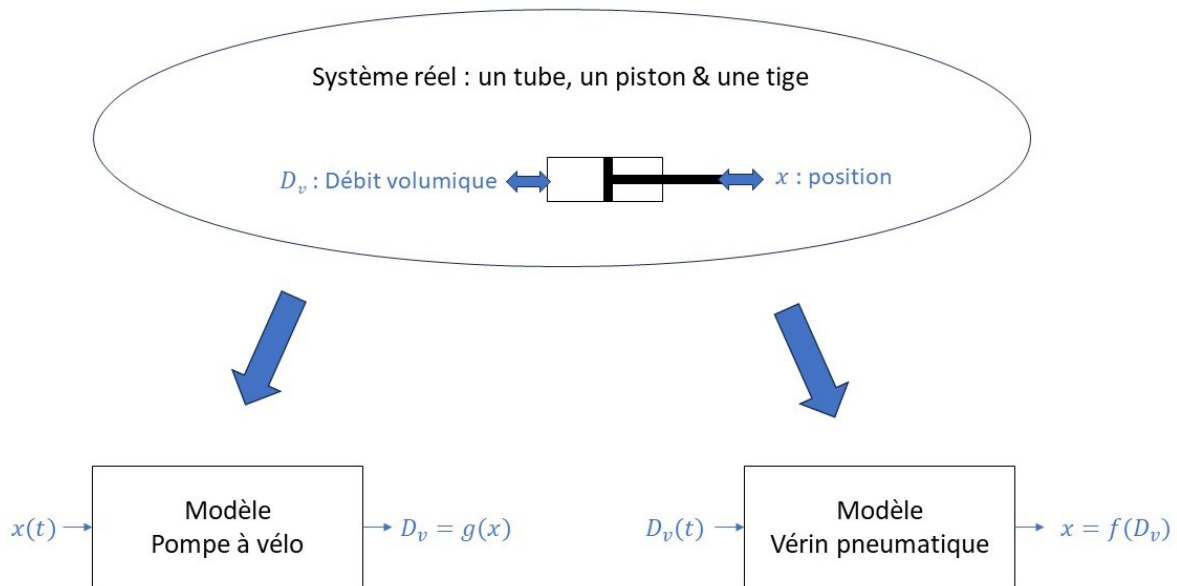


FIGURE 4.2 – Un système mécanique, deux usages et deux modèles.

En mécanique, le principe fondamental de la dynamique conduit à un modèle avec un comportement extrêmement proche de celui du vérin réel, du moins pour les premiers cycles du vérin. Le comportement du vérin réel va évoluer dans le temps sous l'effet des phénomènes d'usure, de lubrification jusqu'à des phénomènes de grippage, ou tout simplement d'obstruction partielle d'un orifice d'air. Nous essaierons dans la suite de ce mémoire de ne pas oublier le système réel, celui là même dont nous souhaitons améliorer les performances tout comme les industriels pour qui c'est économiquement essentiel. Dans un contexte de système de production soumis à un très grand nombre d'aléas et dont l'implication humaine indispensable dans le fonctionnement apporte son lot d'incertitude et de perturbation, les travaux présentés dans ce mémoire ne vise pas à trouver une solution optimale pour un système qui est en fait un modèle avec toutes ses approximations présentes et futures mais bien d'essayer d'améliorer les performances d'un système réel en considérant dans le temps l'impact potentiel de tous ces aléas. Même si cette direction est parfois difficile à conserver, cela reste une volonté.

Après ces concepts de système et de modèle, abordons celui intimement lié d'état.

4.1.2 État d'un système

Avant d'aborder la question de l'état d'un système, il s'avère d'abord nécessaire de préciser les caractéristiques des systèmes dont nous souhaitons définir l'état.

Système dynamique

Au regard de la figure 4.1, la première de ces caractéristiques est lié à la dépendance vis à vis du temps de la relation entre la sortie $S(t)$ et l'entrée $E(t)$. Le système est dit statique, si la sortie $S(t)$ est indépendante des valeurs passées de l'entrée $E(T)$, $T < t$ pour tout t . Dans le domaine de l'automatisme avec des entrées et des sorties booléennes, le système est qualifié de combinatoire. Il est alors possible de déterminer une relation logique entre une sortie et les entrées uniquement sans autre variable.

Un système dynamique est donc un système dans lequel la sortie dépend des valeurs passées des entrées. Dans l'exemple du vérin de la figure 4.2, cela revient à considérer que la sortie $x(t)$ dépend de la valeur présente de $D_v(t)$ et de ses valeurs passées $D_v(T), T < t$ pour tout t . Dans ce cas en automatisme, le système est qualifié de séquentiel. En pratique dans le domaine de la production industrielle, les systèmes sont très majoritairement dynamiques et sont ceux sur lesquelles les problématiques scientifiques se focalisent aujourd'hui.

Système invariant

Une autre question se pose alors : la sortie est-elle toujours la même lorsque la même entrée est appliquée ? La réponse dépend des systèmes qui caractérisent deux classes : systèmes dynamiques invariants dans le temps et ceux variables dans le temps. Si la relation $f()$ entre la sortie $S(t)$ et l'entrée $E(t)$ est indépendante du temps, alors le système est dit invariant dans le temps, ou stationnaire, et la relation s'écrit $S = f(E)$. Lorsqu'une réplique de la fonction $E(t)$ est appliquée comme entrée au temps $t = T > 0$, la sortie résultante est une réplique exacte de la fonction $S(t)$.

Dans le cas d'un système dynamique variable, la fonction $f()$ est explicitement dépendante de la variable temporelle t . La relation entre entrée et sortie s'écrit alors $S = f(E, t)$.

Pour définir maintenant la notion d'état, nous allons considérer des systèmes dynamiques invariants.

Modèle à états discrets

L'état d'un système au temps t_0 est l'information requise à t_0 telle que la sortie $S(t)$, pour tout $t \geq t_0$, est déterminée de manière unique à partir de cette information et de $E(t), t \geq t_0$. De cette définition découle alors les notions de variables d'état, d'équation d'état et d'espace d'état. En considérant des variables continues dans le temps comme c'est le cas dans de nombreux domaines scientifiques depuis fort longtemps (mécanique, électricité, économie, etc), les modèles dit à états continus aboutissent alors à l'analyse d'équations différentielles, pour lesquelles de nombreux outils mathématiques de résolutions existent. Nous parlons alors de modèle à états continus.

Cependant, rien n'impose que les variables d'état prennent toujours une valeur numérique réelle, par opposition aux valeurs entières ou simplement aux valeurs d'un ensemble discret, telles que $\{\text{rentré, ni rentré ni sorti, sorti}\}$, $\{\text{vert, orange, rouge}\}$. Le comportement dynamique des modèles à états discrets est souvent plus simple à se représenter. En effet, le principe de changement d'état est basé sur de simples conditions logiques du type "si dans l'état actuel, quelque chose se produit, alors l'état change". En contrepartie de cette apparente facilité de représentation, les approches et outils mathématiques permettant d'exprimer formellement les équations d'état et de les résoudre sont tout autant complexes.

Afin d'illustrer ces deux classes de modèles, le système considéré est un vérin représenté sur la figure 4.3. En fonction du débit volumique D_v , la quantité d'air va augmenter dans la chambre du vérin provoquant une augmentation de la pression jusqu'à modifier la position x du piston. En fonctionnement normal, ce mouvement va se poursuivre jusqu'à l'arrivée en butée mécanique du piston. Le débit volumique D_v va alors devenir nul sauf à atteindre une pression infinie !

Les deux modèles évoqués précédemment sont représentés sur la figure 4.3 :

— Modèle à états discrets. Les variables sont définies par un ensemble de valeurs discrètes,

$$x \in \{\text{rentré, ni rentré ni sorti, sorti}\}$$

— Modèle à états continus. Les variables évoluent de manière continue avec le temps qui peut être continu ou discret. Dans le modèle à états continus et à temps discret,

$$x \in \{0, x(t_1), x(t_2), x(t_3), x(t_4), 50, x(t_6), x(t_7), x(t_8), x(t_9), 100\}$$

Si la période d'échantillonnage tend vers 0, alors nous retrouvons un modèle à état continu et temps continu où,

$$x \in [0, 10]$$

Il a semblé préférable de présenter ici le modèle à états continus et temps discret afin d'éviter toute confusion avec le modèle à états discrets. Les modèles à états continus et à temps discret découlent de l'acquisition numérique de signaux continus et sont très largement étudiés par la communauté scientifique du traitement du signal à travers les systèmes linéaires discrets invariants dans le temps (LIT). Pour les modèles à états discrets, le temps peut être une variable continue ou discrète. Ce point relève de considérations plus technologiques et par conséquent ne sera pas abordé ici. L'essentiel est la notion de modèle à états discrets à retenir dans le cadre de la problématique scientifique des travaux faisant l'objet de ce mémoire.

La seule question évoquée jusqu'à présent a été de définir les évolutions de la sortie du système pour une entrée donnée. Il reste donc à savoir comment faire évoluer l'entrée du système qui doit remplir une fonction conformément

4.1. SYSTÈME À ÉVÉNEMENTS DISCRETS

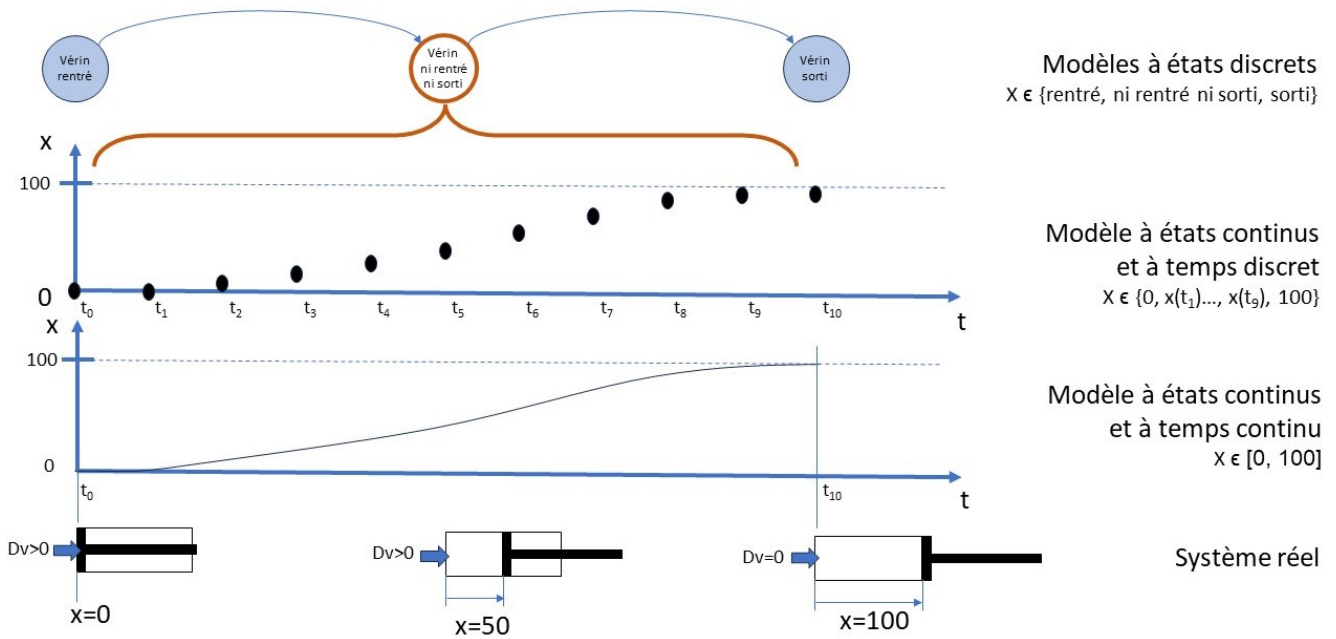


FIGURE 4.3 – Les différents modèles de sorti d'un vérin.

à sa définition. Le système doit donc être contrôlé pour faire évoluer son entrée afin d'obtenir le comportement souhaité. Nous pouvons maîtriser parfaitement notre vélo et connaître par coeur un trajet, la longueur des lignes droites, le rayon de courbure de chaque virage jusqu'aux défauts de la route comme la présence de nids de poule et pourtant, nous n'effectuerons jamais le trajet les yeux fermés ! Cela correspondrait à contrôler le système *vélo* en boucle ouverte. Nos cinq sens nous permettent de contrôler le vélo en boucle fermée et à corriger en permanence la trajectoire jusqu'à pouvoir parer aux imprévus et arriver à destination.

Modèles et leur usage

Ce besoin de contrôler un système représenté par un modèle à états discrets requiert désormais d'introduire le concept d'événement. Un événement doit être considéré comme se produisant instantanément et provoquant un changement d'état. Comme représenté sur la figure 4.4, le modèle à états discrets du vérin peut alors être complété avec deux événements. Le premier événement correspond à l'arrivée d'air comprimé dans la chambre du vérin. Sachant le débit initialement nul, l'événement sera observé quand le débit d'air deviendra positif, noté $D_v > 0$. Le second événement correspond à l'arrivée en butée du piston qui est assimilé à un débit d'air nul, noté $d_v = 0$. A titre d'exemple, le comportement est volontairement simplifié notamment en ne considérant pas la pression.

Nous pouvons remarquer que le système de contrôle pourra décider de l'occurrence du premier événement $D_v > 0$, cet événement est dit contrôlable. Le système de contrôle est dans 99,99% des cas aujourd'hui un système cyber. D'un point de vue technologique, un système cyber qui contrôle un vérin est un système numérique qui peut piloter des courants faibles mais pas directement de l'air comprimé. Ainsi comme représenté sur la 4.4, le système cyber va piloter la bobine d'un distributeur qui va lui piloter le débit d'air.

Depuis l'état "ni rentré ni sorti", le second événement n'est pas contrôlable par la partie cyber qui se retrouvera donc à attendre son occurrence. Par conséquent, ce second événement sera associé soit à un modèle temporel de l'évolution du système physique définissant sa durée pour un contrôle en boucle ouverte, par exemple avec une durée de l'action "sortir" estimée à moins de trois seconds, soit à l'observation de l'état du système réel pour un contrôle en boucle fermée, par exemple avec $C_{v,s} = 1$ pour le capteur vérin sorti vrai.

Ces deux modèles à états discrets avec ou sans observation de l'état du système serviront pour la conception de la commande. Chaque modèle comporte une approximation : le capteur $C_{v,s}$ passera à 1 avant que le vérin soit totalement sorti alors que généralement la durée estimée de l'action sera toujours supérieure à la durée réel. L'état "vérin sorti" ne sera pas atteint au même moment en fonction du modèle. Cet exemple extrêmement simple illustre les "petits" écarts de comportement entre le système et son modèle qui pourraient se cumuler et aboutir à un écart global trop important au regard d'un objectif d'aide à la décision et d'amélioration des performances. En

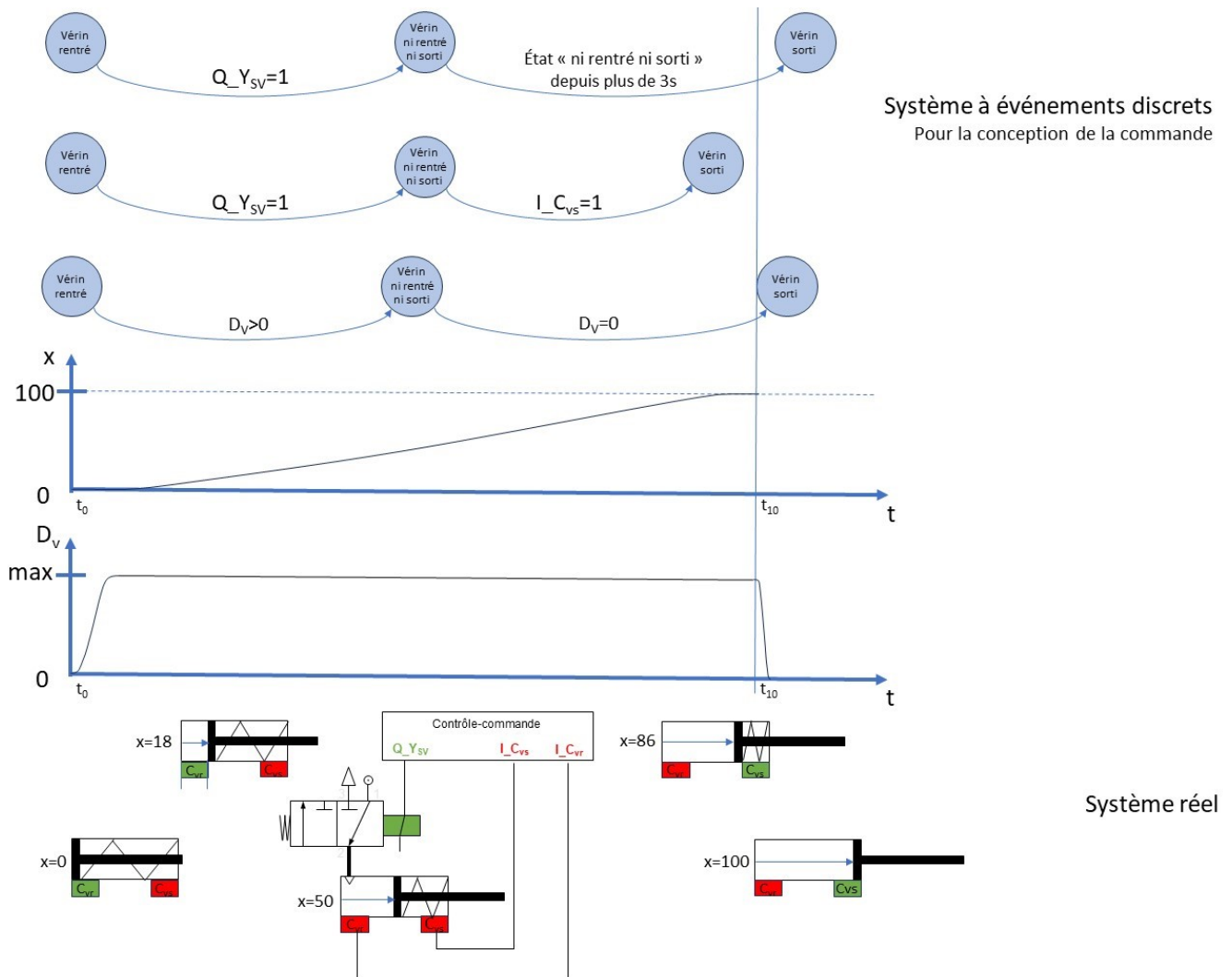


FIGURE 4.4 – Système à événements discrets pour la commande.

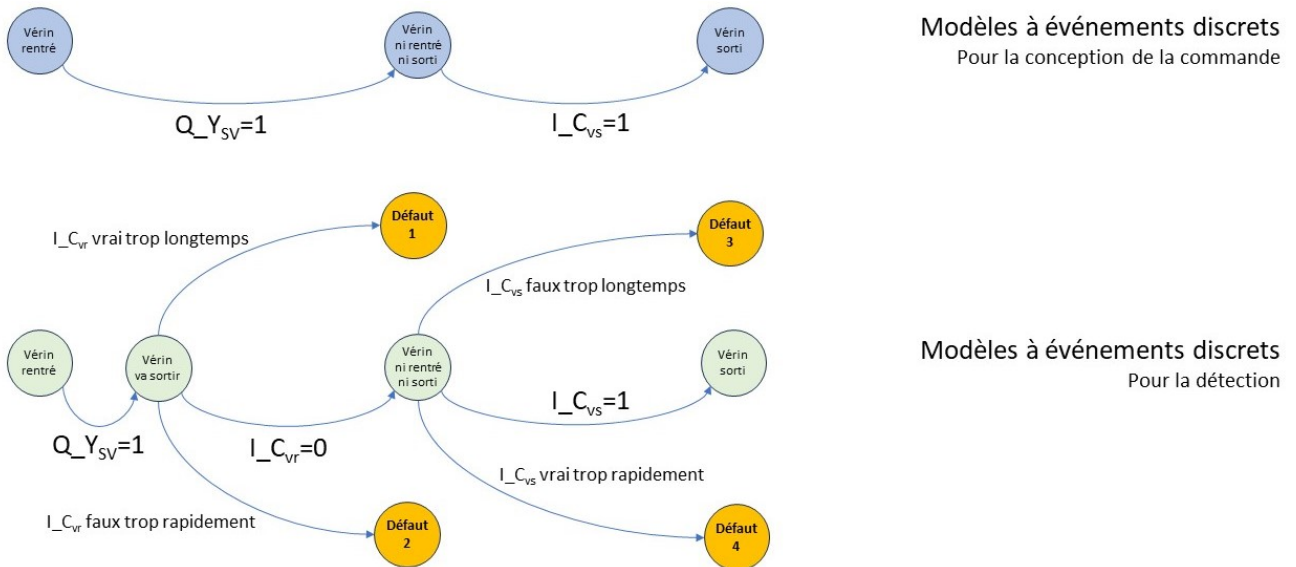
effet, un système de production est constitué d'un très grand nombre d'éléments avec des interactions extrêmement nombreuses et des comportements humains extrêmement difficile à modéliser.

Ce modèle est destiné pour la conception de la commande en fonctionnement normale du système "vérin". Afin de répondre en exploitation au besoin de réactivité face à une dérive du fonctionnement du système physique, la figure 4.5 représente un modèle à événements discrets pour la détection d'un dysfonctionnement du vérin. Ce modèle combine l'observation et une modélisation temporelle du comportement normal, par exemple l'événement "le vérin n'est plus rentré", noté $I_{Cvr} = 0$, doit normalement se produire dans un intervalle de temps après l'événement "mise à 1 de la sortie pilotant le distributeur", noté Q_{Ysv} . Si l'événement $I_{Cvr} = 0$ a lieu trop rapidement ou au contraire trop lentement, cela est le signe d'un dysfonctionnement. Il s'agit là d'un mécanisme bien connu détection nommé chien de garde. Un modèle comparant fonctionnement attendu et observation est la base de très nombreuses approches visant à améliorer la réactivité des systèmes et notamment les systèmes de production. Nous reviendrons plus en détail sur ces fonctions dans la section consacrée à la présentation des Systèmes Cyber-Physiques de Production où nous poserons la question de l'utilité pour ces systèmes de les modéliser et de les observer.

Afin d'utiliser la terminologie communément admise au sein de la communauté scientifique traitant de cette classe de modèle, le terme "système à événements discrets", noté SED, sera désormais utilisé pour désigner un modèle à états discrets et à événements discrets.

Avant de conclure cette section consacrée aux SED et à leur état, les différentes classes de systèmes sont maintenant présentées permettant de positionner les SED avec leurs caractéristiques.

4.1. SYSTÈME À ÉVÉNEMENTS DISCRETS



Modèles à événements discrets
Pour la conception de la commande

Modèles à événements discrets
Pour la détection

FIGURE 4.5 – Les différents modèles SED du comportement d'un vérin et leur usage.

4.1.3 Les familles de systèmes

La figure 4.6 adaptée de [Cassandras and Lafortune, 2008] représente les différentes classes de système. Les SED sont donc des systèmes dynamiques, invariants dans le temps et non linéaires. Cette dernière classe n'ayant pas été évoquée jusqu'à présent, une définition s'impose donc maintenant. La notion de linéarité est étroitement associée au "principe de superposition". Si une entrée E_1 produit la sortie S_1 et une entrée E_2 génère une sortie S_2 , alors une entrée équivalente à $E_1 + E_2$ aura pour effet la superposition $S_1 + S_2$. En considérant $E_1 = E_2$ et par conséquent $S_1 = S_2$, la superposition dans sa forme la plus simple équivaut à la proportionnalité. Par exemple pour un système de production, le fait de doubler les entrées permettrait de doubler la production. Mais dans la réalité, les changements de sérié et l'augmentation de la cadence s'accompagnent de nombreux phénomènes qui perturbent le fonctionnement du système et ne permet pas par exemple de doubler la production de pièces conformes !

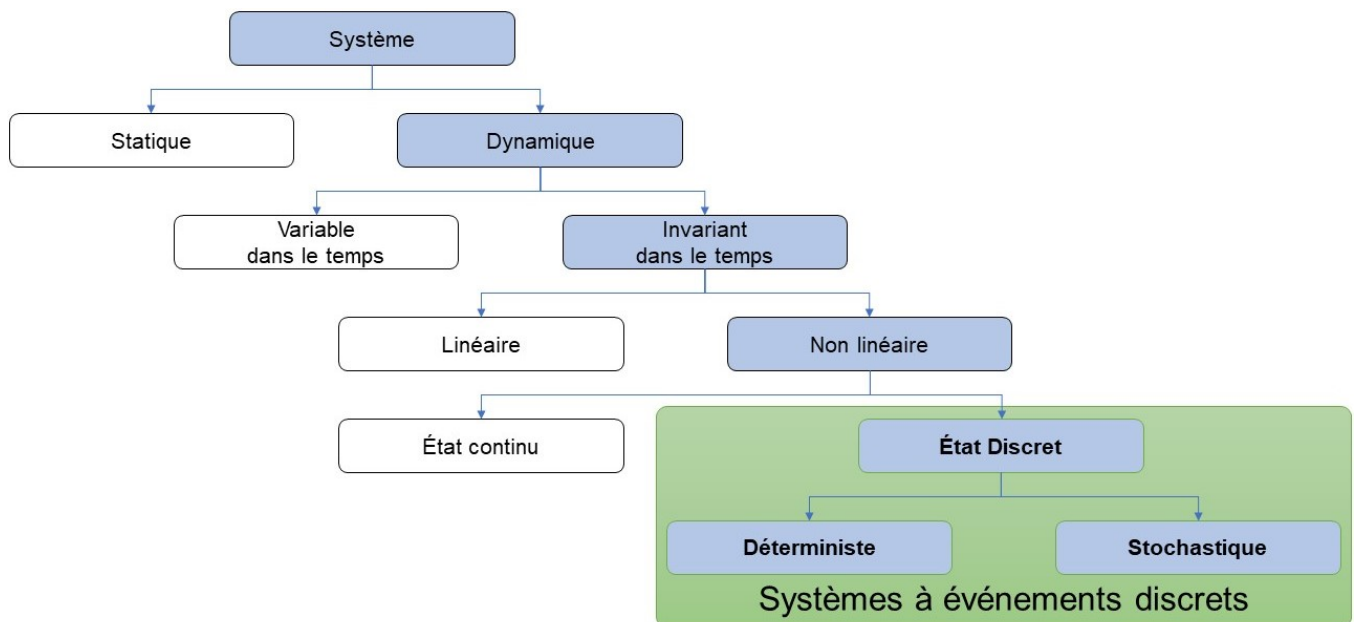


FIGURE 4.6 – Classification des systèmes, et système à événements discrets.

Comme indiqué sur la figure 4.6, les SED sont divisés en deux sous-classes : déterministe et stochastique.

Un système devient stochastique chaque fois qu'une ou plusieurs de ses variables de sortie sont des variables aléatoires. Dans ce cas l'état du système est décrit par un processus stochastique et une approche probabiliste est nécessaire pour caractériser le comportement du système.

Le concept de systèmes à événements discrets ayant été introduit, la section suivante présente le domaine d'application des travaux recherche de ce mémoire : les systèmes Cyber-Physiques de Production, noté SCPP.

4.2 Histoire d'une révolution industrielle

Avant leur présentation, les Systèmes Cyber-Physiques de Production sont d'abord mis en perspective au regard des initiatives stratégiques portées par différents pays afin de soutenir, transformer et renforcer leur industrie (re)considérée comme un levier majeur de leur développement économique en intégrant de plus en plus une dimension développement durable au sens de l'ONU¹. La section suivante dresse un panorama de ces initiatives internationales sous la dénomination française "Industrie du Futur".

4.2.1 La production

La production est le fait de créer ou de transformer des biens, ou d'assurer des services. Dans le secteur manufacturier aujourd'hui, la production peut être vue comme un processus à l'intersection de trois dimensions : entreprise, produit et système de production représentés sur la figure 4.7. Cette représentation a été publiée en 2016 dans [Lu et al., 2016] par le National Institute of Standards and Technology (NIST) du département de commerce américain afin de cartographier les standards existants et identifier où devaient porter les efforts de standardisation pour le développement des systèmes intelligents de production. La figure 4.7 a été ensuite adaptée dans le cadre des travaux du MESA². Finalement, la production peut être vue comme un noeud liant ces trois dimensions : entreprise, produit et système de production.

Les révolutions industrielles successives et les technologies associées ont transformé les entreprises, les produits et les systèmes de production. La dernière révolution industrielle en cours portée par la digitalisation et les données, de leur collecte à leur valorisation, est exposée dans la suite de cette section au travers des initiatives internationales visant accompagner et accélérer le déploiement le plus large au sein des entreprises jusqu'aux PME dans un contexte de concurrence mondiale.

4.2.2 Industrie 4.0

Ces initiatives de soutien au développement de l'industrie sont présentées par pays avec une description succincte de leur objectif officiel. Au delà du soutien financier apporté par ces initiatives aux différents acteurs souvent nationaux (acteurs privés et public, industriels et académiques, offreurs de solution et producteurs), elles visent aussi à favoriser la coopération et la mise en réseau des différents acteurs afin de développer des solutions :

- Plus génériques vis à vis des particularités d'une entreprise permettant leur diffusion plus rapide au sein d'entreprises de toutes tailles.
- Plus complexes en étant multi-technologiques et requérant des experts dans des domaines de plus en plus nombreux.
- Plus agile en définissant un besoin plus générique vis à vis d'une filière ou d'un secteur et donc des spécifications plus globales.

La présentation de ces initiatives et des architectures proposées [Soares et al., 2021] commence par celle portée par le Japon avant d'aborder celles de la Chine, des États Unis, de l'Europe et de deux de ses états membres, l'Allemagne et la France. Il y a d'autres initiatives au sein des pays européens comme Impresa 4.0 en Italie qui ne seront pas présentées dans le cadre de ce mémoire.

Japon

Industrial Value Chain Initiative (IVI)³ a été lancée en 2015. A travers la mise en relation des acteurs, les activités menées visent à concevoir une nouvelle société, dans laquelle la production et l'informatique sont intégrées, et pour

1. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

2. <http://blog.mesa.org/2016/03/smart-manufacturing-isnt-so-smart.html>

3. <https://iv-i.org/en/en-top/>

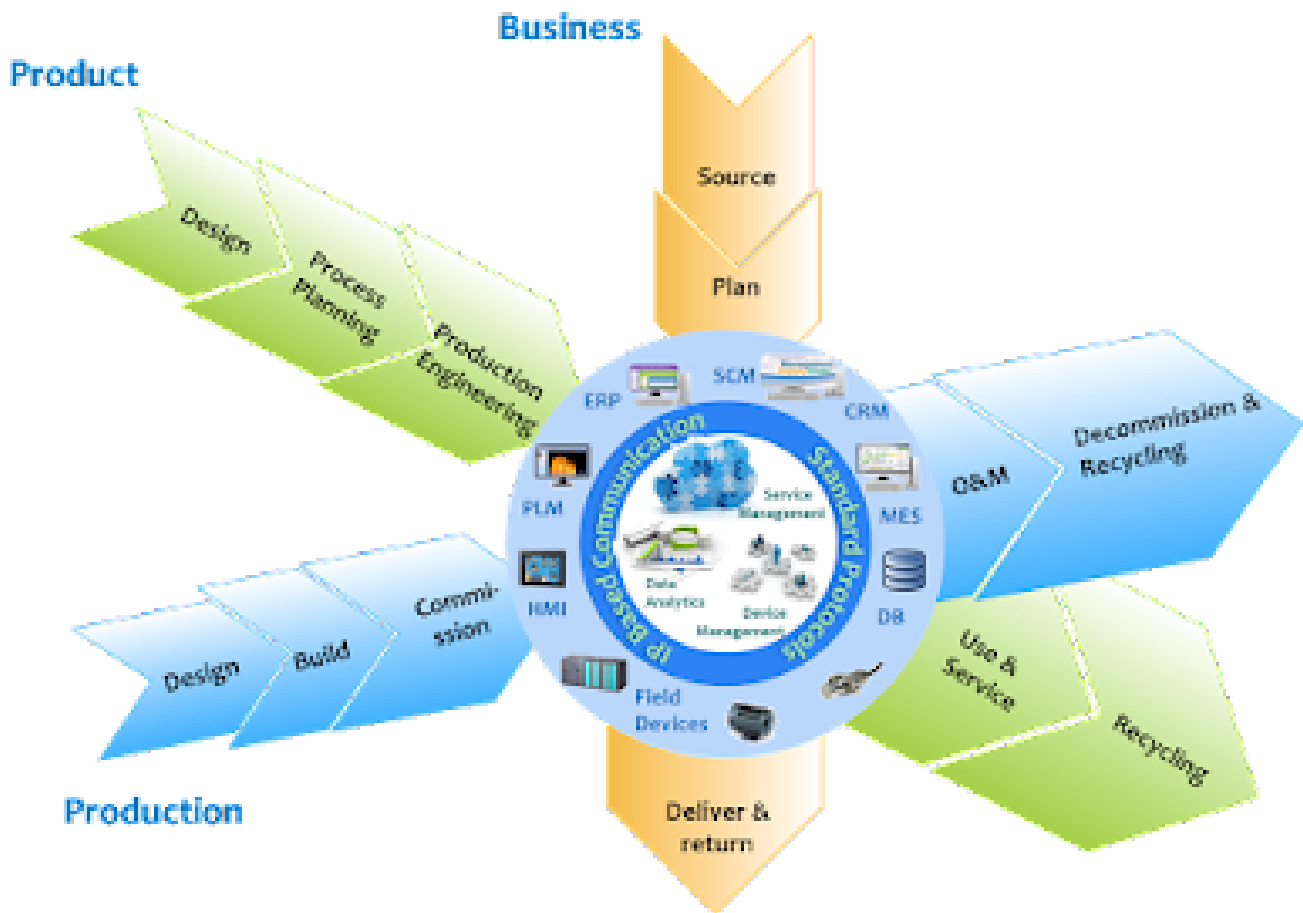


FIGURE 4.7 – Le processus de production à l'intersection de trois dimensions.

orienter le changement dans la bonne direction. Elle se décline en trois missions :

- Mission 1 : Créer un écosystème pour « connecter la production » grâce à une approche ascendante
- Mission 2 : Valoriser les connaissances et savoir-faire manufacturiers à travers un mécanisme de partage de normes agiles
- Mission 3 : Contribuer à l'élaboration de règles pour la coopération et la concurrence dans un équilibre entre ouvert et fermé

Cette initiative a amené à proposer "l'Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA)".

Chine

La Chine a la volonté de devenir une «superpuissance manufacturière» dans les produits haut de gamme et de haute technologie comme illustré sur la figure 4.8 d'ici le milieu du XXI^e siècle. En 2015, elle a lancé l'initiative Made in China 2025 - MiC2025⁴, qui comporte trois étapes :

- Étape 1 (2015-2025) : industrialisation de base, progrès réalisés dans la production intelligente et écologique.
- Étape 2 (2025-2035) : industrialisation complète, leader de l'industrie manufacturière dite de rang 2 avec une solide R&D nationale, notamment dans des secteurs clés.
- Étape 3 (2035-2050) : leader de l'industrie manufacturière dite de rang 1 avec des technologies et un système industriel avancés.

Les données, de leur collecte en passant par leur stockage et leur partage jusqu'à leur valorisation à travers leur analyse pour extraire des connaissances et aider à la décision, sont devenues un enjeu stratégique majeur. Une seconde initiative chinoise concerne donc ces dernières : "Internet plus" by the State Council⁵.

4. <http://english.www.gov.cn/2016special/madeinchina2025>

5. <http://english.www.gov.cn/2016special/internetplus>

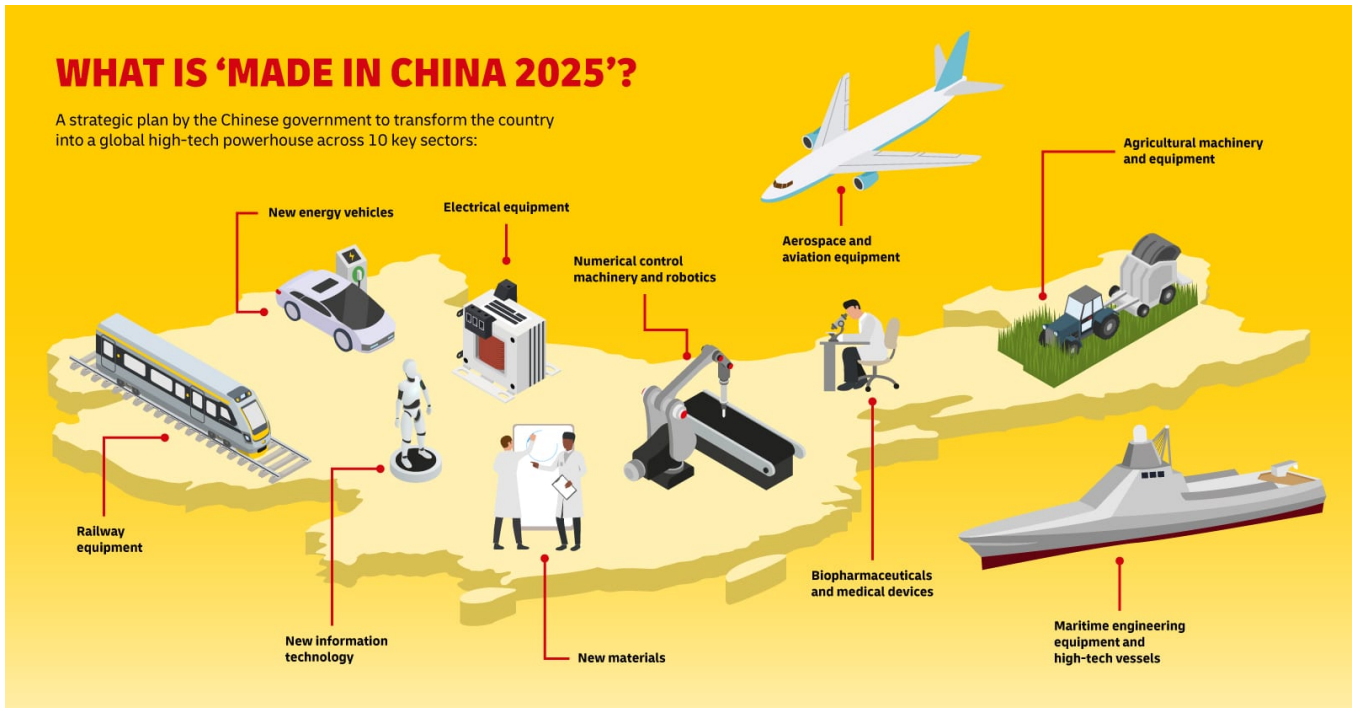


FIGURE 4.8 – Initiative Made In China 2025.

Ces initiatives ont conduit à définir "l'Intelligent Manufacturing System Architecture (IMSA)".

États Unis

Les données étant un vecteur essentiel de la transformation de l'industrie, les États Unis ont lancé l'initiative "Industrial Internet Consortium (IIC)" renommé "Industrial IoT Consortium (IIC)"⁶. Cette initiative vise à accélérer le développement et la diffusion de l'internet industriel des objets, "Industrial Internet of Things (IIoT)" avec pour finalité de disposer d'un nombre toujours plus grands de données à valoriser. Cette initiative transversale vis à vis des secteurs d'activités a publié "Industrial Internet Reference Architecture (IIRA)"⁷.

Par ailleurs, il existe aux États Unis d'autres initiatives concernant plus directement l'industrie et les systèmes de production. Toutes ces initiatives sont basées sur des consortiums avec un périmètre variable des acteurs :

- Manufacturing Technology Deployment Group Inc. (MTDG)⁸
- National Center for Defense Manufacturing and Machining (NCDMM)⁹
- Advanced Manufacturing Commons - AMC¹⁰
- Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC)¹¹ qui regroupe des acteurs industriels et académiques. SMCL soutient un engagement envers une approche globale comme illustrée sur la figure 4.9

Europe

La recherche et l'innovation en Europe sont organisées en seize domaines¹² dont celui de l'Industrie. Ce domaine est structuré par six technologies clés génériques (Key enabling technologies, KETs) : production avancée, matériaux avancés, technologies des sciences de la vie, micro & nano-électronique et photonique, intelligence artificielle, et sécurité & connectivité. De plus, le domaine de l'industrie repose aujourd'hui sur le concept de l'industrie

6. <https://www.iiconsortium.org>
 7. <https://hub.iiconsortium.org/iira>
 8. <https://mtdg.org>
 9. <https://www.ncdmm.org/>
 10. <https://advvmfg.org/>
 11. <https://smlconsortium.org>
 12. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area_en

4.2. HISTOIRE D'UNE RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

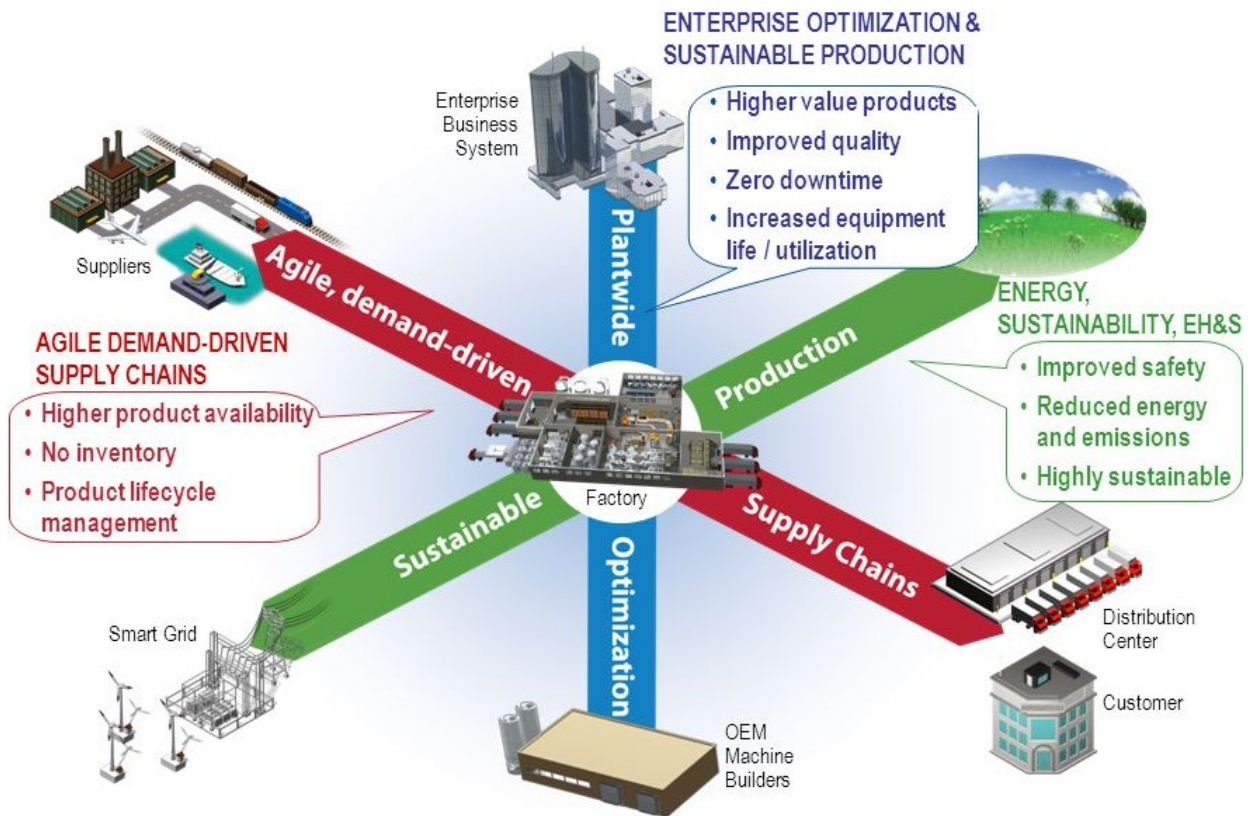


FIGURE 4.9 – Engagement de l'initiative SMLC envers une approche globale.

5.0¹³. Ce concept étend celui d'Industrie 4.0 existant en mettant spécifiquement la recherche et l'innovation au service de la transition vers une industrie européenne durable, centrée sur l'humain et résiliente. Contrairement à l'Industrie 4.0 dont le concept est porté par l'Allemagne et présenté dans la suite de cette section, l'Industrie 5.0 n'est pas une 5^{ème} révolution industrielle basée sur des nouvelles technologies émergentes mais c'est une nouvelle orientation stratégique de l'industrie devant intégrer le développement durable¹⁴.

L'Association européenne de recherche sur les usines du futur - EFFRA¹⁵ est une association à but non lucratif axée sur l'industrie qui promeut le développement de technologies de production nouvelles et innovantes. Elle est le représentant officiel de la partie privée dans les programmes européens qui impliquent les acteurs académiques des états membres. Tous les programmes européens sont définis par période de sept ans :

- Sur la période 2014-2020 des projets Horizon 2020 dans le domaine de l'industrie, le programme "Factories of the Future" publié en 2013 était basé sur une projection à 2030 détaillée dans [European Commission and EFFRA, 2013].
- « Made in Europe »¹⁶ est la dernière initiative couvrant la période 2021-2027 des projets Horizon Europe¹⁷. Cette initiative « Made in Europe » vise à augmenter durablement la création de valeur dans l'espace de l'UE avec un label de qualité d'origine sous licence pour les consommateurs, les producteurs et les prestataires de services.

Au delà des enjeux socio-économiques, ces programmes européens sont liés aux initiatives de ces états membres dans le domaine de l'industrie. Celle de l'Allemagne et de la France sont présentées dans la suite de cette section.

13. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en

14. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

15. <https://www.effra.eu/>

16. <https://www.made-in.eu>

17. <https://www.horizon-europe.gouv.fr/>

France

En France après un premier plan "Usine du Futur" en 2013 principalement centré sur la modernisation des sites de production sans une composante numérique forte, le GIMELEC, groupement des entreprises de la filière électronumérique française, qui regroupe plus de 200 entreprises a publié en 2014 le rapport "Industrie 4.0, les leviers de la transformation"¹⁸ avec une analyse comparative de la situation française et une identification des leviers de la transformation avec les technologies émergentes 4.10 et des enjeux de la modernisation.

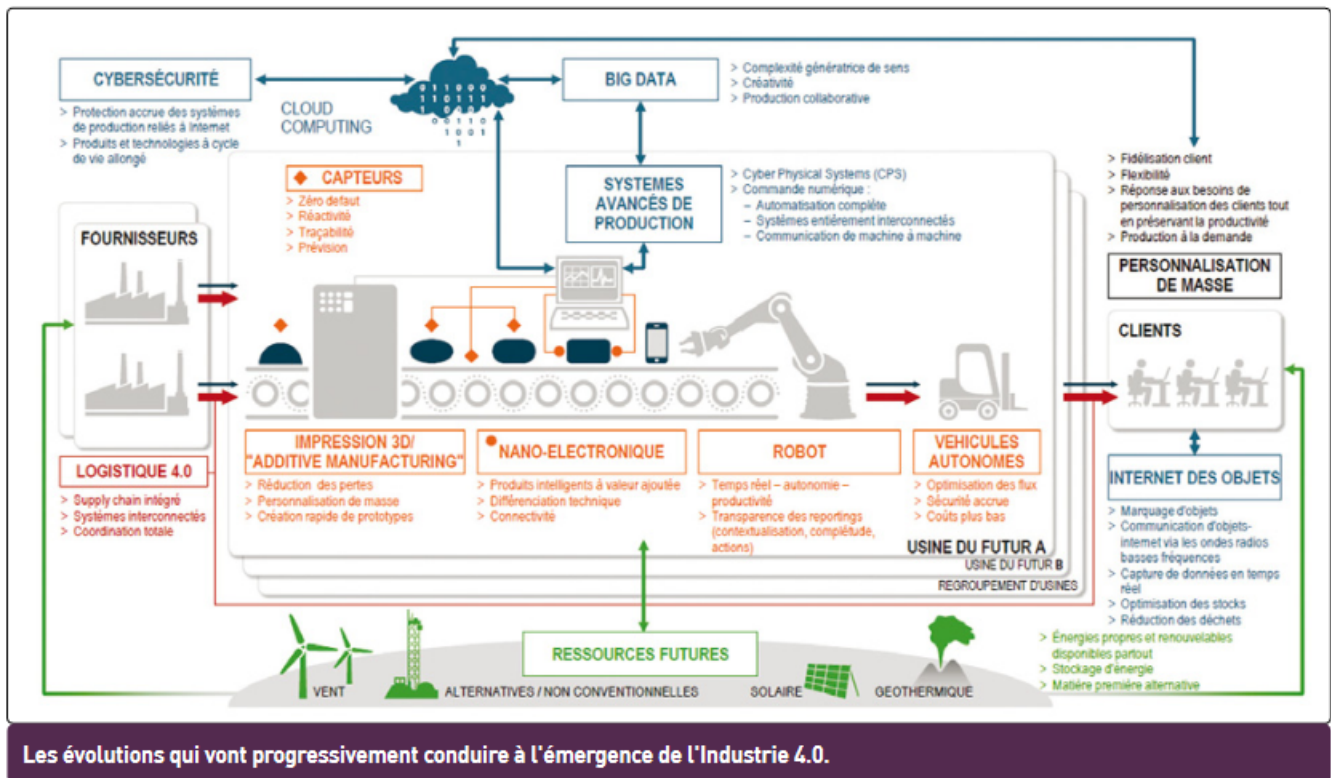


FIGURE 4.10 – L'industrie 4.0 vue par le GIMELEC en 2014.

Entre 2014 et 2016, le Direction Générale des Entreprises a lancé une étude¹⁹ qui a été publiée en mai 2016 avec les 47 technologies clés à maîtriser pour préparer l'industrie du futur. En parallèle, l'association "Alliance Industrie du Futur - AIF"²⁰ a été créée en 2015 pour diffuser, accompagner et accélérer la transformation de l'industrie française dans le contexte des différentes initiatives internationales citées précédemment et surtout de l'initiative allemande "Industrie 4.0" présentée après celle-ci. L'IAF a publié en 2018 le troisième guide des technologies clés pour l'industrie du futur²¹. Depuis 2021, l'AIF porte la filière Solutions Industrie du Futur (S-I-F)²² (19ème Filière labellisée par le Conseil National de l'Industrie) qui organise et coordonne les initiatives, projets et travaux collectifs, qui conduisent à transformer l'industrie en France en se modernisant grâce aux solutions et technologies de l'industrie du futur alliant le numérique dans le cadre du programme France 2030.

Lancées après l'initiative allemande "Industrie 4.0", les différentes actions françaises visent plus à accompagner et accélérer la transformation des entreprises françaises sans apporter de nouveaux concepts ou modèles de référence. La présentation maintenant de l'initiative allemande permettra de présenter le modèle européen d'architecture de référence pour l'industrie.

18. <https://gimelec.fr/wp-content/uploads/2019/05/Industrie4.0LesLeviersdelatransformation-versionfinale-sept2014.pdf>

19. <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/technologies-cles-2020>

20. <http://www.industrie-dufutur.org/>

21. http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2018/03/Guide-des-Technologies_2018_V3.pdf

22. <https://www.solutionsindustriedufutur.org/>

Allemagne

L'Allemagne à l'origine du concept "Industrie 4.0" en 2011 a été préceuse et a très certainement déclenché et accéléré les initiatives des autres pays. En effet comme le rappelle la "Timeline industrie 4.0" publié en juin 2023²³, *"le concept « Industrie 4.0 » a été présenté pour la première fois au grand public à la Foire de Hanovre en 2011. L'idée principale à l'époque, comme aujourd'hui, était de construire des systèmes cyber-physiques et de connecter numériquement la production industrielle entre les entreprises afin de rendre l'économie allemande plus durable, résiliente et compétitive. Le projet « Industrie 4.0 » est lancé dans le cadre de la stratégie de haute technologie et du programme de recherche du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche."*

En 2017, l'initiative allemande dénommée "Plattform Industrie 4.0"²⁴ cristallise les initiatives européennes. La "Plattform Industrie 4.0" porte le projet "Industrie 4.0" et depuis 2022 le projet "Manufacturing-X" concernant la digitalisation de la chaîne logistique.

Au delà d'accompagner la transformation des entreprises et de porter des nouvelles technologies, l'initiative Allemande a dès 2015 défini une architecture de référence : RAMI 4.0, Reference Architectural Model Industrie 4.0 [Heidel, 2019].

Sans entrer dans les détails du modèle, l'extrait de la présentation²⁵ repris sur la figure 4.11 indique clairement la finalité de ce modèle : collecter et partager des données entre l'ensemble des acteurs pour créer de la valeur ajoutée. Les acteurs sont d'abord ceux de la chaîne logistique mais aussi tous ceux qui participent à assurer le fonctionnement du système de production. Comme indiqué dans la présentation mentionnée précédemment, le RAMI 4.0 vise avant tout à standardiser les échanges entre différents acteurs en définissant :

- Des structures communes de communication : réseaux et protocoles
- Des règles communes en matière de cybersécurité et de protection des données
- Un langage commun comprenant signes, alphabet, vocabulaire, syntaxe, grammaire, sémantique, pragmatique (sémantique dans un contexte particulier) et culture commune.

Les échanges de données entre deux partenaires seront extrêmement faciles à mettre en place en se limitant pour le propriétaire des données à donner des droits d'accès à son partenaire en toute sécurité sans nécessité de déployer une architecture pour créer un "pont de communication" entre les deux. L'utilisation de ces données par le destinataire sera facilitée en ayant supprimé les "barrières de la langue" via un langage commun allant jusqu'à une culture commune.

Ces autoroutes de données auxquelles les acteurs pourront être connectés/déconnectés instantanément pourront par exemple servir au niveau de la chaîne logistique pour ajouter un nouvel acteur ou en supprimer un, servant ainsi l'agilité et la résilience de la chaîne logistique par une connaissance extrêmement précise de son état globale à chaque instant. Ces mêmes autoroutes de données pourront également servir à un fournisseur de composants, comme par exemple un vérin, afin disposer des données sur des millions de vérins en fonctionnement permettant en échange de diffuser un modèle de fonctionnement mis à jour en permanence et intégrant tous les points de vue (commande, surveillance, maintenance, etc). De la phase de conception à celle de l'exploitation, tous les niveaux du système physique bénéficieront de ces données, du composant à la chaîne logistique en passant par l'équipement sans oublier les produits. Malgré une communication industrielle de tout point de vue, du signe à la culture, extrêmement hétérogène encore aujourd'hui notamment au niveau automatisme mais pas uniquement, les industriels maîtrisent déjà assez bien leur communication interne. Le véritable enjeu est celui de l'usage de données partagées par tous les acteurs en interaction directe ou indirecte dans l'une des trois dimensions, entreprise, produit et système de production qui ont été présentées au début de cette section.

Avec des acteurs en interaction directe ou indirecte potentiellement sur tous les continents, la standardisation de l'architecture doit être internationale pour atteindre cet objectif. Sans pour autant aboutir à un modèle unique à ce jour, l'interopérabilité entre les architectures citées précédemment a été étudiée par les consortiums portant les initiatives, par exemple entre la "Plattform Industrie 4.0" et l' "Industrial Internet Consortium" [Lin et al., 2017] qui comporte plus exemples industriels avec leur positionnement au sein de chaque architecture. Cette interopérabilité entre le RAMI 4.0 et le IIRA a fait l'objet de publications scientifiques [Pedone and Mezgár, 2018], [Han, 2020], [Ganz and Isaksson, 2023] and [Leitão et al., 2023]. Toujours sur la base de la norme IEC PAS 63088 :2017 du RAMI 4.0, la "Plattform Industrie 4.0" a publié également un rapport d'analyse d'interopérabilité avec l'architecture de référence chinoise IMSA [Manufacturing, 2018] et a annoncé en 2018 mener cette même analyse avec l'initiative japonaise mais sans publication d'un rapport à ce jour.

23. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Timeline_Industrie40.html

24. <https://www.plattform-i40.de>

25. <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf>

Industrie 4.0 What's new, really?

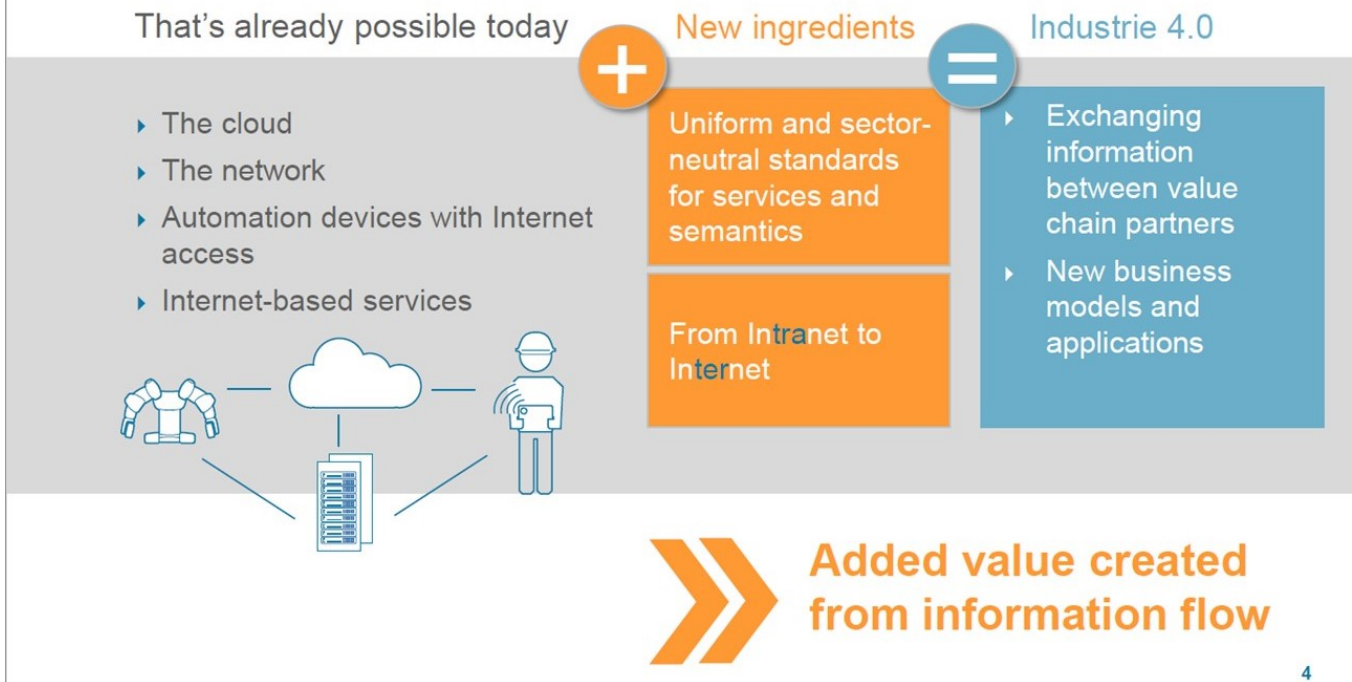


FIGURE 4.11 – Les objectifs du modèle RAMI 4.0.

Ces architectures de références ont depuis été reprises dans de très nombreuses publications scientifiques comme l'indique le nombre de résultats, hors citation, sur Google Scholar :

- 3720 pour "RAMI 4.0"
- 1160 pour "Reference Architecture Model Industrie",
- 1370 pour "Industrial Internet Reference Architecture"
- 169 pour "Intelligent Manufacturing System Architecture"
- 117 pour "Industrial Value Chain Reference Architecture"

Contrairement à l'acronyme "RAMI 4.0", les acronymes des autres architectures (IIRA, IMSA et IVAR) font références à d'autres concepts. Le nombre de résultats obtenus avec ces acronymes est par conséquent non pertinent. Malgré toutes ces publications, conservons tout de même à l'esprit que ces architectures de référence sont portées par des états et des consortiums d'entreprise dont l'objectif n'est pas que technologique. Cependant, les premières mises en oeuvre à grande échelle arrivent comme par exemple Renault qui annonce connecter 8500 équipements de production²⁶ permettant notamment de détecter des petites dérives et de déclencher des actions correctives.

Dans ce contexte international de standardisation visant à rendre accessible toute donnée industrielle accompagnée de nouvelles technologies et de nouvelles organisations du travail, le tout formant l'industrie 4.0, le concept de Système Cyber-Physique apparu en 2006 et présenté comme l'élément de base de "l'Industrie 4.0" lors de son lancement en 2011 a conduit dans l'industrie à celui de Système Cyber-Physique de Production (CPPS). Mais avant de s'intéresser à l'application dans les domaines de l'industrie et de la production,

26. <https://manufacturing.fr/renault-connecte-8500-equipements-de-production/>

4.2.3 Système cyber-physique - CPS

La figure 4.12 représente vingt ans de publications sur les systèmes cyber-physiques. Elle indique le nombre de résultats par année sur Google Scholar pour les termes "Cyber Physical System" et "Cyber Physical SystemS". L'évolution est quasiment exponentielle depuis la publication [Lee, 2006] de Edward A. Lee de l'Université de Berkeley, citée régulièrement comme la publication de référence des CPS. Face à un tel engouement pour les CPS et alors qu'aucun intitulé de mes publications à ce jour mentionne ce terme, il était grand temps de m'intéresser à ce concept jusqu'à y faire référence dans le titre de mon HDR !

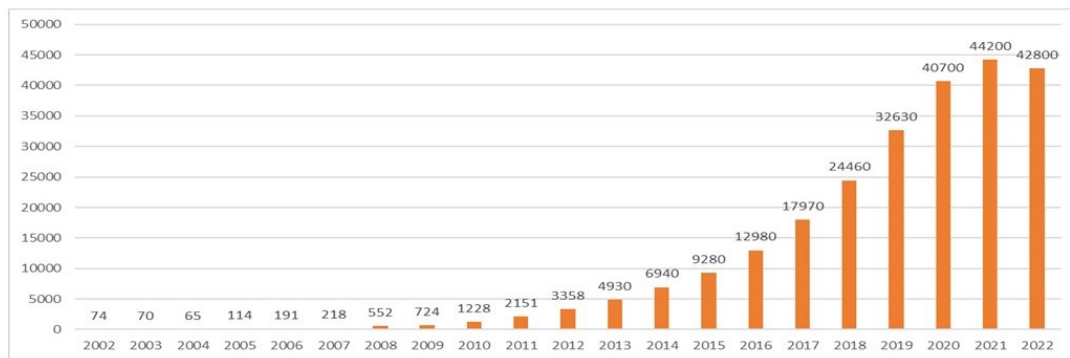


FIGURE 4.12 – 20 ans de publications sur les "Cyber Physical System".

Avant la lecture de l'article [Lee, 2006], les présentations des CPS auxquelles j'ai assisté m'ont toujours interpellé entre ce qui semblait être pour l'orateur un concept complètement nouveau et l'automatisme industrielle que j'ai découvert en 1990 en seconde TSA. La rédaction de mon HDR m'aura conduit à lire l'article [Lee, 2006] par lequel tout a commencé. Avant de livrer mon interprétation personnelle de cet article, je citerai quelques phrases me semblant être essentielles de cette publication qui soulève effectivement des questions fondamentales sur l'informatique et les systèmes numériques pour le contrôle-commande des systèmes physiques évoqué 4.1.2 page 61.

Le premier extrait ci-dessous est issu du premier et du dernier paragraphe du résumé de l'article : «Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa. In the physical world, the passage of time is inexorable and concurrency is intrinsic. Neither of these properties is present in today's computing and networking abstractions.[...] The foundations of computing are built on the premise that the principal task of computers is transformation of data. Yet we know that the technology is capable of far richer interactions the physical world.»

Cet article ne définit ni un nouveau type de système ni un nouveau concept. Mais, il identifie l'informatique (architecture des processeurs, système d'exploitation, langage de programmation et protocoles de communication) comme la principale limite au développement des CPS et de leurs nouveaux usages. En effet, les systèmes numériques qui interagissent avec le monde physique sont basés une approche de l'informatique pensée dès les années 60 pour traiter des données en restant cloisonné dans un monde numérique. Les approches informatiques basées sur des mécanismes d'interruption ou de scrutation pour interagir avec le monde physique seraient donc une adaptation tant bien que mal de cette informatique destinée à traiter des données. Edward A. Lee explique dans la suite de l'article les limites de cette informatique de traitement de données pour les CPS. En effet, les nouveaux usages dépendent de la capacité des CPS à échanger des données et donc à collaborer dans une approche de système de système. Dans la suite de l'article, l'auteur préfère d'ailleurs utiliser le terme "système embarqué" plus répandu en 2006 notamment pour des systèmes critiques comme les avions. La question de la sûreté est cruciale pour les systèmes critiques. Par exemple, l'explosion d'une centrale nucléaire est un événement extrêmement redouté tout comme le crash d'un avion. Pour appréhender cette question de la sûreté, les approches de vérification et de validation [Henry and Faure, 2003] des applications sont confrontées à un problème de taille, celui de l'espace d'états à explorer en raison notamment du phénomène d'explosion combinatoire pour les systèmes à événements discrets.

Le second extrait ci-dessous évoque ce besoin de vérification et validation non plus pour un système embarqué "fermé" mais un système embarqué qui serait "ouvert" dont le comportement dépendrait de ces interactions avec d'autres systèmes embarqués.

«However, most such embedded systems are closed "boxes" that do not expose the computing capability to the outside. The radical transformation that we envision comes from networking these devices.[...] In a networked

environment, it becomes impossible to test the software under all possible conditions.[...] Anecdotal information from computer-based instrumentation, for example, indicates that the real-time performance delivered by today's PCs is about the same as was delivered by PCs in the mid-1980's. Twenty years of Moore's law have not improved things in this dimension. [...] The most interesting and revolutionary cyber-physical systems will be networked. The most widely used networking techniques today introduce a great deal of timing variability and stochastic behavior. Today, embedded systems are often forced to use less widely accepted networking technologies (such as CAN busses in manufacturing systems and FlexRay in automotive applications), and typically must limit the geographic extent of these networks to a confined local area. [...] For the next generation of cyber-physical systems, it is arguable that we must build concurrent models of computation that are far more deterministic, predictable, and understandable.»

Comme mentionné dans ce second extrait, la contrainte forte de ces systèmes est le temps aussi bien en terme d'exécution des applications que de communication. S'il existe encore tant de protocoles de communication industrielle, c'est justement parce que le protocole TCP/IP devenu LE protocole de l'informatique de traitement de la donnée est ni déterministe ni prévisible d'un point de vue temporelle, ce qui est inenvisageable quand il s'agit de déclencher une simple action comme la mise en route d'une pompe d'un système de refroidissement nucléaire. Ces éléments mis en exergue par Edward A. Lee sont ceux la même qui différencie l'informatique (de traitement de données) et de l'informatique industrielle, différences mal perçues et parfois source d'incompréhension entre communautés scientifiques.

Cette discussion sur l'article [Lee, 2006] citée régulièrement comme la publication de référence des CPS nécessite d'être complétée par une définition avec les principales caractéristiques d'un CPS. la définition retenue est celle publiée en 2017 par le NIST [Griffor et al., 2017] : «Cyber-physical systems integrate computation, communication, sensing, and actuation with physical systems to fulfill time-sensitive functions with varying degrees of interaction with the environment, including human interaction.»

Afin de détailler un peu plus cette définition dans laquelle la contrainte de temps apparaît explicitement, la figure 4.13 reprend le modèle conceptuel d'un CPS proposé par le NIST [Griffor et al., 2017] en projetant dessus les propriétés fondamentales d'un CPS. Étant jusqu'à présent resté focalisé sur le centre de la figure qui représente une évidence pour un automaticien, je n'avais par suffisamment porté mon attention sur les autres éléments de la figure. En vert sur la figure, la propriété de composition des CPS amène au CPS système de système basé sur des CPS du même domaine voire de domaines différents, comme par exemple celui de la production manufacturière et de l'énergie dont le lien dans le contexte actuel apparaît comme une évidence. En rouge sur la figure, les interactions entre CPS correspondent à des interactions physiques et cybers interopérables, contraintes par le temps, fiables et sûrs. L'ensemble de ces interactions devant amener à un comportement global émergent supérieur à la somme des comportements individuels. En bleu sur la figure, les interactions indispensables avec les acteurs humains imposent de faire face à des comportements stochastiques, à minima sans pour autant parler de chaotique. Enfin en jaune, il reste le centre de la figure avec des contraintes temporelles d'interactions cyber-physiques, de fiabilité et de sûreté au niveau physique et cyber mais également le problème d'hétérogénéité des technologies entre tous les domaines d'application alors même que la finalité est de construire un système de système inter-domaines ! Dans [Griffor et al., 2017], le concept de CPS s'applique dans neuf domaines : bâtiments, énergie, consommateur et maison, santé et science de la vie, industrie, transport, vente au détail, sûreté publique, technologies de l'information. Afin d'avoir un exemple d'application dans un domaine du concept de CPS, le lecteur trouvera une figure dans [Griffor et al., 2017] qui illustre les interactions entre les CPS "mobiles" (voiture, camion, train, bateau, avion) et les CPS liés aux infrastructures (croisement, parking, port, aéroport, etc). L'initiative américaine "Industrial Internet Consortium (IIC)" vise à apporter au niveau cyber une approche transversale à l'ensemble de ces domaines en considérant comme verrou central les interactions inter CPS.

Force est de constater que l'informatique (de traitement des données) a su développer des concepts de haut niveau indépendamment de leurs domaines d'application. Pour l'informatique industrielle, le concept de CPS est peut-être ce concept de haut niveau qui manquait afin d'unifier l'ensemble de la communauté et renforcer sa visibilité auprès de tous les acteurs, académiques, socio-économiques et politiques. J'adhère donc désormais pleinement à ce concept de CPS. Les modèles formels nécessaires aux CPS seront peut-être un jour enseignés comme sont enseignées l'étude des fonctions continues, les équations différentielles et les matrices par exemple.

Dans la section suivante, l'application du concept de CPS aux systèmes de production manufacturier est introduite.

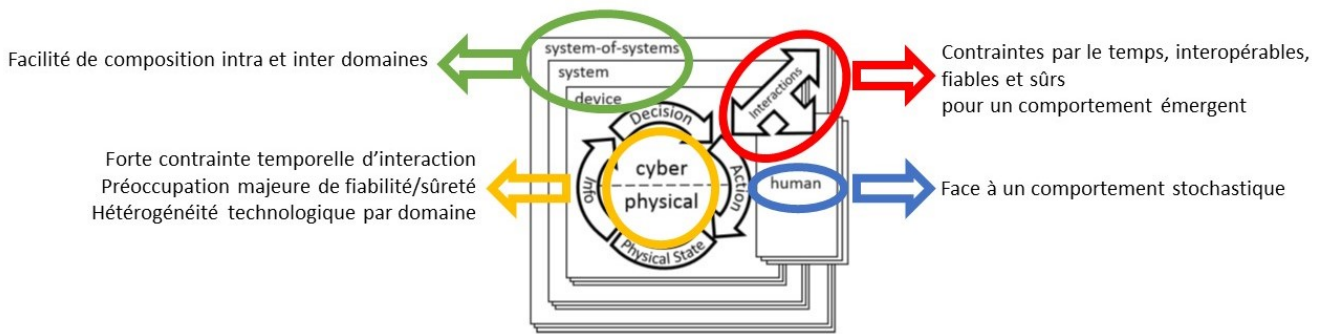


FIGURE 4.13 – Modèle conceptuel d'un CPS et caractéristiques.

4.3 Système cyber-physique de production - CPPS

4.3.1 Architectures des CPPS

Les systèmes cyber-physiques de production (Cyber-Physical Production System - CCPS) sont l'application du concept de CPS dans le domaine de l'industrie manufacturière et sont alignés voir au coeur de l'initiative allemande "Industrie 4.0". Au regard du concept de CPS visant des systèmes de systèmes inter-domaines, par exemple entre les domaines de l'industrie et de l'énergie, un CPPS doit rester une instance d'un CPS et ne pas être un CPS spécifique empêchant les interactions avec les CPS d'autres domaines. La particularité des CPPS concerne donc leur finalité et les entités physiques que le système cyber contrôle. Un CPPS vise à assurer un processus de production afin de délivrer des produits dans le respect du coût, du délai et de la qualité attendus. Le processus global de production est la combinaison de deux processus :

- Un processus de fabrication constitué de plusieurs opérations de mise en forme des matériaux (par exemple moulage, parachèvement et usinage), d'assemblage, de contrôle et de conditionnement/déconditionnement.
- Un processus logistique intra et inter-entreprises car les opérations de fabrication sont réalisées à différents endroits, séparé de quelques mètres à quelques milliers de kilomètres, au sein d'entreprises différentes. Les opérations de logistique modifient dans le temps et l'espace les produits mais ne leurs confèrent pas de valeur ajoutée et à ce titre ne modifient par leur état intrinsèque, sauf à le dégrader.

Architecture du système physique

Parmi les neufs domaines d'application des CPS cités précédemment, la combinaison de ces deux processus est spécifique aux domaines de l'industrie manufacturière et caractérise le système physique d'un CPPS constitué de trois éléments :

- Ressources de fabrication
- Ressources logistiques
- Flux de produits qui entrent et sortent du CPPS, initialement à l'état de matière première.

Les ressources de fabrication et logistique sont composées de ressources matérielles et humaines. Enfin, ces ressources peuvent être totalement distinguées, comme un gerbeur et un centre d'usinage à commande numérique, ou au contraire extrêmement liées et intégrées comme un convoyeur dans une machine reliant différents postes. Le modèle conceptuel d'un CPPS sur la figure 4.14 intègre ces trois éléments au modèle conceptuel d'un CPS.

Physiquement, les équipements de terrain (capteurs/actionneurs) sont regroupés au sein d'une chaîne fonctionnelle permettant d'assurer une fonction au sein d'un équipement de production (ou machine), comme par exemple bloquer le passage d'un produit sur un convoyeur. Le regroupement de plusieurs chaînes fonctionnelles permet d'assurer une opération de fabrication, comme remplir un flacon, ou de logistique, comme déplacer un flacon du poste de remplissage jusqu'au poste de fermeture. En fonction de sa complexité, un équipement peut réaliser une ou plusieurs opérations de fabrication ou de logistique. Ensuite en fonction des procédés de fabrication, des quantités à produire et de choix d'organisation industrielle, les équipements peuvent être organisés soit en îlot avec des équipements réalisant les mêmes opérations, soit en ligne de production avec des équipements réalisant des opérations différentes. Une usine comporte une ou plusieurs lignes de production et/ou un ou plusieurs îlots. La terminologie utilisée pour cette description de l'architecture physique relève plus des processus discrets de production et

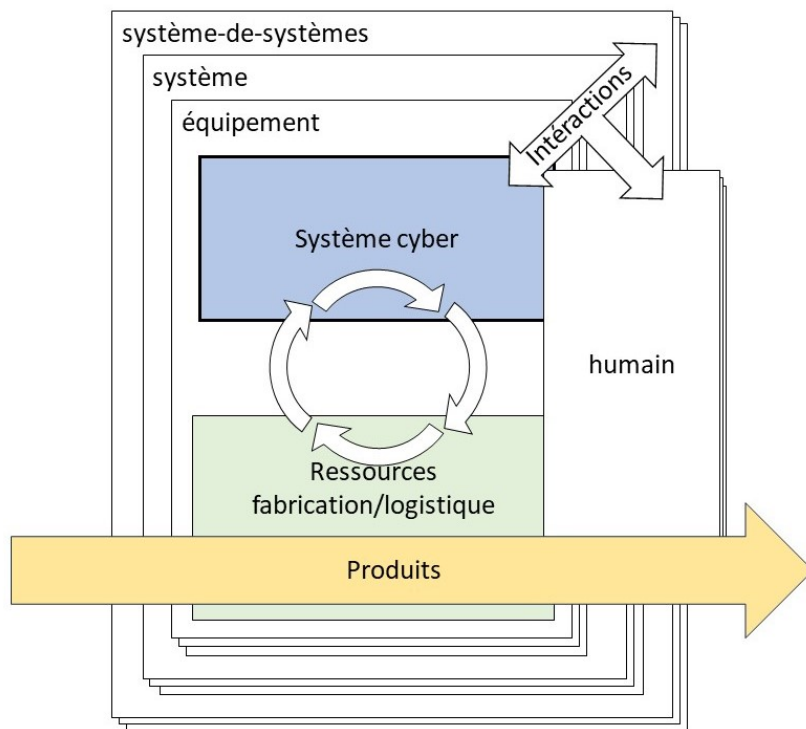


FIGURE 4.14 – Modèle conceptuel d'un CPPS.

de l'expérience acquise au travers des très nombreuses visites d'usine réalisées en région Auvergne-Rhône-Alpes dans le cadre de mes suivis de stagiaire et d'alternants depuis 2006 (voir chapitre 1). Le RAMI 4.0 propose également cinq niveaux avec une terminologie plus associée aux process par lots. En effet, les cinq niveaux hiérarchiques du RAMI 4.0 de la figure 4.15 sont adaptés de la norme IEC 61512 issu de l'ISA88 et de la norme IEC 62264 issu de l'ISA95. Cela montre aussi tout le chemin qu'il reste à parcourir pour tendre vers une terminologie commune aux process continus, par lots et discrets !

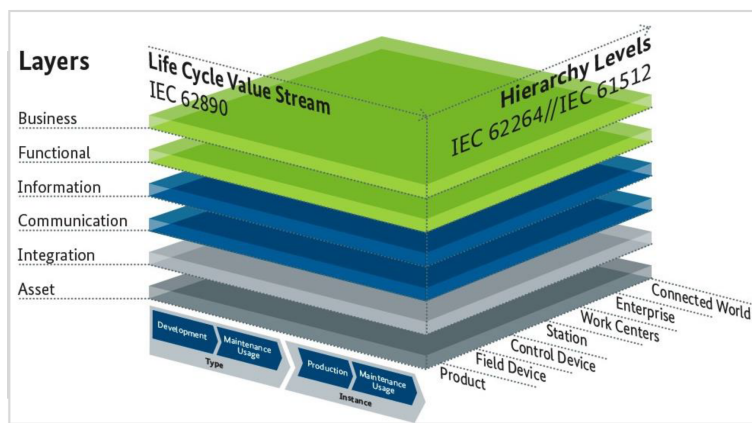


FIGURE 4.15 – Les trois axes RAMI 4.0. ©Plattform Industrie 4.0 and ZVEI

Après cette description de l'architecture physique d'un CPPS, il reste à présenter l'architecture du système cyber.

Architecture du système cyber

Dans de le domaine des systèmes de production bien avant même la publication du RAMI 4.0, l'architecture du système cyber a été l'objet de très nombreux travaux visant à remettre en cause l'architecture définie par la

4.3. SYSTÈME CYBER-PHYSIQUE DE PRODUCTION - CPPS

pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing) définie dans les années quatre vingt qui a tout de même évolué depuis la version initiale. Deux hypothèse jamais exprimées explicitement sont pourtant toujours considérées. Premièrement, cette représentation pyramidale correspondrait à une hiérarchie fonctionnelle. Deuxièmement, un module d'un niveau pourrait communiquer uniquement avec un module d'un niveau immédiatement supérieur ou immédiatement inférieur. Cette hypothèse a été d'autant plus renforcée que les protocoles de communication ont longtemps été très différents d'un niveau à l'autre niveau. La pyramide du CIM a par conséquent toujours été considérée comme représentant une architecture hiérarchique et modulaire. Dans les années 1990 et 2000, d'autres architectures ont été proposées : holonique ou pilotée par le produit. Mais, la pyramide CIM est encore aujourd'hui représentative de l'architecture de pilotage des systèmes de production. Cette architecture pyramidale sera-t-elle remise en cause par le développement de l'internet des objets, le concept de CPS et l'architecture proposée dans le RAMI 4.0 représentée sur la figure 4.16 ?

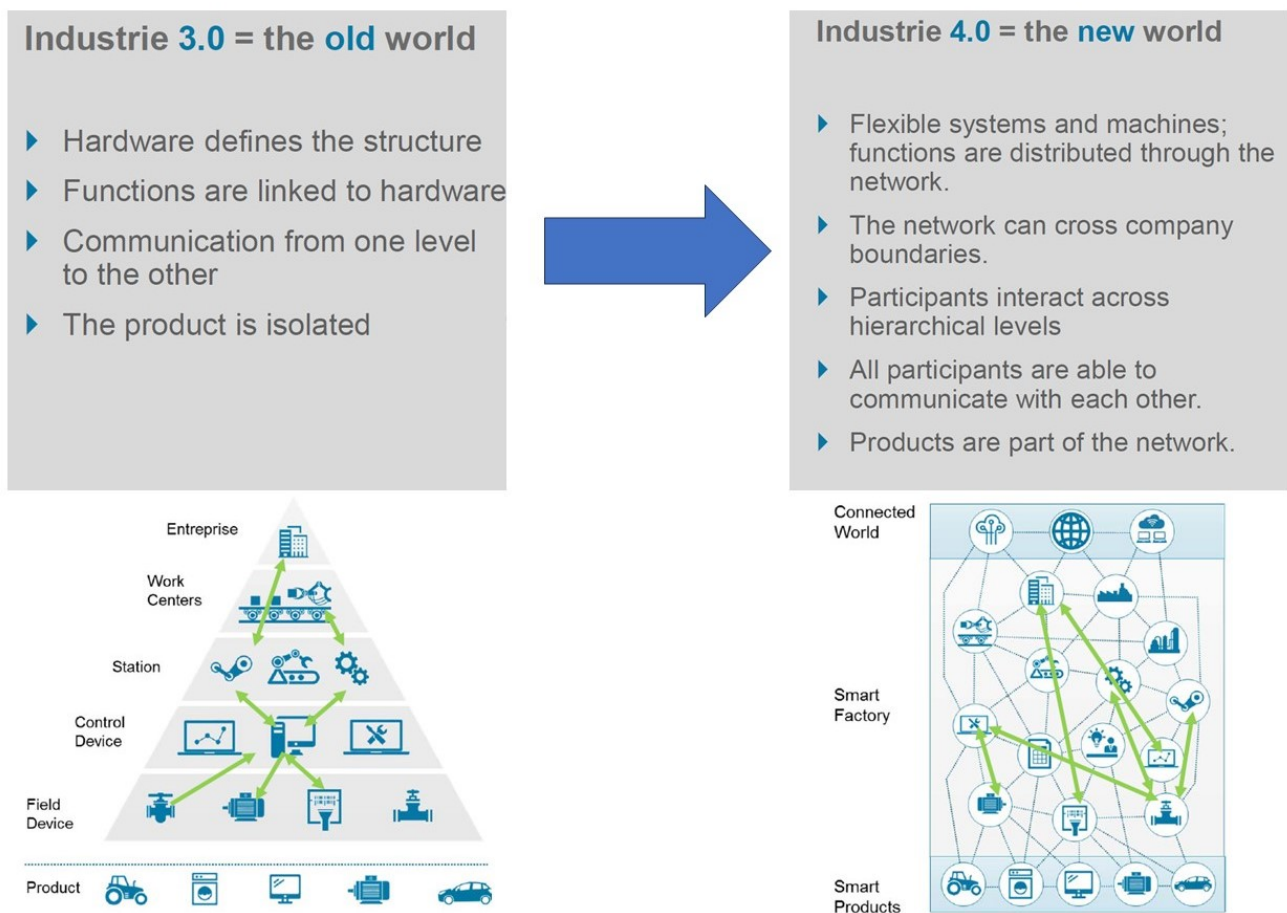


FIGURE 4.16 – Architecture cyber d'un CPPS, de l'industrie 3.0 à l'industrie 4.0, adaptée de "Plattform Industrie 4.0".

Bien que jamais explicitement indiqué dans la représentation 4.16 de cette nouvelle architecture par la "Plattform Industrie 4.0", une interprétation très courante aujourd'hui de cette représentation conduit à l'émergence de deux caractéristiques annoncées comme fondamentales et reprises dans de nombreux travaux :

- Autonomie des ressources avec la question sous-jacente de la distribution des décisions, 16700 résultats sur Google Scholar à la recherche «"industry 4.0" autonomy» pour la période 2006 à 2023 hors citation.
- Reconfiguration du CPPS impliquant une reconfiguration du système cyber et/ou physique, 16900 résultats sur Google Scholar à la recherche «"industry 4.0" reconfigurable» pour la période 2006 à 2023 hors citation.

Dans l'article [Monostori, 2014] souvent cité comme la référence pour les CPPS, l'auteur est beaucoup plus prudent : «CPPS partly break with the traditional automation pyramid. The typical control and field levels still exist which includes common PLCs close to the technical processes to be able to provide the highest performance for critical control loops, while in the other, higher levels of the hierarchy a more decentralized way of functioning is characteristic in CPPS.»

Le futur de l'architecture cyber reste donc une question ouverte. Mais avant de discuter d'autonomie et de reconfiguration, la finalité de la modélisation et de l'observation d'un CPPS est abordée.

4.3.2 Pourquoi modéliser et observer un CPPS ?

En fonction de l'étape du cycle de vie du système cyber-physique de production, la finalité des modèles est différente et les contraintes sur leur utilisation également. Nous considérons les phases de *conception* et d'*exploitation* d'un CPPS.

Conception A cette étape, le système réel n'existe pas, seuls des modèles existent. L'analyse et les outils d'aide à la décision sont basés exclusivement sur ces modèles pour la simulation et l'optimisation. La durée du processus de conception n'est pas une contrainte mais plus un critère à minimiser. Les termes systèmes et modèles sont largement confondus car sur le papier le futur système est le modèle. Ces approches de conception concernent le système physique ou le système cyber.

- Système physique. Les modèles permettent de dimensionner le système physique afin de disposer de capacités/caractéristiques conformes à la spécification. Pour un CPPS, ce dimensionnement concerne tout aussi bien un composant simple (mécanique, électrique, pneumatique, hydraulique) que l'organisation globale du système d'une ligne de production **REF DISP** jusqu'à la chaîne logistique **REF DISP**.
- Système cyber. A ce niveau, deux problématiques sont généralement abordées : l'architecture du système cyber et son comportement pour le contrôle du système physique. Aujourd'hui, l'architecture concerne des problématiques d'interopérabilité de systèmes d'information inter-entreprises [Estefania et al., 2018], intra-entreprise [Tamzalit et al., 2021] allant jusqu'aux architectures de supervision et de contrôle-commande [Nielsen et al., 2023]. Après avoir défini l'architecture du système cyber, il s'agira de définir et modéliser son fonctionnement au regard des spécifications et du modèles du système physique. Les modèles du fonctionnement attendu (UML, SysML, Grafcet) servent ensuite à développer les applications exécutées en exploitation. Si toutes les décisions ne sont pas prises lors de cette étape de conception, il faudra en outre développer les modèles nécessaires en phase d'exploitation pour prendre ces décisions et rendre le système flexible, agile voir résilient **REF RESILIENCE** en environnement incertain et perturbé. **QUELQUES REFERENCES DISP**, [Usuga-Cadavid et al., 2022].

Exploitation La flexibilité, l'agilité voir la résilience requièrent de prendre des décisions en cours d'exploitation afin d'adapter le système à la situation présente et à venir afin de maintenir un service minimum. Il y a co-existence du système réel et de ces modèles qui doivent normalement être calibrés par rapport au comportement du système réel, i.e. les paramètres des modèles sont ajustés en fonction de valeurs mesurées sur le système réel. Les outils d'aide à la décision sont basés sur ces modèles et l'observation du système réel permettant de détecter une dérive puis d'estimer son état notamment suite à des aléas internes de ses ressources et/ou des aléas externes impactant son fonctionnement par effet de propagation. La précision de l'estimation de l'état conditionne bien souvent la prise de décision et donc la réussite de la suite du processus. Pour la flexibilité, l'agilité et la résilience, le temps est une contrainte parfois extrêmement forte notamment pour les systèmes critiques tels ceux des domaines du : nucléaire [Elshenawy et al., 2021], ferroviaire [de Bruin et al., 2017], santé [Bouleux et al., 2015], crise humanitaire [Charles et al., 2022] qui impose une estimation d'état et une prise de décision *rapide* mais non prédéfinie et basée sur l'exploitation des modèles en cours d'exploitation. La distinction entre le système observé et le modèle est extrêmement importante, c'est la source même de toutes les approches en exploitation par comparaison de valeurs mesurées avec celles issues des modèles. Ces approches concernent le système physique ou le système cyber.

- Système physique : Les modèles exploités visent à estimer l'état passé, présent et futur à travers des fonctions de surveillance [Combacau et al., 2000] telles que la détection, le diagnostic et le pronostic. Pour chacune de ces fonctions, il existe plusieurs communautés scientifiques telles que : Fault detection and Classification (FDC) [Hong and Pula, 2022], Fault Detection and Diagnosis (FDD) [Abid et al., 2021], Dx pour le diagnostic, terme issu du domaine médical, ([Diedrich et al., 2022], [Deschamps, 2007], Pronostic and Health Management (PHM) [Xia et al., 2018], et enfin la maintenance [lung, 2019], [Nunes et al., 2023]
- Système cyber : Face à une dérive et à l'incapacité présente ou future supposée du CPPS à maintenir le niveau de service attendu, les modèles exploités visent à définir un nouveau plan d'actions tant au niveau d'un équipement, d'une ligne de production que d'une chaîne logistique en exploitant les capacités disponibles du système physique. Au regard de l'état estimé du système physique et du plan d'actions prévu, la première étape est d'évaluer la capacité du système cyber à pouvoir encore appliquer ce plan

en considérant les erreurs d'estimation de l'état présent et futur. L'étape suivante est de déclencher un processus décisionnel pour revoir le plan avec des approches de reconfiguration d'une ligne de production [Bortolini et al., 2018], d'ajustement des paramètres de process continu ou par lot [Valentin et al., 2023], de reconfiguration au niveau équipement [Tahiri et al., 2023], [Capawa Fotsoh et al., 2020], [Henry et al., 2012], et de maintenance prescriptive qui permet d'intégrer dans la prise de décision les informations de maintenance [Tham et al., 2023]. Enfin à ce niveau du système cyber physique en cours d'exploitation et dans un contexte d'une facilité grandissante d'accès aux données, la cybersécurité devient un enjeu majeur. Au delà des approches classiques en informatique focalisées uniquement sur le système cyber (antivirus, parefeu, etc), des approches de cybersécurité spécifiques aux CPPS sont aujourd'hui basées sur l'analyse conjointe du comportement du système cyber et de celui du système physique afin de détecter des attaques et déclencher des actions correctives [Escudero et al., 2022], [Rahman et al., 2023].

En plus de la fonction indispensable de contrôle en fonctionnement normal, toutes les autres fonctions (détection, diagnostic, pronostic, reconfiguration, maintenance préventive, prédictive et désormais prescriptive, cybersécurité) ont un coût de conception et d'exploitation. Cette dimension économique ne doit pas être oubliée au regard du rapport entre le coût et le bénéfice qui sera différent pour un CPPS envoyé sur Mars, un CPPS critique sur terre ou un simple système de production manufacturière composé de quelques presses à injecter ! Le coût est associé à la modélisation qui est essentiellement du temps humain et aux moyens d'observation supplémentaires à déployer en plus de ceux nécessaires juste pour le contrôle. Sur l'exemple du vérin présenté au début de ce chapitre, il est possible d'ajouter un débit mètre, un pressostat pour la pression et une règle numérique pour mesurer le déplacement de la tige du vérin. C'est d'abord techniquement pas simple pour des questions d'encombrement mais c'est économiquement aberrant comparé aux deux capteurs de fin de course nécessaire au contrôle.

Ayant précisé pour les CPPS les usages des modèles et le besoin d'observation qui restera toujours partiel, la dernière section de ce chapitre est consacrée à une discussion sur l'autonomie et la reconfiguration de CPPS.

4.3.3 Autonomie et reconfiguration d'un CPPS, fantasme ou future réalité ?

Autonomie

Comme mentionné précédemment, l'autonomie des CPPS est une caractéristique visée par de nombreux travaux alors même que ce terme ne figure pas dans la description de l'architecture du RAMI 4.0. Cette question de l'autonomie d'un CPPS mérite d'être considérée au moins sous trois aspects :

1. Une entité peut-elle être autonome d'un point de vue décisionnel sans autonomie juridique et financière ?
2. Un comportement émergent d'entités autonomes ayant chacune leur propre objectif peut-il être plus performant qu'un comportement résultant d'une approche centralisée ?
3. L'architecture cyber pour une usine est-elle identique pour toutes les fonctions ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à la première question, l'autonomie de CPPS d'un niveau supérieur à une ligne de production est abordée en commençant par le plus haut niveau, la chaîne logistique.

Dans le cadre d'une chaîne logistique, les entités sont généralement juridiquement et économiquement indépendantes. Elles coopèrent avec chacune leurs propres objectifs stratégiques et elles peuvent chacune participer à une ou plusieurs chaîne logistique avec d'autres acteurs. Cette coopération est plus ou moins avancées en fonction des filières industrielles et des entités concernées. Avec des entités totalement autonomes, l'architecture cyber est là complètement distribuée.

Au niveau inférieur, un CPPS au niveau entreprise est composé d'unités commerciales (Business Unit - BU) qui sont définies comme des structures disposants d'un fonctionnement autonome. Cependant, cette autonomie aussi grande soit-elle s'opère dans le cadre d'une stratégie d'entreprise. Des décisions stratégiques sont prises au niveau du l'entreprise, puis la mise en oeuvre et les décisions tactiques et opérationnelles sont prises au niveau BU. L'architecture du CPPS entreprise est centralisée pour certaines décisions et distribuée pour d'autres.

Un CPPS de niveau BU est composé d'entités du type site de production. Ces entités n'ont aucune autonomie juridique et économique, et sont soumises à des décisions centralisées à minima stratégies, voire tactiques avec des contraintes économiques extrêmement fortes visant à optimiser le triptyque désormais incontournable du coût, de la qualité et du délai. A ce niveau, la part de décisions centralisées est plus importante avec moins de décisions distribuées prises de manière autonome par chaque entité. La répartition entre décisions centralisées et distribuées peut-elle s'inverser pour un CPPS de niveau inférieur, le site de production soumis à des objectifs opérationnels de performance ?

Après ces éléments de réflexion sur la question de l'autonomie décisionnelle sans autonomie financière et juridique, la seconde question sur les performances du comportement émergent d'entités autonomes est abordée à travers des travaux de collègues lyonnais du laboratoire LIRIS - UMR 5205 CNRS (Laboratoire d'Informatique en Images et Systèmes d'Information). Ces travaux [Guériaux, 2016] concernent un CPS dans le domaine des transports intelligents pour la régulation du trafic avec des entités autonomes composées de véhicules et d'une infrastructure routière communicante représentées sur la figure 4.17. Contrairement à la circulation routière actuelle où l'objectif individuel de chaque agent (conducteur avec son véhicule) ne participe pas nécessairement à un objectif global comme par exemple maximiser l'écoulement du flux, le système multi-agents avec une auto-organisation proposée dans ces travaux vise à fluidifier le trafic. Ces travaux démontrent que la coopération (et non la collaboration, cf. chapitre 2) entre les entités amène par apprentissage à l'émergence d'un comportement plus performant que sans coopération. Cependant, ces travaux n'abordent pas les performances globales d'un réseau routier, par exemple à l'échelle d'une ville. En effet, fluidifier le trafic en amont pourrait conduire à une saturation en aval. Ce phénomène s'apparente à celui de crue liée à l'imperméabilisation des sols et à la canalisation des cours d'eau, comme par exemple les crues du bassin versant de l'Yzeron avec plus de 700 sinistrés à Oullins en 2003 dans le sud de Lyon. Plus l'eau descend vite, plus vite l'eau arrive en grande quantité en bas !

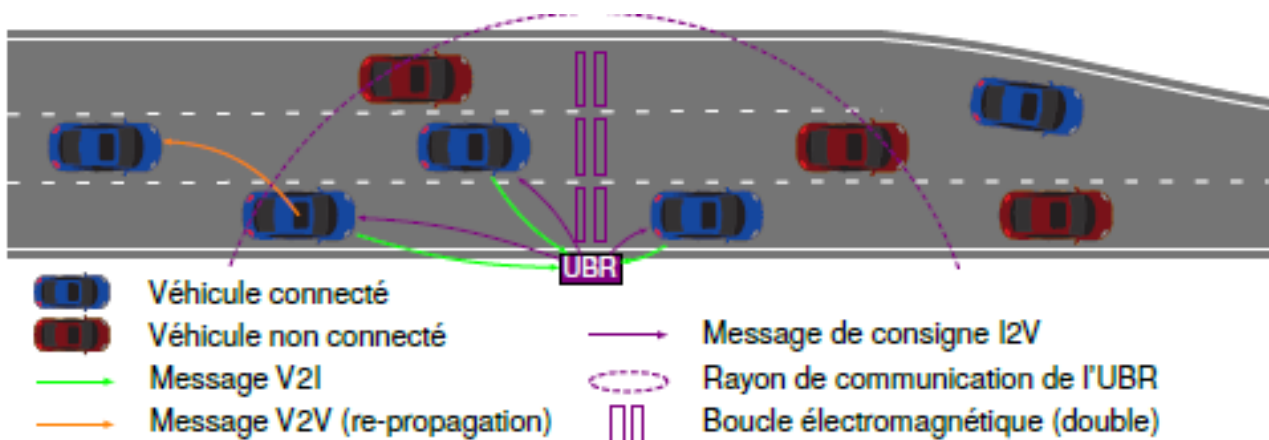


FIGURE 4.17 – Illustration d'un scénario de contrôle décentralisé des systèmes coopératifs, issue de la thèse de Maxime Guériaux.

Quelques caractéristiques essentielles de ces travaux extrêmement intéressants dans le contexte du transport intelligent sont à considérer avant d'envisager de les transposer à un CPPS d'un niveau usine ou inférieur :

- Une approche centralisée n'étant pas envisageable pour ce type de système, elle est donc non pertinente et sans intérêt. Il n'y a par conséquent pas de comparaison des performances entre une approche centralisée et totalement distribuée. Pour un CCPS de niveau usine, une approche centralisée est envisageable.
- La gestion du trafic est une problématique de gestion des flux sans gestion d'opérations de type fabrication, par exemple un arrêt au stand pour réparation.
- En l'absence totale de contrôle de l'occurrence d'arrivée des véhicules, le flux entrant est stochastique. Les flux dans une usine résultent de la réalisation des opérations de fabrication qui «rythment» ces flux. Chaque ressource de fabrication a été dimensionnée au plus juste en fonction d'un cahier des charges fixant une cadence commune et des contraintes économiques notamment en terme d'amortissement. Il n'y a donc jamais de machine «formule 1» au milieu de machines «sans permis».
- Les véhicules arrivent et quittent le système avec des stocks infinis en amont et en aval. Les flux dans une usine sont corrélés à une organisation industrielle définissant des zones de stockages avec des capacités finies.
- Les systèmes physiques d'un réseau routier sont invariants à des horizons de temps de plusieurs dizaines d'années (réduction de files, insertion, etc) propices à l'apprentissage. La démarche d'amélioration continue dans laquelle quasiment toutes les entreprises sont engagées et l'introduction plus fréquente de nouvelles références de produits en production réduisent considérablement cet horizon de temps.
- La gestion du trafic est sans contrainte de coût, de délai, et de qualité pour chaque entité (véhicule) en l'absence d'opération de fabrication, contrairement au CPPS.
- Le trafic est constitué d'entités autonomes juridiquement et financièrement dont la question a été évoqué

précédemment pour les CPPS.

En résumé pour un CPPS de niveau usine ou inférieur invariant sur un horizon de temps plutôt limité, il est possible de choisir entre une approche centralisée ou distribuée pour piloter des flux d'une part avec des stocks finis en amont et en aval et d'autre part «cadencés» par des ressources de fabrication dimensionnées au plus juste en fonction d'un cahier des charges fixant une cadence par référence de produit et une contrainte économique d'amortissement des équipements afin d'atteindre pour les produits un objectif de coût, de délai et de qualité.

La troisième question relative à l'unicité de l'architecture cyber d'une usine pour l'ensemble des fonctions sera abordée dans le projet de recherche présenté au chapitre 6.

En synthèse, l'autonomie est une caractéristique commune à toutes les approches distribuées mais elle n'est pas pour autant contradictoire avec une approche centralisée en considérant différents niveaux d'autonomie. Comme pour les voitures avec une classification standardisée en cinq niveaux (le niveau 5 correspondant à un véhicule autonome sans conducteur), un référentiel de l'autonomie des CPPS reste à standardiser en terme de besoin et de solutions. L'autonomie des CPPS étant souvent vue comme une solution au besoin de reconfiguration, la dernière section de ce chapitre aborde ce besoin.

Reconfiguration

Pour un industriel, la reconfiguration est une réponse possible à un besoin de réactivité face à différentes situations :

1. Ressource humaine : indisponibilité totale ou avec des compétences non alignées avec celles attendues.
2. Ressource matérielle : indisponibilité totale ou baisse des performances liées à une défaillance.
3. Approvisionnement : rupture de courte ou de longue durée, produits non livrés ou défaut qualité des produits livrés.
4. Références de produits : évolution, personnalisation ou introduction d'une nouvelle référence de produit en production, avec ou sans changement de procédés de fabrication et d'assemblage.
5. Demande : évolution des quantités demandées par référence de produits.

Ces cinq situations amènent à envisager différents types de reconfiguration en fonction de :

- Délai dans lequel la reconfiguration doit être effective : entre quelques secondes et quelques mois.
- Le CPPS sur lequel la reconfiguration doit être opérée : équipement, ligne de production, usine.
- Les éléments à reconfigurer d'un CPPS : système physique ou système cyber, architecture ou fonctionnement.

Ce dernier point est précisé à travers une description des éléments reconfigurables au niveau d'une ligne de production et d'un équipement.

Système physique

- Reconfiguration de l'architecture en modifiant l'implantation des équipements de production et des zones de stockage. Cette reconfiguration est envisageable sur un horizon temporel actuellement de quelques semaines à plusieurs mois au regard des contraintes d'installation et de mise en service d'un équipement de production (machine à commande numérique, presse à injecter, cellule robotisée, etc). L'installation d'un équipement est soumise à des contraintes très nombreuses allant du génie civil (épaisseur de dalle suffisante pour résister à une charge de plusieurs tonnes), à la fixation mécanique au sol voire au mur jusqu'à l'arrivée des énergies ainsi que tous les réglages finaux et la mise en service parfois pendant plusieurs mois. Même dans des secteurs en avance sur la digitalisation des processus d'industrialisation et d'organisation industrielle (simulation des équipements avec programmation hors ligne, simulation des îlots et des lignes, etc), comme l'industrie automobile, l'installation nécessite encore d'assembler et de fixer les éléments mécaniques, de raccorder les éléments électriques, voir pneumatique et hydraulique, et enfin finaliser les applications des contrôleurs industriels avec toutes les phases de tests et de mise en service progressive. Les approches de mise en service virtuelle visent à réduire cette dernière étape. Tout cela représente encore aujourd'hui dix huit mois de travail pour plus d'une vingtaine de personnes travaillant en 2/8 pour installer quelques cellules robotisées d'une ligne de ferrage pour un côté de véhicule. Ajouter à cela l'amélioration continue basée sur une stratégie de petits pas à long terme, le déplacement d'un équipement de production reste une opération «lourde» malgré les progrès technologiques nécessitant une longue préparation en amont suivi d'une longue période d'amélioration. Au

niveau d'un équipement, une reconfiguration de l'architecture physique impliquera de réaliser des modifications mécaniques, électriques, pneumatiques et/ou hydrauliques nécessitant quelques heures pour les plus simples à quelques semaines pour les plus complexes. Au regard du temps et des coûts, une reconfiguration physique est généralement engagée pour fabriquer une nouvelle référence de produit ou lors d'une évolution majeure d'un produit. Au delà de ces deux contraintes, une reconfiguration de l'architecture du système physique a un impact non négligeable sur l'organisation industrielle et donc sur le rôle des personnels de production nécessitant un temps tout aussi long pour retrouver leurs habitudes et être productifs.

- Reconfiguration du fonctionnement du système physique au regard des capacités disponibles et de la mission à réaliser. Au niveau d'une ligne, ce nouveau fonctionnement sera défini en fonction de la disponibilité des ressources, de l'état des stocks et de l'évolution de la demande. A ce niveau, les travaux sont extrêmement nombreux en ordonnancement de manière générale et en ordonnancement réactif en particulier. Cette reconfiguration des opérations à réaliser sur chaque équipement se base sur des opérations prédéfinies n'impactant pas l'organisation industrielle et donc les habitudes des personnels de production. Au niveau équipement de logistique, le développement actuel de la robotique mobile en environnement industriel a suscité de très nombreux travaux de recherche ces dernières années visant notamment à développer des approches d'auto-organisation. Au niveau machine de fabrication, la structure mécanique offre assez peu de flexibilité même avec le développement de la robotique industrielle. Le fonctionnement de la machine est fortement lié à cette structure mécanique et par conséquent un peu figé sauf à développer des structures mécaniques flexibles. Au niveau équipement face à une défaillance, une maintenance curative rapide reste donc encore une solution préférable à la reconfiguration.

Système cyber

- Reconfiguration de l'architecture. Étant long et coûteux, un retrofit se justifie uniquement pour des équipements avec un élément physique ayant une très forte valeur. Avec le déport quasiment systématique aujourd'hui des entrées et sorties physiques grâce aux réseaux industriels, cette situation pourrait prochainement changer si la virtualisation de contrôleurs industriels atteint le niveau de fiabilité des contrôleurs matériels actuels. La virtualisation ouvrirait alors la porte à une capacité de reconfiguration extrêmement rapide de l'architecture cyber, juste le temps de redémarrer ! Au niveau supérieur, la virtualisation et les approches de SaaS, Software as a Service, sont déjà une réalité. La difficulté à ce niveau concerne désormais le fonctionnement.
- Reconfiguration du fonctionnement du système cyber. Au niveau des contrôleurs industriels, il n'existe pas d'approche alternative aujourd'hui bien que celles existantes sont un frein au développement des CPS comme mentionné dans [Lee, 2006]. Au niveau supérieur, l'agilité des systèmes d'information est une question faisant l'objet de nombreux travaux.

Comme cela a été évoqué pour l'autonomie, la notion de reconfiguration recouvre aussi de très nombreux aspects au sein d'un CPPS à mettre en perspective des besoins industriels.

La reconfiguration et l'autonomie sont souvent présentées comme des conditions nécessaires à la personnalisation des produits, mais sont-elles indispensables ? Pour se positionner sur un marché, une entreprise doit avant tout avoir une offre avec une valeur ajoutée compréhensible par ces clients. La perception par les clients de cette valeur ajoutée nécessite une démarche marketing et commerciale dont les effets ne sont jamais immédiats, sauf pour une innovation de rupture (le premier smartphone, les premières dosettes de café). Une fois positionnée sur un marché, une entreprise va faire évoluer son offre pour renforcer sa position. Par conséquent, la personnalisation pour une entreprise ne vise pas, en exagérant, à passer de la fabrication de fers à repasser à la fabrication de blindés pour l'armée. Son offre sera constituée de gammes de produits basées sur des procédés de fabrication identiques. La personnalisation d'un produit au sein d'une gamme passe avant tout par la modification des instructions opérateurs et des programmes machines. La reconfiguration et l'autonomie des CPPS ne sont pas nécessairement indispensables pour répondre à ce besoin des entreprises de personnalisation de leurs produits.

Pour clore ces considérations sur l'autonomie et la reconfiguration comme le mentionne Monostori dans l'article [Monostori, 2014] souvent cité comme la référence pour la définition des CPPS, les attentes sont multiples, parfois exagérées : robustesse à tous les niveaux, auto-organisation, auto-maintenance, auto-réparation, et plus généralement auto-X, sûreté, contrôle en temps réel, navigation autonome, transparence, prévisibilité, efficacité, exactitude, etc.

4.4 Conclusion

Ma problématique scientifique est de manière générale celle de l'estimation d'état d'un système cyber physique de production (Cyber Physical Production System - CPPS) afin de nourrir des outils d'aide à la décision pour l'amélioration des performances industrielles. Afin de préciser cette problématique, ce chapitre s'est d'abord attaché à situer, avec leurs caractéristiques, les systèmes à événements discrets comme un modèle particulier de représentation d'un système réel en abordant la question des usages de cette représentation.

Étant indispensable de présenter le domaine d'application pour préciser ces usages, la 4^{ème} révolution industrielle promettant un accès sans limite aux données de production a été abordée, tant du point de vue des initiatives internationales soutenant cette révolution que du point de vue des nouveaux modèles de référence qui émergent. Comme mentionné lors de l'annonce en Allemagne du lancement de l'initiative "Plattform Industrie 4.0" en 2011, le concept de Cyber-Physical System est au coeur de cette révolution. Ce concept nourrissant aujourd'hui de très nombreux travaux de recherche, une discussion a amené à en préciser les contours en revenant aux origines de ce concept porté par le National Institute of Standards and Technology, organisme américain de standardisation. Le fondement de ce concept est une capacité de communication étendue sans contrainte d'architecture mais répondant aux contraintes industrielles : déterminisme temporel, fiabilité et sécurité. Cette hypothèse d'évolution des communications industrielles ouvre la porte à une industrie encore plus performante et avec une flexibilité accrue d'adaptation. Cet objectif de flexibilité issu du modèle RAMI 4.0 est extrêmement ambitieux et caractérise bien cette 4^{ème} révolution industrielle.

La déclinaison du concept de CPS dans le domaine industriel a été présentée sous l'angle de l'architecture particulière d'un Cyber-Physical Production System (CCPS) transformant un flux de produits. La question de la modélisation et de l'observation d'un CPPS a montré la diversité des approches et des modèles tant en phase de conception que d'exploitation. Enfin, une discussion sur l'autonomie et la reconfiguration a mis en exergue l'étendue des objectifs qui se cachent derrière ces deux termes, parfois un peu générique, et souffrant d'un manque de classification.

La finalité de ce chapitre est aussi d'apporter tous les éléments nécessaires pour d'une part positionner au chapitre suivant les travaux de recherche menés depuis 2006 et d'autre part nourrir mon projet de recherche présenté au chapitre 6.

Chapitre 5

Synthèse des résultats scientifiques

Dans le cadre de la problématique générale d'estimation d'état d'un CPPS modélisé par un système à événements discrets, ce chapitre présente une synthèse des travaux de recherche menés depuis 2006. Cette synthèse commence par une proposition de trois grandes classes conférant une vue d'ensemble des travaux de recherche réalisés dans la vaste problématique énoncé au chapitre précédent. Les quatre critères utilisés pour la classification sont introduits après avoir précisé les caractéristiques de la trajectoire passée, présente et future d'un système réel et de son modèle. La classification met en exergue le barycentre des travaux plus orienté vers l'estimation d'état d'un système physique. Basé sur cette décomposition, chaque classe est détaillée à travers une présentation synthétique des travaux relatifs à cette dernière. Ces travaux sont décrits par leur problématique industrielle et scientifique suivie des résultats obtenus avec la production scientifique associée. Cette synthèse des résultats scientifiques au sein de ce chapitre nourrit le projet de recherche présenté dans le dernier chapitre de ce mémoire d'HDR.

5.1 Classification des travaux de recherche

Avant de dévoiler la classification faisant l'objet de cette section, l'analyse comparative de la trajectoire d'un système réel et de son modèle permet de mieux préciser les fonctions déjà évoquées de détection, diagnostic et pronostic à travers leurs singularités.

5.1.1 Trajectoire d'un système réel et de son modèle

En préambule à cette analyse comparative, la figure 5.1 basée sur l'exemple d'un système physique de CPPS rappelle la subjectivité de la notion d'état introduite au chapitre précédent. C'est à l'expert en charge de la modélisation qu'il revient de définir cet état. Il peut représenter une caractéristique physique, comme une position, ou être plus relatif à un mode de fonctionnement, voir à un service rendu ou à des performances caractérisées par des indicateurs. Si au niveau d'un simple composant comme un vérin, l'état peut être défini de différente manière, un consensus sur sa caractérisation est trouvé rapidement entre des experts. En revanche au niveau d'un équipement ou d'une ligne de production, la définition des indicateurs de performance est déjà le sujet d'âpres discussions.

Cette figure rappelle également qu'un état observé ou estimé est toujours une représentation partielle d'un système réel dépendante de son observation. Cette dernière restera toujours partielle d'une part en l'absence de technologie pour observer certains phénomènes dans un contexte de production, et d'autre part en fonction du rapport entre le bénéfice et le coût de cette observation. Si tout était observable à chaque instant et à toutes les échelles, les fonctions de détection et de diagnostic deviendrait inutile. Cela reviendrait à disposer à chaque instant de toutes les données sur notre état de santé ne nécessitant quasiment plus d'aller voir notre médecin !

La conséquence de cette observation directe partielle est une observation parfois indirecte avec potentiellement un décalage dans le temps. Le symptôme d'un aléas est parfois observé bien longtemps après l'occurrence de cet aléas. Cependant, rien n'est figé et l'observation progresse quasiment quotidiennement et plus encore dans le contexte de l'industrie 4.0 qui offrira une observation étendue des systèmes physiques et indépendante de l'architecture de contrôle-commande. Comme présenté au chapitre précédemment, l'industrie 4.0 est avant tout une communication facilitée et sûre non contrainte par l'architecture de contrôle-commande et ouvrant à une grande

Diversité des états observés et estimés

- Position d'un actionneur
- Position d'un produit
- Qualité d'un produit
- Modes de marche et d'arrêt
- Service rendu ou non
- Performance, type TRS ou autre

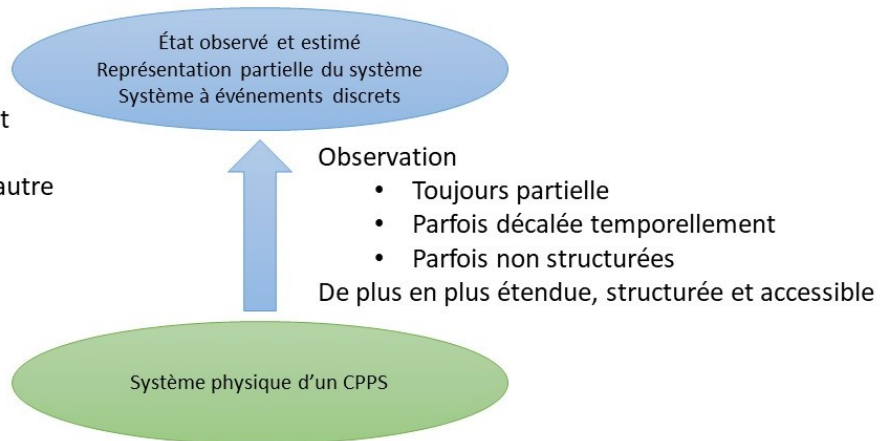


FIGURE 5.1 – Observation et diversité de l'état modélisé d'un CPPS.

facilité d'intégration de nouveaux moyens d'observation pour les fonctions de détection, diagnostic et pronostic représentées sur la figure 5.2.

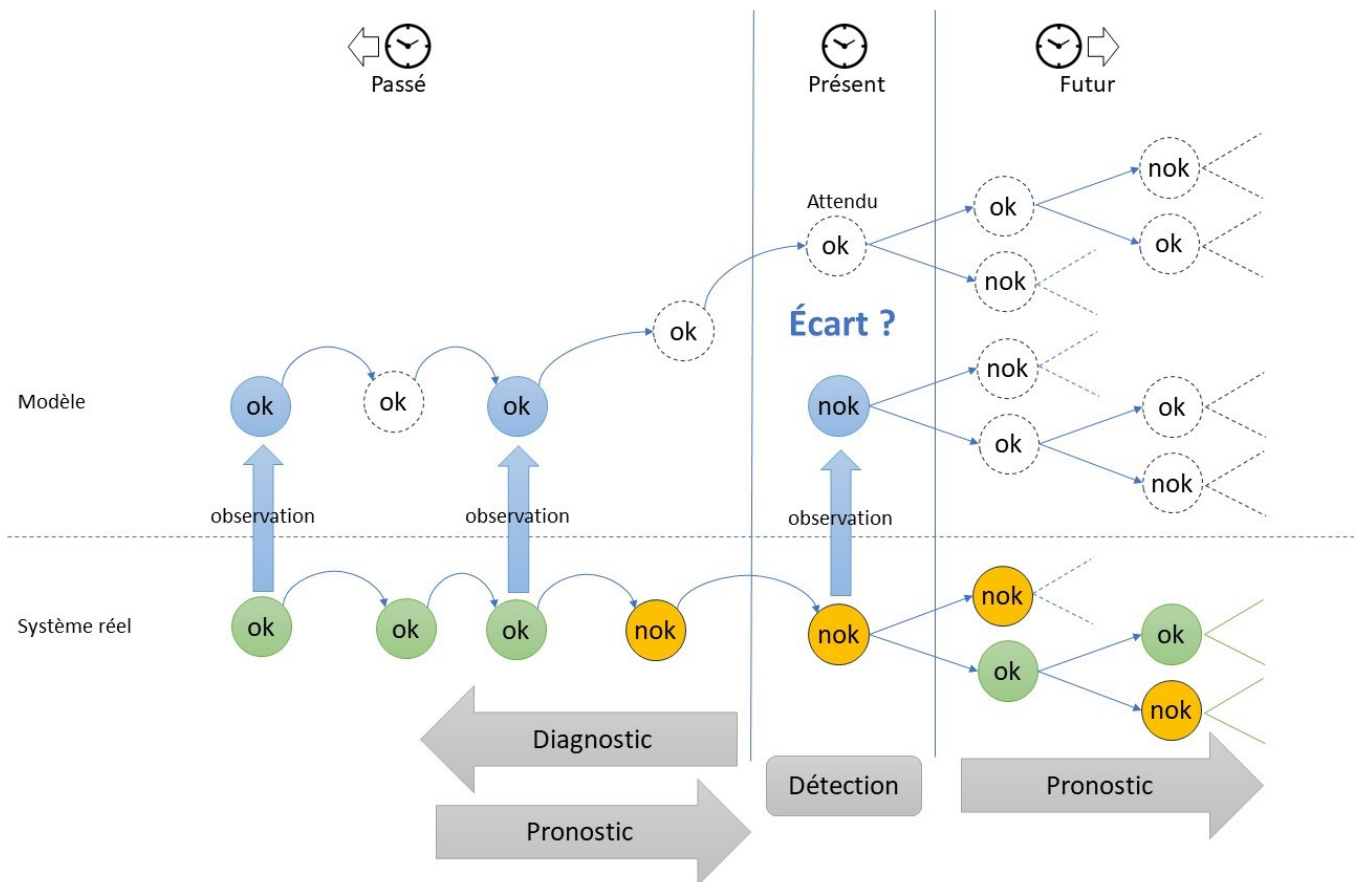


FIGURE 5.2 – Trajectoires du système physique réel et du modèle associé.

Cette figure 5.2 représente la trajectoire passée, présente et future du système réel et de son modèle. Les états verts et oranges du système réel représentent respectivement les états associés au fonctionnement normal, et ceux associés à une dérive du fonctionnement hors de tolérances admissibles. Les états bleus et blancs du modèle représentent respectivement les états attendus corrélés avec une observation du système réel, et ceux attendus

5.1. CLASSIFICATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

sans corrélation avec une observation du système réel. La trajectoire passée et présente est unique alors que les prévisions des trajectoires futures sont multiples.

Au passé et au présent lors de la détection d'un écart entre un état observé et un état attendu, la problématique est de retrouver la trajectoire du système réel en exploitant des modèles plus fins et plus complexes intégrant potentiellement des données complémentaires voir avec une assistance humaine. La complexité et le nombre de ces modèles associés parfois à une assistance humaine rendent leur exécution impossible durant le suivi de la trajectoire. A l'inverse, le processus de détection s'exécute en permanence par comparaison de l'état observé et de l'état attendu. La mesure d'un écart hors tolérance est considéré comme le symptôme d'un aléa qui nécessite une réaction. En dehors des réactions liées à la sécurité, la première réaction vise à estimer l'état présent du système réel en lançant d'abord un diagnostic pour identifier les causes du symptôme détecté suivi d'un pronostic pour estimer tous les impacts des causes identifiées et ainsi estimer plus précisément l'état du système réel à considérer.

Pour les prévisions des trajectoires dans le futur, la détermination des conditions initiales, i.e. l'estimation de l'état présent, est une condition essentielle et déterminante pour la qualité de ces prévisions, comme l'est cette question des conditions initiales en physique et en mathématiques. Dans un environnement industriel forcément stochastique au regard des très nombreux aléas de nature très différente pouvant survenir, la trajectoire future du système réel n'est pas unique même si toutes les décisions ont déjà été prises. En effet, les multiples aléas dont l'occurrence n'est jamais connu avec exactitude influenceront cette trajectoire. Le pronostic n'est pas un problème de recherche du meilleur chemin dans un espace d'état pour définir un plan d'action comme dans le domaine de la recherche opérationnelle et de toutes les méthodes associées d'optimisation. Mais pour un plan d'actions établi, le pronostic vise à prédire les différentes trajectoires potentielles du système réel stochastique et à estimer leur criticité au sens de la sûreté de fonctionnement (probabilité d'occurrence et gravité). La décision de maintenir ou pas le plan initial d'actions est alors fonction de cette criticité.

Ces fonctions de détection, diagnostic et pronostic sont le coeur des travaux présentés dans la suite de ce chapitre. Mais avant cela, les quatre critères de classification des travaux sont exposés dans la section suivante.

5.1.2 Quatre critères de classification

La figure 5.3 résume et illustre les quatre critères retenus :

- **Critère 1** : Approche et méthodologie de construction des modèles.
- **Critère 2** : Éléments dont l'état est modélisé, entrées du modèle.
- **Critère 3** : Éléments dont nous cherchons à estimer l'état, sorties du modèle.
- **Critère 4** : Horizon temporel et fonction.













Critère 1 Approche & Méthodologie	Critère 2 & 3 État modélisé et Estimé	Critère 4 Horizon temporel
<p>Approche</p> <p>Centrée expertise </p> <p>Centrée données </p>	<p>Produit</p> <p>Caractéristiques intrinsèques </p> <p>Flux de produits </p>	<p>Passé & présent </p> <p>Présent </p> <p>Présent & futur </p>
<p>Méthodologie de construction du modèle</p> <p>Direct avec 1 étape </p> <p>Progressive en plusieurs étapes </p>	<p>Système physique</p> <p>Équipement et au-dessus </p> <p>Module d'équipement et en dessous </p>	
	<p>Système cyber </p>	

FIGURE 5.3 – Représentation graphique des critères de classification.

Pour construire un modèle, la connaissance peut être issue : de l'expertise humaine ou d'un historique de données collectées et stockées durant une période de fonctionnement du système à modéliser. Les données considé-

rées ne sont donc pas des données de conception contenues par exemple dans la maquette numérique du produit. En effet, ces données de conception sont générées par des experts, formalisées sous différents langages (maquette CAO 3D, cotation fonctionnelle, schémas électriques, schémas pneumatiques, hydrauliques, SySML, etc). Un expert va ainsi exploiter différentes représentations d'un système réalisées conçu par d'autres experts afin de construire un nouveau modèle pour un besoin particulier. Si le processus de transformation de modèle ne peut pas être automatisé c'est que l'expert qui crée le nouveau modèle intègre des connaissances non formalisées jusqu'alors. 100 % de la connaissance nécessaire à la construction d'un modèle peut être issue de l'expertise humaine. En revanche, 100 % de la connaissance nécessaire à la construction d'un modèle ne peut pas être extraite des données sur le système considéré. A minima, toutes les approches dites d'Intelligence Artificielle (IA) commencent toujours par une étape d'ingénierie des caractéristiques (Feature ingeeniring¹) liée directement à l'expertise humaine sur le système considéré. L'intitulé même de cette étape «ingénierie» mentionne ce recours à l'expertise humaine ! Les références sur cette étape sont nombreuses mais le titre de [Duboue, 2020] illustre bien toute la problématique de cette étape cruciale : «The Art of Feature Engineering : Essentials for Machine Learning». Et c'est sans compter sur l'expertise humaine nécessaire en IA pour collecter les données et les préparer puis sélectionner l'algorithme et enfin déterminer les valeurs optimales des paramètres de l'algorithme choisi. En dehors des développements théoriques des algorithmes, toutes les autres publications scientifiques extrêmement nombreuses traitent de ces points. L'analogie existe avec la communauté scientifique en recherche opérationnelle, entre les développements théoriques de nouveaux algorithmes et leur application à une problématique particulière.

En plus donc de préciser si l'approche est centrée sur l'expertise humaine ou sur les données collectées, le critère 1 précise la méthodologie de construction du modèle :

- Une étape unique de construction du modèle exploité ensuite pour l'aide à la décision.
- Plusieurs étapes de transformation, avec une génération automatique de modèles intermédiaires pour passer d'un premier modèle adapté à un expert humain pour formaliser «au mieux» sa connaissance à un modèle pour l'aide à la décision.

Le mauvais exemple est le grand saut pratiqué par beaucoup d'automaticiens pour qui seul le résultat final compte. En effet, le seul et unique modèle formel est bien souvent le programme final exécuté par un Automate Programmable Industriel et formalisant toutes les connaissances sur le système automatisé : interactions mécaniques entre les produits, les effecteurs et les actionneurs, technologiques électriques/pneumatiques/hydrauliques de pilotage des actionneurs, état observé par les capteurs, protocole de communication entre systèmes cyber et physique !

Pour les critères 2 et 3, les éléments considérés sont les mêmes et concernent ceux déjà évoqués au chapitre précédent, à savoir :

- Produit, à travers son état intrinsèque ou le flux de produit.
- Système physique, au niveau d'un équipement (ou au dessus) ou d'un module d'équipement (ou en dessous).
- Système cyber.

Du point de vue d'un CCPS, les produits sont des éléments du système physique mais ils ont pour particularité d'être des éléments temporaires de ce système physique. Ils entrent, subissent des transformation puis ressortent. Le terme produit fait donc référence ici à tout ce qui traverse le CPPS sous des dénominations différentes (article, consommable, matière première, produit, déchet). Au sein d'un CPPS, deux notions sont associées aux produits :

- État intrinsèque dont l'évolution au sein du CPPS confère au produit final sa valeur ajoutée pour le client. Cet état se caractérise par la géométrie, les états de surface, les propriétés des matériaux, l'état des assemblages au regard l'eBOM (Engineering Bill of Materials) issu de la conception (as designed), puis de la mBOM (Manufacturing Bill of Materials) issue de l'industrialisation et de l'organisation industrielle (as build).
- État du flux de produits. La fabrication d'un produit requière des opérations supplémentaires afin de déplacer le produit de poste en poste au sein du système de production, de manière manuelle ou automatisée avec des convoyeurs ou des robots mobiles par exemple. Ces déplacements n'apportent pas de valeur ajoutée à un produit mais génèrent un coût et des délais, voire impact la qualité. L'ensemble de ces déplacements caractérise le flux de produits au sein d'une machine ou d'une ligne de production comme le trafic routier qui peut être fluide, chargé ou congestionnée !

Au regard des différents standards (IAS88 et ISA95 par exemple) dont le plus récent le RAMI 4.0, le système physique est décomposé en plusieurs niveaux, de 5 à plus. Mais seulement deux niveaux seront retenus pour les critères 2 et 3 :

- Module d'équipement (et en dessous) correspond à un sous-ensemble électro-mécanique permettant d'as-

1. <https://datascientest.com/feature-engineering>

5.2. ESTIMATION DE L'ÉTAT PRÉSENT D'UN SYSTÈME CYBER

surer une fonctionnalité mais ne permettant pas seul de réaliser une opération de production. Il n'existe donc pas d'indicateur de performance en lien avec des objectifs de production comme le TRS (taux de rendement synthétique), mais des indicateurs caractérisant son état comme ceux de fiabilité (MTTR, MTTF, etc).

- Équipement de production (et au dessus) apte à réaliser une opération ou plusieurs opérations de production qui permettent de conférer de la valeur ajoutée ou de déplacer un produit. A ce niveau, il existe pour un équipement des indicateurs de performance en lien avec les objectifs de production comme le TRS.

Enfin, les états observés ou estimés pour les critères 2 et 3 peuvent être ceux du système cyber.

Pour terminer, le critère 4 caractérise l'horizon temporel (passé, présent et futur) et la fonction concernée (détection diagnostic et pronostic). Sur la base de ces quatre critères, la section suivante expose la classification des travaux.

5.1.3 Trois classes de travaux de recherche

La figure 5.4 représente la classification de l'ensemble des travaux menés.

Classe	Domaine, finalité	Critère 1 Approche, Méthodologie et Modèle	Critère 2 Éléments modélisés	Critère 3 État estimé	Critère 4 Horizon temporel et fonction
Estimation de l'état présent d'un système cyber	Manufacturier, Qualité données de production	Processus Ontologie	Équipement Produit & flux	SI MES	Détection
	Manufacturier, Qualité données de traçabilité	Graphe	Produit & flux	SI traçabilité	Détection
Estimation de l'état passé et présent d'un système physique	Manufacturier Reconfiguration équipement	Automated planning Graphe	Sous- équipement Produit	Sous- équipement Produit	Diagnostic
	Manufacturier, Rappel de produits	Réseau Bayésien	Sous- équipement Produit	Sous- équipement Produit	Diagnostic Pronostic
	Manufacturier, Construction d'un jumeau	Automate à états	Sous- équipement Produit	Sous- équipement Produit	Diagnostic
Estimation de l'état futur d'un système physique	Manufacturier, Prédiction TRS	Réseau Bayésien	Opérateur Produit + flux Équipement	Équipement	Pronostic
	Energie, Prédiction consommation	Réseau neurone	Sous- équipement Produit	Produit	Pronostic
	Port maritime, Prédiction congestion	Réseau neurone	Équipement Produit & flux	Flux	Pronostic

FIGURE 5.4 – Les trois classes de travaux de recherche.

Elle fait émerger trois classes principales :

- Estimation de l'état présent d'un système cyber
- Estimation de l'état passé et présent d'un système physique
- Estimation de l'état futur d'un système physique

Pour le critère 1 en plus de l'approche et de la méthodologie, il est indiqué les familles de modèles utilisées. Cette classification met également en exergue un barycentre des travaux plus orienté vers l'estimation d'état d'un système physique. Pour chaque classe, les sections suivantes proposent un résumé.

5.2 Estimation de l'état présent d'un système cyber

Cette première classe rappelée sur la figure 5.5 concerne plus particulièrement l'estimation de la qualité des données de systèmes d'information industriels. Les premiers travaux menés de 2009 à 2012 sont focalisés sur la qualité des données de production vitales pour le système en charge de la gestion des opérations de production, plus communément dénommé Manufacturing Execution System (MES) ou Manufacturing Operation Management

(MOM). Un MES est au centre des échanges entre la production et les autres composantes du système d'information des entreprises, l'Entreprise Ressource Planning (ERP) et le Product Life Cycle Management (PLM). Avec une vision orientée inter-entreprises, les second travaux de cette première classe portent sur la qualité des données de traçabilité unitaire des produits. Jour après jour, l'importance de ces données de traçabilité est croissante tant pour le pilotage de la chaîne logistique que le rappel de produits en passant par la lutte contre les marchés frauduleux au niveau mondial : détournement de produits vers d'autres marchés, contrefaçon complète ou partielle par réutilisation des contenants. Ces travaux ont été menés de 2014 à 2018.









Classe	Domaine, finalité	Critère 1 Approche, Méthodologie et Modèle	Critère 2 Éléments modélisés	Critère 3 État estimé	Critère 4 Horizon temporel et fonction
Estimation de l'état présent d'un système cyber	Manufacturier, Qualité données de production	  Processus Ontologie	Équipement Produit & flux	 SI MES	 Détection
	Manufacturier, Qualité données de traçabilité	  Graphe	Produit & flux	 SI traçabilité	 Détection

FIGURE 5.5 – Classe 1, estimation de la qualité des données de système d'information industrielle.

5.2.1 Amélioration de la qualité des données de production

Dans le cadre de ces travaux sur l'amélioration de la qualité des données de production, la thèse de M. Anis BEN KHEDHER [Ben Khedher, 2012] co-encadrée à 50% avec le professeur Abdelaziz BOURAS au sein du laboratoire LIESP a été financée par une allocation de recherche et soutenue en février 2012. Les résultats ont été publiés dans une revue internationale [Ben Khedher et al., 2012a], dans quatre conférences internationales [Ben Khedher et al., 2009a], [Ben Khedher et al., 2010a], [Ben Khedher et al., 2011b], [Ben Khedher et al., 2012c], dans un chapitre de livre [Ben Khedher et al., 2011a], dans deux doctoral workshops [Ben Khedher et al., 2009b], [Ben Khedher et al., 2010b], et lors de journées STP du GDR MACS [Ben Khedher et al., 2011c], et d'un colloque national des AIP [Ben Khedher et al., 2012b].

La personnalisation des produits, la réduction du cycle de vie et l'amélioration continue conduisent d'une part à une augmentation du volume des données nécessaire à la production, et d'autre part à des fréquences de modification de ces données de plus en plus élevées. La gestion des données de production est devenue une nécessité pour les entreprises avec notamment d'une part la digitalisation des processus d'industrialisation et d'autre part l'utilisation en production d'interfaces homme-machine délivrant la bonne donnée au bon moment aux opérateurs.

Mais si la production a besoin de données, elle en génère également beaucoup comme par exemple pour suivre l'état d'avancement de la production. Par ailleurs, le calcul d'indicateurs de performance fiables avec des niveaux différents de granularité permettant, à partir d'informations justes et réalistes, de prendre les «bonnes» décisions, du chef d'équipe au chef d'entreprise en passant par le responsable de production. Les données générées serviront également au bureau d'études et aux services d'industrialisation afin d'affiner leurs modèles de calcul prévisionnel (coût, capacité, temps de cycle, etc) pour le développement des futurs produits avec un objectif de réduction du temps nécessaire à leur mise sur le marché. La qualité des données de production, consommées et générées, est un enjeu majeur pour les entreprises. Mais la majorité des entreprises ne disposent pas du système d'information nécessaire pour assurer la qualité de leurs données de production. Les entreprises doivent pour cela déployer plusieurs applications d'éditeurs différents. Elles seront alors confrontées à un problème d'intégration au minimum de trois applications (PLM, ERP et MES). La figure 5.6 illustre cette problématique abordée en 2009 et qui reste encore d'aujourd'hui pour les entreprises une réelle difficulté.

Afin de réaliser l'intégration sémantique et syntaxique, la première étape est de définir les informations devant être échangées entre les trois applications (PLM, ERP et MES) afin de garantir la qualité des données de production. Face au problème de qualité révélé par l'analyse des systèmes industriels d'information, la démarche proposée consiste à se concentrer sur les processus métiers et leurs interactions visant à assurer la qualité des données de production, comme représenté sur la figure 5.7.

Suite à cette étude des processus métiers basée sur une analyse des cycles de vie (produit objet, produit instance, système de production, commande client) et une classification des processus métiers en quatre catégories, une couverture de ces processus par les trois applications (PLM, ERP et MES) a été proposée après avoir constaté que la couverture actuelle était insuffisante. Après avoir clarifié le rôle de chacune des applications, les échanges

5.2. ESTIMATION DE L'ÉTAT PRÉSENT D'UN SYSTÈME CYBER

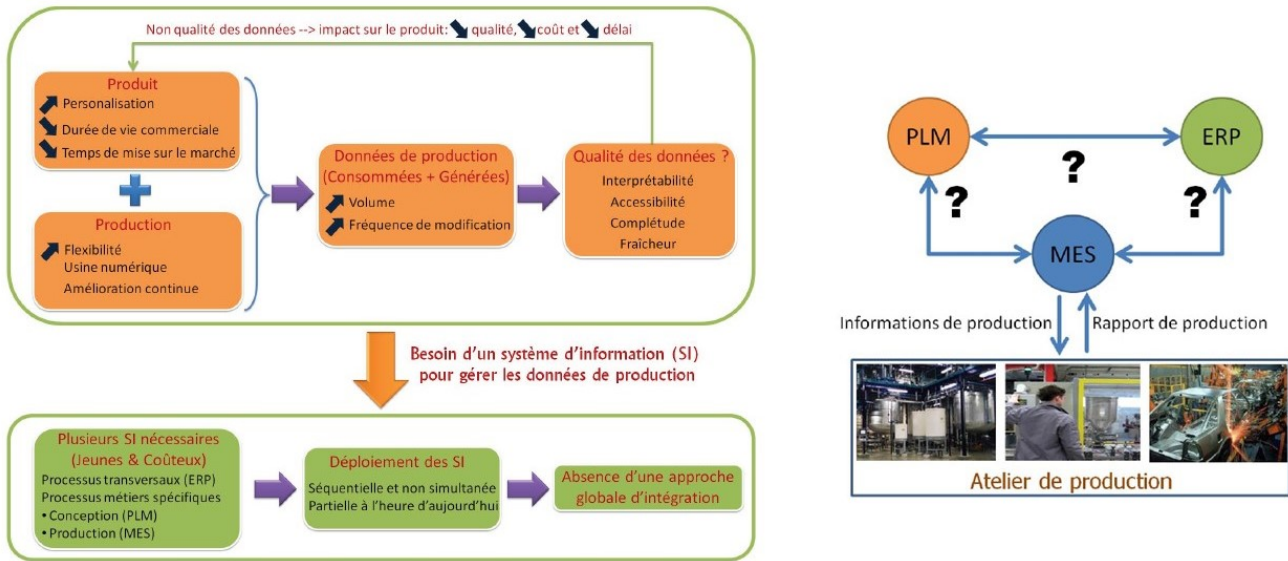


FIGURE 5.6 – Qualité des données de production, problématique industrielle.

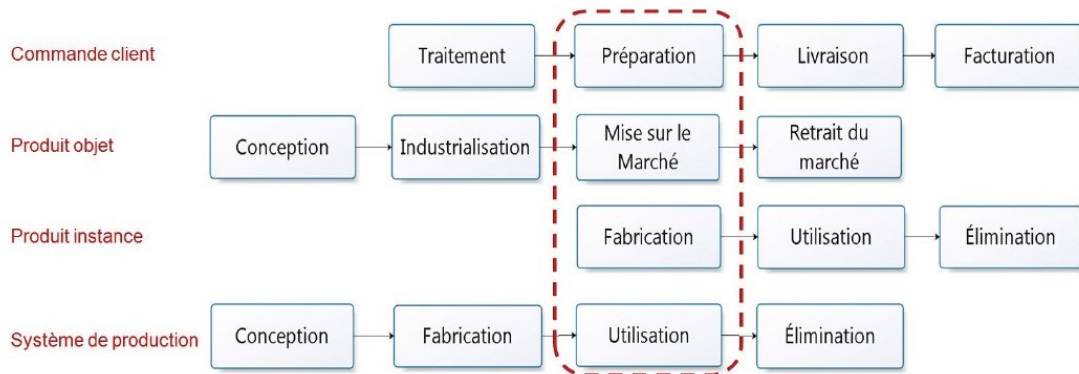


FIGURE 5.7 – Qualité des données de production, approche proposée.

d'informations entre elles ont été définis à partir de l'évaluation de quatre architectures envisageables à partir des trois applications PLM, ERP et MES représentées sur la figure 5.8. Après avoir justifié le choix de l'architecture, il restait à définir le déroulement dans le temps de ces échanges. Plusieurs scénarios d'échanges en fonction des familles de produits ont été proposés.

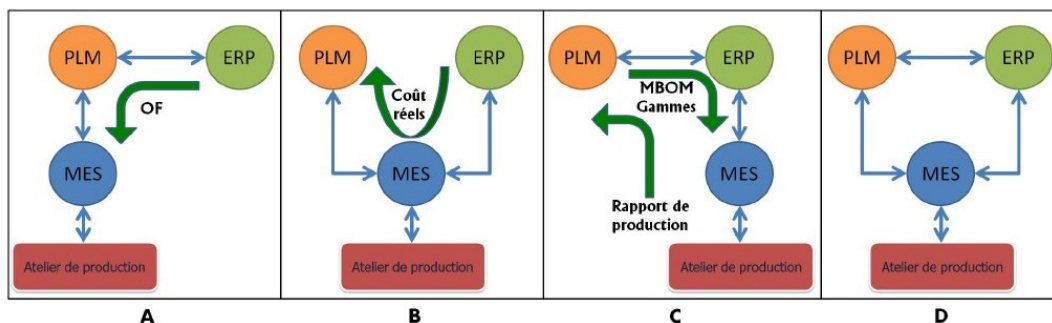


FIGURE 5.8 – Qualité des données de production, architecture proposée.

Définir les informations à échanger entre les applications est une étape préalable mais pas suffisante. En effet, l'étape suivante est d'assurer l'interopérabilité syntaxique et sémantique. Le concept d'ontologie a été retenu pour

assurer cette interopérabilité. Une architecture d'intégration sémantique représentée sur la figure 5.9 a été proposée pour gérer les interactions PLM-MES au sein de l'entreprise industrielle. Elle est basée sur l'intégration des entités ontologiques des deux ontologies construites : PLM et MES à travers un mécanisme de mapping développé. L'originalité du modèle proposé provient d'une alliance de méthodes syntaxiques et sémantiques de recherche de similarités ontologiques. Enfin, les services web apportent l'assurance de l'accessibilité et la fraîcheur des données échangées par les SI en interaction en se faisant guider par le résultat du processus de mapping. Ces travaux n'avaient pas la prétention de développer et proposer de manière exhaustive les ontologies propres aux domaines de l'ingénierie et de la production mais de proposer et de valider une architecture d'intégration. En effet, le développement de telles ontologies constitue à lui seul des travaux de thèse pour chaque ontologie et devrait s'appuyer sur un consortium d'industriels pour un domaine particulier. Afin de réaliser l'intégration qui n'était jamais abordée, un cas d'application basé sur les applications PLM et MES sur la ligne flexible de production du pôle API RAO est plus particulièrement consacré à l'intégration des systèmes PLM et MES.

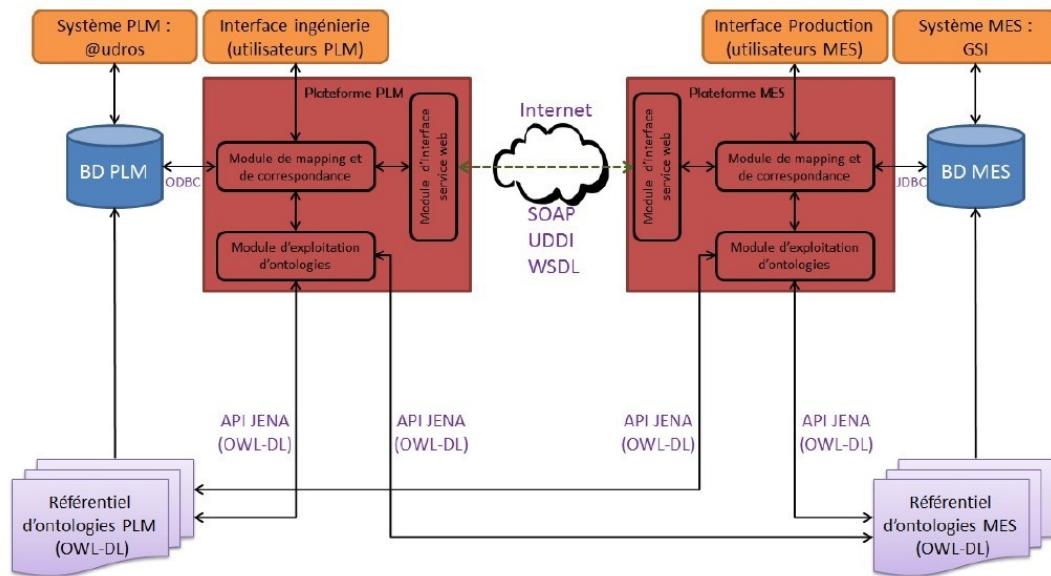


FIGURE 5.9 – Qualité des données de production, architecture d'intégration basée sur des ontologies.

La contribution de ces travaux est double. Elle a non seulement porté sur la proposition d'une architecture d'échange de données entre trois applications industrielles (PLM, ERP et MES) afin d'améliorer la qualité des données de production nécessaires pour garantir la qualité, le coût et de le délai de fabrication des produits, mais également sur la proposition d'une architecture d'intégration sémantique et syntaxique à partir d'une approche multi ontologies couplée à l'utilisation de services web.

Les perspectives de ces travaux étaient de développer une méthodologie semi-automatisée voir automatisée afin de construire les ontologies à partir des applications (PLM, ERP et MES) en service au sein d'une entreprise et notamment à partir de leur modèle de données. A plus long terme, il faudrait étendre la couverture du système PLM à l'ensemble du processus métier d'industrialisation du produit en intégrant pleinement la conception du système de production afin de gérer la création et les modifications de toutes les données nécessaires à la production : fiches d'instructions, fiches de poste et programmes des équipements. Cette extension nécessite pour la conception du système de production de traiter de la problématique d'intégration inter entreprises des systèmes PLM, comme cela se développe aujourd'hui dans le bâtiment à travers une application BIM qui supporte le processus global de création et de gestion des informations pour une ressource de construction. En effet, la conception détaillée, la fabrication et l'installation des systèmes de production sont généralement sous traitées. L'objectif est alors de conserver les liens entre la maquette numérique du produit et la maquette numérique du système de production afin d'assurer la prise en compte des modifications des produits dans la conception du système de production. De plus cette intégration inter entreprises des systèmes PLM permettrait lors de la mise en service du système de production d'intégrer les données sur le système de production dans le système PLM de l'entreprise utilisatrice à partir du système PLM du sous-traitant. Ces données serviront dans un premier temps à la création des données de production puis dans un second temps à la maintenance.

Suite à ces premiers travaux focalisés sur l'amélioration de la qualité des données de production, les travaux

- La traçabilité externe : La capacité à retracer l'historique et l'origine d'un produit tout au long de la chaîne d'approvisionnement, depuis le fabricant jusqu'au consommateur final, est connue sous le nom de traçabilité externe. Cela inclut la documentation d'informations telles que le lieu, la date et l'heure de chaque étape du processus, ainsi que les individus ou groupes impliqués. Ces données peuvent être utiles pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la conformité réglementaire et le contrôle de la qualité.

Aujourd'hui, la traçabilité globale repose sur plusieurs systèmes de traçabilité, alternant entre traçabilité interne et externe. Le problème réside dans la garantie de la qualité des données afin d'avoir la capacité de retracer a posteriori tous les événements associés à un produit jusqu'à la matière première de chaque composant élémentaire.

Les différentes données évoluent à divers points du réseau d'une entreprise. Par la suite, nous proposons de traiter le modèle de données de traçabilité globale, en retraçant chaque donnée à chaque point, depuis la production jusqu'à l'utilisation du produit, avec une évaluation en temps réel. La figure 5.11 illustre le modèle de données proposé.

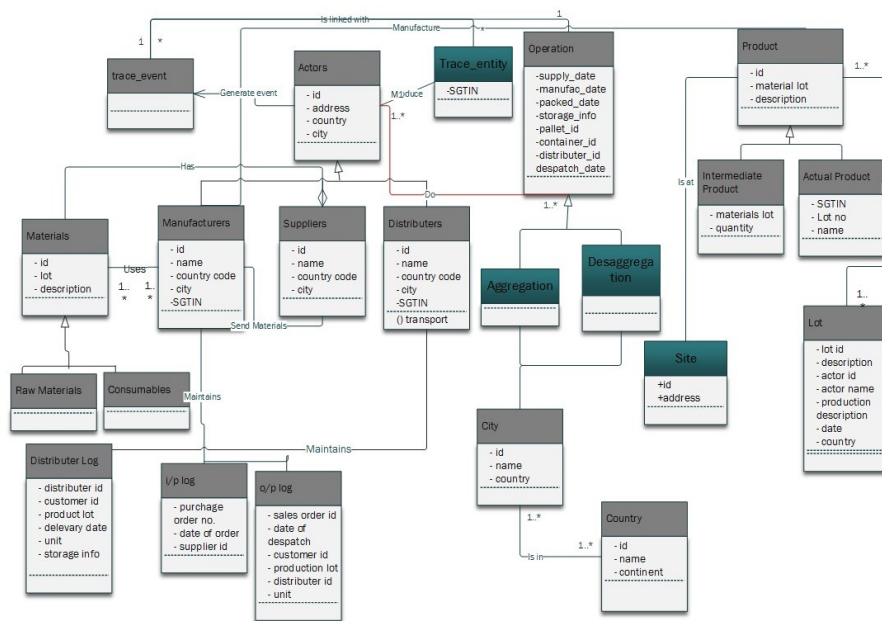


FIGURE 5.11 – Proposed data model.

Le modèle de traçabilité proposé est testé avec un grand ensemble de données disponible pour le réseau de vélos de la ville de New York. L'opérateur de service du réseau est le DOT, qui a fourni l'ensemble de données sur l'utilisation des vélos sur une base quotidienne. L'ensemble de données est disponible sous sept dimensions différentes : Heure de début, Heure de fin, Identifiant de la station de départ, Nom de la station de départ, Identifiant de la station d'arrivée, Nom de la station d'arrivée et Identifiant du vélo. Les ensembles de données de janvier et février 2017 ont été pris en compte.

Il a été observé qu'environ 7000 vélos différents sont utilisés par mois, et le graphe correspondant contient environ 800000 nœuds. Le langage R est utilisé pour générer automatiquement un graphe bipartite pour chaque vélo individuel. La figure 5.12 présente un instantané du graphe du mois de janvier pour le vélo ayant l'identifiant 27325.

Les travaux n'ayant pas été achevés, il ne sera pas évoqué d'autre perspective que de finaliser ces derniers afin de valider le modèle de données proposé et l'approche d'évaluation de la qualité des données basée sur un bi-graphe.

La présentation de la classe 1 sur l'estimation de l'état d'un système cyber s'achève ici.

5.3 Estimation de l'état passé & présent d'un système physique

La seconde classe rappelée sur la figure 5.13 concerne l'estimation de l'état passé et présent d'un système physique. Cette classe se décompose en trois. Les premiers travaux sont focalisés sur le diagnostic au niveau

5.3. ESTIMATION DE L'ÉTAT PASSÉ & PRÉSENT D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

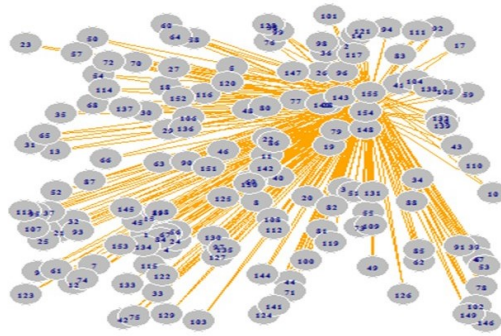


FIGURE 5.12 – Qualité des données de traçabilité, bi-graphe du cas d'application des vélos en libre service à New York.

des équipements de production. Ils se sont déroulés de 2004 à 2012 sur une période ayant commencé avant mon recrutement en 2006 en tant que maître de conférences à l'Université Lyon 1. Sur la période 2011 à 2018, les second travaux liés au projet FUI Traçaverre (2012 - 2016) dont j'étais le responsable scientifique au titre de l'Université Lyon 1 visent à optimiser le rappel de produits verriers à un sous-ensemble d'un lot constitué de plusieurs millions d'éléments. L'objet des troisièmes travaux menés de 2018 à 2019 est de générer un jumeau numérique d'un équipement par la reconstruction de la trajectoire de cet équipement basée sur une analyse des événements observés associés à chaque actionneur.

Classe	Domaine, finalité	Critère 1 Approche, Méthodologie et Modèle	Critère 2 Éléments modélisés	Critère 3 État estimé	Critère 4 Horizon temporel et fonction
Estimation de l'état passé et présent d'un système physique	Manufacturier Reconfiguration équipement	Automated planning Graphe	Sous-équipement Produit	Sous-équipement Produit	Diagnostic
	Manufacturier, Rappel de produits	Réseau Bayésien	Sous-équipement Produit	Sous-équipement Produit	Diagnostic Pronostic
	Manufacturier, Construction d'un jumeau	Automate à états	Sous-équipement Produit	Sous-équipement Produit	Diagnostic

FIGURE 5.13 – Classe 1, estimation de la qualité des données de système d'information industrielle.

5.3.1 Diagnostic pour la reconfiguration d'équipements de production

Bien que débuté en 2004 avant mon recrutement en 2006 à l'Université Lyon 1, ces travaux sur le diagnostic pour la reconfiguration d'équipements de production constituent ma toute première expérience d'encadrement d'un chercheur. De ce point de vue, ils forment le point de départ de mon HDR en plus de présenter mes «origines» de chercheur avant mon recrutement en 2006 à l'Université Lyon 1. De plus, ils mettent en perspective le chemin parcouru depuis que je me suis frayé dans un environnement local de recherche pas parfaitement aligné avec ces origines.

Ces travaux concernent la thèse de M. Eric DESCHAMPS [Deschamps, 2007] dont je n'ai pas été officiellement co-encadrant mais auxquels j'ai contribué directement d'abord en participant à l'encadrement de son stage de master en 2004 venu en appui de mes travaux en seconde année de thèse. J'ai ensuite été impliqué dans ces travaux de thèse basée sur le modèle d'un équipement proposé dans ma thèse [Henry, 2005]. Je suis certain que le directeur officiel de ces travaux, le professeur Eric ZAMAI, reconnaîtra sans aucun doute ma contribution à ces travaux. En tant que co-auteur avant mon recrutement en 2006 à l'Université Lyon 1, ils ont été publiés dans deux conférences internationales [Deschamps et al., 2004], [Deschamps et al., 2006a], et un colloque national du club EEA [Henry et al., 2006]. Après mon recrutement en tant que maître de conférences, ils ont été publiés dans une revue internationale [Deschamps et al., 2007a] et dans trois conférences internationales [Deschamps et al., 2006b], [Deschamps et al., 2006c], [Deschamps et al., 2007b].

Ces travaux proposent de contribuer au domaine de la surveillance et supervision, en ligne, des systèmes à événements discrets complexes. Ils se placent volontairement dans un contexte perturbé par l'occurrence d'aléas de fonctionnement d'une partie opérative dans laquelle deux objectifs majeurs doivent être visés par le système de pilotage réactif considéré : d'une part la réparation d'un composant défectueux et d'autre part le maintien si possible de la productivité. Pour satisfaire ces objectifs, au moins une fonction diagnostic doit être proposée, d'une part pour localiser le composant défectueux et d'autre part, dans un temps imparti fixé essentiellement par des critères de productivité, déterminer quelles sont les capacités opératoires encore disponibles. C'est au deuxième axe que ces travaux proposent d'apporter une solution.

La phase de modélisation est une démarche cognitive complexe. Afin de faciliter cette phase, il est intéressant de séparer la phase de capitalisation des informations nécessaires de la phase de génération d'un modèle pour son contexte d'utilisation. La Figure 5.14 illustre ces différentes phases. Cette démarche permet à l'expert de se concentrer sur les informations nécessaires sans pour autant se préoccuper des difficultés que peuvent apporter l'utilisation d'un outil. Pour une présentation plus détaillée le lecteur pourra se référer plus particulièrement à l'utilisation de l'ingénierie des modèles pour les systèmes de production. La thèse [Henry, 2005] a contribué à la branche de droite de l'expert à la génération de modèle pour la décision. La thèse [Deschamps, 2007] a contribué à la branche du milieu pour générer des modèles de diagnostic de service.

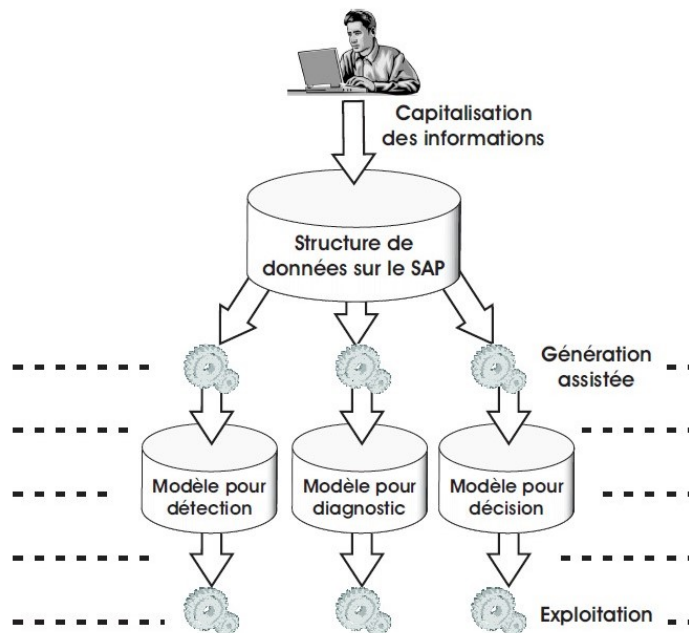


FIGURE 5.14 – De la formalisation des connaissances à des modèles pour les fonctions de surveillance.

Suite à la réception d'un Compte-Rendu Anormal (CRA), le diagnostic doit retrouver les propagations de défaillances possibles pour remonter aux défaillances premières ayant conduit à ce dysfonctionnement. Après quoi, leurs conséquences d'une part sur la réalisation des autres services gérés par le niveau coordination et d'autre part sur l'état de la partie opérative et du flux de produits doivent être étudiés. Ce processus est dénommé le diagnostic de services. Ce dernier s'articulera autour de (cf. partie gauche de la figure 5.15) :

- L'exploitation des caractéristiques des services offerts par les chaînes fonctionnelles.
- L'exploitation de la loi de commande, qui est en quelque sorte la mémoire du passé.
- La recherche des origines possibles dans les services précédemment exécutés à l'occurrence du CRA.

A partir de l'ensemble des informations décrites ci-dessus, le diagnostic devra être en mesure de prendre en compte les différents cas de figures suivants :

- Propagation d'une défaillance à travers la partie opérative ou par l'intermédiaire du flux de produits.
- Défaillances multiples à l'origine du CRA.
- Conséquences d'une propagation de défaillance sur les services et sur l'état de la partie opérative et du flux de produits.

Le résultat de diagnostic (mise en évidence des défaillances possibles ainsi que leurs conséquences possibles sur les services exécutés) doit être ensuite projeté sur les caractéristiques des services correspondants aux ca-

5.3. ESTIMATION DE L'ÉTAT PASSÉ & PRÉSENT D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

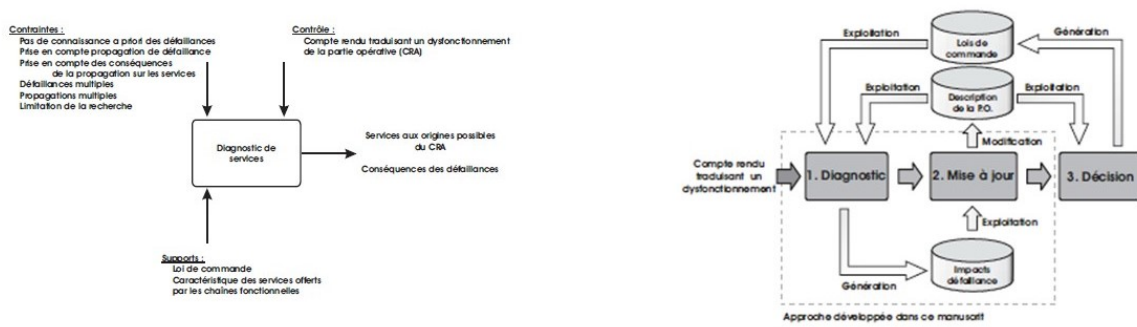


FIGURE 5.15 – Problématique du diagnostic de services et principe de la reconfiguration.

capacités actuelles encore offertes par la partie opérative. La partie droite de la figure 5.15 reprend le processus de reconfiguration avec les différentes étapes décrites précédemment. La phase suivante à la mise à jour étant une phase décisionnelle, elle exploite le résultat du diagnostic et de la mise à jour.

Au travers du modèle proposé, le diagnostic recherche à partir de la réception d'un compte-rendu anormal ses origines possibles et leurs conséquences sur les capacités opératoires. Cette recherche est basée sur l'analyse du comportement de chaque opération exécutée, ainsi que sur celle des liens entre ces différentes opérations par des mécanismes de propagation arrière représenté sur la figure 5.16 et de mécanisme avant. Contrairement aux travaux développés dans le diagnostic logique, le nombre d'éléments constituant le modèle n'est pas fixé, mais évolue en fonction de l'exécution de la loi de commande.

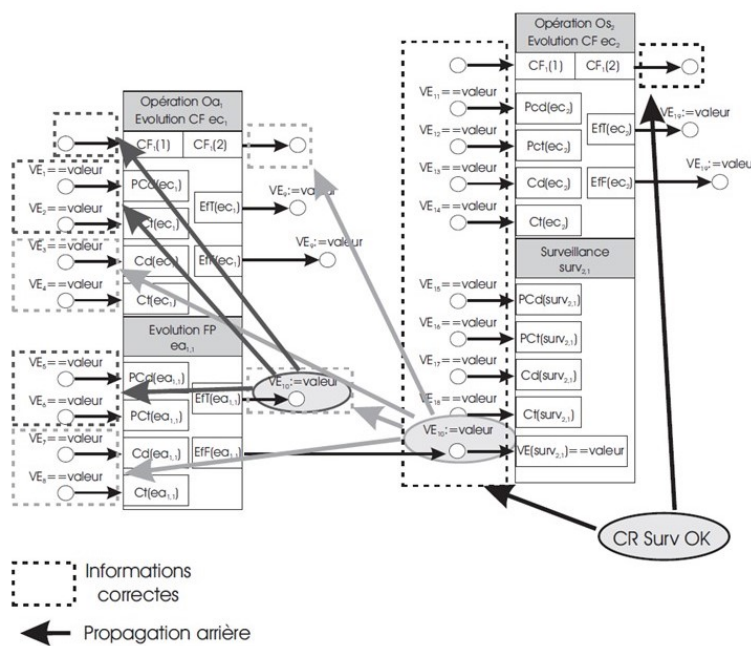


FIGURE 5.16 – Diagnostic, propagation arrière de la confiance accordée aux informations.

Bien que l'étude de l'impact de la structure hiérarchique sortait du cadre de ces travaux, il a été souligné à plusieurs reprises que cette hypothèse atteignait ces limites dans le cadre d'un fonctionnement anormal. Il s'avère nécessaire d'étendre l'approche développée dans le cadre d'une structure cyber mixte (hiérarchique et distribuée). Ainsi, le module à l'origine de la prise en compte du dysfonctionnement pourrait prendre la main sur le processus de diagnostic non seulement en interne mais également sur l'ensemble des autres modules concernés. Ceci semble aujourd'hui particulièrement pertinent dans le contexte des CPPS et du modèle RAMI 4.0.

En 2007, deux étudiants du Master Informatique parcours CODE (COnaissance et DEcision) commun à l'Université Lyon 1, l'Université Lyon 2 et l'INSA de Lyon ont effectué leur stage de recherche sur cette thématique et l'approche développée dans le cadre de la thèse [Henry, 2005]. Ces travaux basés sur une approche d'Automated

Planning et de recherche d'un chemin dans un graphe avaient fait l'objet avant 2006 de quatre publications en conférences internationales [Henry et al., 2003], [Henry et al., 2003], [Henry et al., 2004b], [Henry et al., 2004a], [Henry et al., 2005]. Les derniers résultats de ces travaux ont été publiés en 2012 dans une revue internationale [Henry et al., 2012].

5.3.2 Diagnostic et pronostic pour optimiser le rappel de produits verriers

Sur la période 2011 à 2018, les seconds travaux de la classe 2 «estimation d'état passé et présent d'un système physique» sont liés au projet FUI Traçaverre (2012 - 2016) dont j'ai assuré la responsabilité scientifique au titre de l'Université Lyon 1 membre du consortium composé de trois entreprises, le verrier Saverglass² porteur du projet, le client Camus de Cognac³, l'intégrateur Courbon Software⁴ et de trois laboratoires. Ces travaux visent à optimiser le rappel de produits verriers à un sous-ensemble d'un lot constitué de plusieurs millions d'éléments quand le niveau de qualité mesuré par le client est supérieur au niveau de qualité acceptable défini contractuellement (cf. figure 5.17). Par un couplage des données de traçabilité unitaire des produits, gravage laser d'un datamatrix sur les bouteilles après formage, avec les données associées aux équipements de production, l'objectif est après détection d'un défaut sur une bouteille de caractériser une période de dérive d'un équipement et identifier ainsi les autres bouteilles potentiellement concernées par le même défaut. Une bouteille est susceptible de présenter plus de deux cents défauts dont certains extrêmement difficiles à détecter sur une ligne de production verrière et régulièrement détectés après des opérations de transports voire lors de l'embouteillage par des explosions de bouteilles en phase de remplissage ou de bouchonnage. Le projet FUI Traçaverre a financé la thèse [Diallo, 2015] de M. Thierno DIALLO co-encadrée à 50% avec le professeur Yacine OUZROUT. Par ailleurs, les résultats de ces travaux ont été publiés dans une revue internationale [Diallo et al., 2018], deux conférences internationales [Diallo et al., 2014b], [Diallo et al., 2015b], un chapitre de livre [Diallo et al., 2016], un doctoral workshop [Diallo et al., 2014a] et lors de journées du GDR MACS [Diallo et al., 2015a].

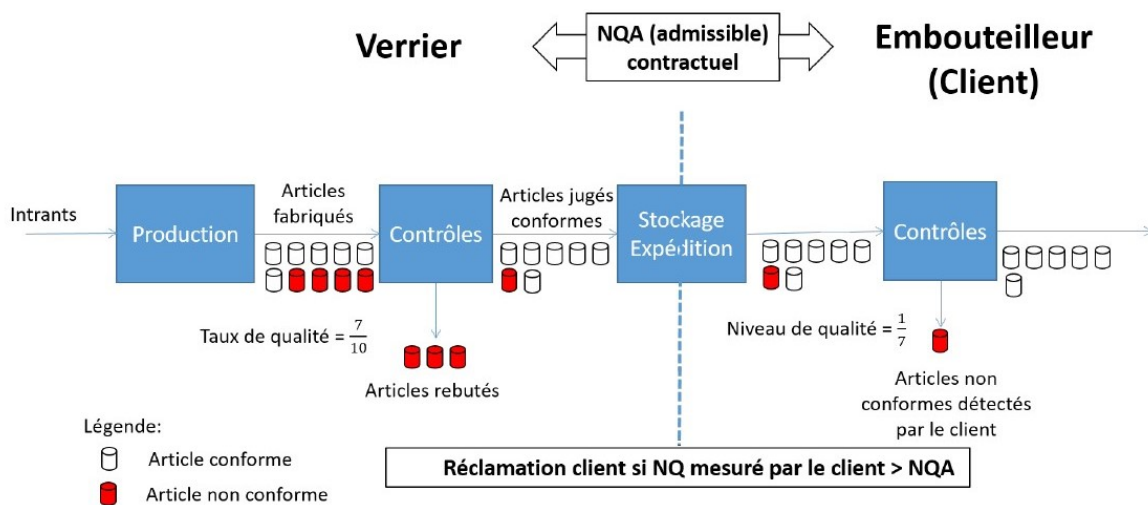


FIGURE 5.17 – Diagnostic de défauts verriers, niveau de qualité acceptable.

L'approche proposée sur la figure 5.18 est basée sur la construction d'un réseau Bayésien pour le diagnostic en couplant les données issues de la traçabilité unitaire et celles représentatives de l'état de santé des équipements à travers les données de production et celles de maintenance.

Les algorithmes d'apprentissage de réseaux Bayésiens, la structure et les paramètres, souffrent d'une complexité limitant leur usage pour des applications réelles de grande taille. Selon General Electric qui a développé PredixTM, une plate-forme cloud pour l'«Internet industriel», l'ordre de grandeur des paramètres des processus industriels dont les valeurs peuvent être collectées varie de mille (au niveau d'une usine) à 1 million (à l'échelle d'une entreprise). En plus de ce nombre de plus en plus élevé de paramètres à surveiller, les entreprises font aussi face à la complexité des données et à la difficulté d'obtenir des données de qualité exploitables. En ce qui concerne la

2. <https://www.saverglass.com/>

3. <https://camus.fr/>

4. <https://www.courbon-software.com/>

5.3. ESTIMATION DE L'ÉTAT PASSÉ & PRÉSENT D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

construction des réseaux Bayésiens à partir de ces données, nous avons vu que l'apprentissage du réseau à partir des données est un problème NP-difficile et l'efficacité des heuristiques de construction dépend de la quantité et de la qualité des données d'apprentissage. Notre objectif est de proposer un algorithme de construction de la structure de réseaux Bayésiens de faible complexité. Le but étant de limiter l'explosion combinatoire en intégrant les connaissances expertes. Après la construction de la structure du réseau Bayésien et l'apprentissage des paramètres des différents noeuds, son utilisation permettra de diagnostiquer un défaut constaté sur un produit.

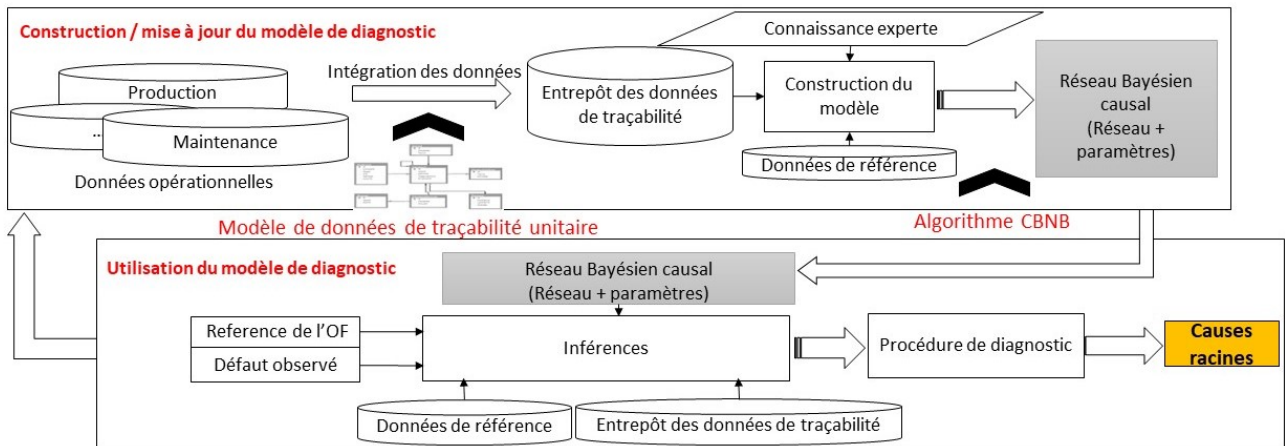


FIGURE 5.18 – Diagnostic de défauts verriers, approche proposée.

Sur la base de l'approche de diagnostic présentée sur la figure 5.18, les contributions de ces travaux représentées sur la figure 5.19 sont :

1. Un processus de rappel visant à minimiser le nombre de produit à rappeler. L'objectif de cette procédure en cinq étapes est de limiter au maximum le rappel aux seuls articles défectueux. L'approche consistant à rappeler tout le lot lorsqu'un défaut est constaté sur un article du lot n'est pas adaptée aux processus continus ou de type « Job Shop ». En effet, la configuration et la complexité de ces systèmes font que deux articles fabriqués lors d'un même ordre de fabrication ont rarement exactement les mêmes caractéristiques contrairement à des produits d'un même lot comme par exemples des yaourts dans le cas d'un système de production par lot.
2. Une procédure de diagnostic utilisant un modèle Bayésien des relations de causalité du système. Une fois le modèle Bayésien défini, nous avons proposé son utilisation qui consiste à faire des calculs inférentiels pour partir de certaines évidences et aboutir à des conclusions. Dans le cas particulier du diagnostic, cette utilisation consiste à déterminer les causes racines à l'origine d'un défaut détecté. La procédure de diagnostic proposée guide l'utilisateur du modèle dans ce processus de raisonnement. Elle permet aussi de détecter l'obsolescence du modèle Bayésien pour sa mise à jour.
3. Un algorithme hybride de construction du réseau en exploitant à la fois des données et l'expertise humaine. Des études expérimentales sur des données synthétiques ont montré que l'algorithme proposé obtenait de meilleurs résultats comparé à plusieurs algorithmes de la littérature reconnus pour leur performance.
4. Un modèle de données incluant celles de traçabilité unitaire des produits avec celles sur l'état de santé des équipements permettant une traçabilité ascendante et descendante. Nous avons observé que la majorité des travaux sur la traçabilité et des solutions informatiques proposées visaient la traçabilité externe. Or pour réaliser un diagnostic des défauts de produits, pour améliorer les processus industriels et pour faire des rappels ciblés de produits en cas de besoin, le couplage entre la traçabilité interne et externe est indispensable.

Au delà du passage en production de l'approche proposée, les quatre perspectives principales de ces travaux étaient :

1. Une utilisation du modèle pour évaluer la probabilité d'un produit de présenter un défaut au regard des valeurs des paramètres process. Cette probabilité serait ensuite utilisée pour calculer le niveau de qualité d'un ensemble de produits expédiés à un client et vérifier ainsi que ce niveau reste sous le seuil fixé contractuellement.

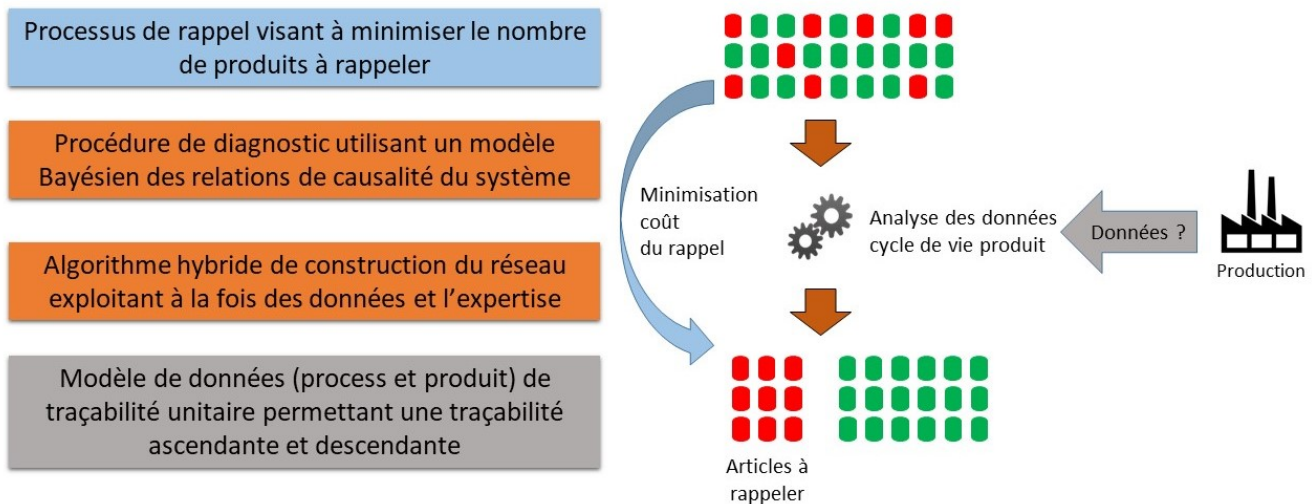


FIGURE 5.19 – Diagnostic de défauts verriers, résultats obtenus avec l’approche proposée.

2. Évaluer la robustesse de l’approche proposée au regard de la qualité des données et proposer des modifications permettant d’améliorer cette robustesse. En effet, notre approche suppose que la qualité des données est "très bonne" comme par exemple pour la complétude. Mais force est de constater que cette hypothèse ne peut pas être vérifiée dans un contexte industriel. Pour s’en convaincre, il suffit de constater que le taux de relecture en ligne des identifiants des produits n’est jamais de 100% !
3. Utiliser le réseau Bayésien pour faciliter la qualification des recettes avant production et donc hors ligne. Le principe serait de définir des plages de valeur des paramètres process permettant de minimiser la probabilité d’occurrence de chacun défaut. Comme il serait fort étonnant que ces plages de valeurs soient identiques pour chaque défaut pris indépendamment, une optimisation multi-critères s’avérerait alors nécessaire.
4. L’approche de diagnostic pourrait être utilisée en ligne pour permettre de détecter au plus tôt une déviation du process et des caractéristiques des produits déclenchant alors une action corrective au plus tôt sans attendre comme actuellement les opérations de contrôle statistique par prélèvement périodique espacées de plusieurs heures. Au delà de la problématique d’accès en temps réel aux données, les temps de calcul de l’algorithme exécuté en permanence pour chacun des milliers de produits à chacune de leurs étapes de fabrication serait sans aucun doute un défi à relever.

Les troisièmes et derniers travaux de la classe 2 concerne le diagnostic pour la construction d’un jumeau numérique d’un équipement.

5.3.3 Diagnostic pour la construction d’un jumeau numérique d’un équipement

Ces travaux se sont malheureusement déroulés sur une période relativement courte de 2018 à 2019 dans le cadre de la première année de thèse CIFRE de M. Aurélien CADIOU avec l’entreprise INFOLOGIC⁵ et co-encadré à 50% avec le professeur Vincent CHEUTET. Suite au départ de la personne qui portait le sujet au sein de l’entreprise INFOLOGIC, ce dernier ne bénéficiait plus du même soutien interne ayant conduit M. Aurélien CADIOU vers un autre projet professionnel. Les résultats de cette première année de thèse ont été publiés dans une conférence internationale [Cadiou et al., 2019].

Cette thèse est intitulée «Utilisation d’un jumeau numérique pour modéliser un écosystème industriel – Outils et modèles de description et de configuration d’équipements industriels». Dans un contexte de digitalisation accrue des systèmes de production, la notion de jumeau numérique émerge pour permettre à la fois le pilotage et la supervision d’un système de production à tous les niveaux de décision mais aussi la simulation de scénarios, le recueil de données au plus proche permettant d’améliorer la maintenance prédictive, etc. Cependant, la phase de transformation numérique reste une étape très mal préparée et les outils actuels ne permettent pas une approche de type « plug’n’produce ». L’objectif de ce travail de recherche est de proposer un cadre méthodologique et logiciel

5. <https://www.infologic-copilote.fr/>

5.4. ESTIMATION DE L'ÉTAT FUTUR D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

permettant le développement afin d'intégrer toutes les facettes d'un équipement au sein d'un système de production, pour évaluer et à terme simuler le comportement du système physique.

L'entreprise INFOLOGIC éditeur d'une application ERP/MES spécialisé dans le secteur de l'agro-alimentaire souhaitait intégrer un jumeau numérique d'une ligne de production à son application. L'échelle de temps des évolutions technologiques dans l'industrie n'est pas celle du numérique grand public : il n'est pas possible de changer de ligne de production chaque année comme certains changent de smartphone ! Commercialement dans un contexte industriel, le jumeau numérique doit donc pouvoir être déployé sur des lignes de production existantes basées sur des technologies de plusieurs années voir dizaines d'années. Une difficulté couramment rencontrée par INFOLOGIC est l'impossibilité de disposer des applications des contrôleurs industriels, rappelez vous le grand saut des automaticiens évoqué précédemment ! Face à cette difficulté, le premier résultat concerne une approche de diagnostic permettant à partir de l'observation visuelle de l'évolution des actionneurs d'associer les variables mémoires du contrôleurs accessibles en OPC mais sans connaître leur signification. La figure 5.20 présente l'approche proposée, développée et expérimentée avec succès sur un équipement du département GMP de l'IUT Lyon 1.

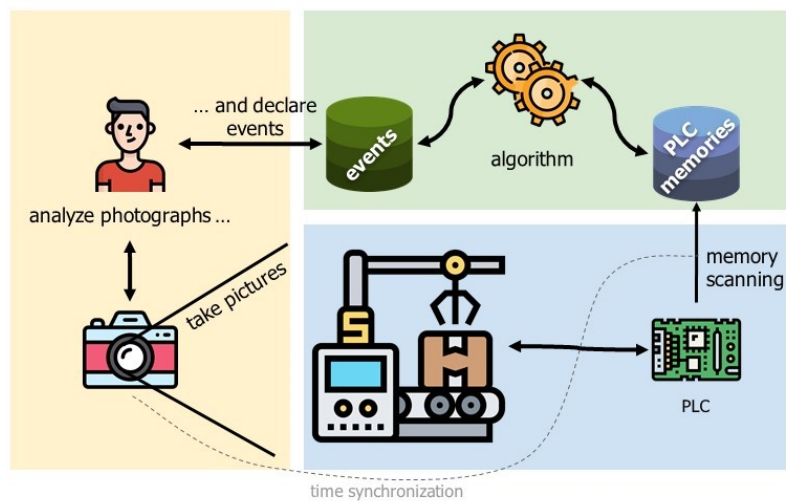


FIGURE 5.20 – Diagnostic permettant d'associer des événements observés visuellement et les variables d'un automate programmable industriel.

Cette thèse ayant été malheureusement arrêtée à la fin de la première année, la présentation de ces travaux s'achèvent là avec ceux de la classe 2 «Estimation d'état passé & présent d'un système physique». La section suivante aborde ceux de la troisième classe.

5.4 Estimation de l'état futur d'un système physique

La troisième classe rappelée sur la figure 5.21 concerne l'estimation d'état futur d'un système physique. Cette classe se décompose également en trois. Les premiers travaux menés de 2013 à 2018 sont focalisés sur la prédiction des performances d'un équipement au regard d'objectifs de production. Sur la période 2016 à 2020, les second travaux visent à optimiser le coût de la consommation énergétique d'un site de production contractuellement dépendant du marché européen de l'électricité. L'objet des troisièmes travaux menés de 2017 à 2023 est d'évaluer à chaque nouvel aléa le risque de congestion d'un port maritime à conteneurs.

5.4.1 Pronostic du taux de rendement synthétique

Dans le cadre de ces travaux sur le pronostic du taux de rendement synthétique d'un équipement de production (TRS, Overall Equipment Effectiveness - OEE), la thèse de M. Hoang TRAN NGUYEN [Tran, 2018] soutenue en juillet 2018 et co-encadrée à 50% avec le professeur Eric ZAMAI a été financée par la région Rhône-Alpes dans le cadre d'une collaboration entre les laboratoires GSCOP et DISP. Les résultats ont été publiés dans une conférence internationale [Tran et al., 2016].

Classe	Domaine, finalité	Critère 1 Approche, Méthodologie et Modèle	Critère 2 Éléments modélisés	Critère 3 État estimé	Critère 4 Horizon temporel et fonction
Estimation de l'état futur d'un système physique	Manufacturier, Prédiction TRS	Réseau Bayésien	Opérateur Produit + flux Équipement	Équipement	Pronostic
	Energie, Prédiction consommation	Réseau neurone	Sous-équipement Produit	Produit	Pronostic
	Port maritime, Prédiction congestion	Réseau neurone	Équipement Produit & flux	Flux	Pronostic

FIGURE 5.21 – Classe 3, estimation d'état futur d'un système physique.

Les systèmes de type Manufacturing Execution System (MES) intègrent l'ensemble des fonctions nécessaires au pilotage d'un système de production avec un modèle de données unique répondant aux besoins de chacune des fonctions. Le rôle du MES est clair, à partir des données centralisées de production tant prévisionnelles que réalisées, optimiser l'outil de production, suivant le schéma "Connaître, Analyser et Améliorer", étapes mettant chacune largement à profit la digitalisation mais nécessitant également chacune une expertise humaine. Parmi tous les leviers technologiques et numériques qui convergent vers "l'industrie 4.0", la valorisation des données est certainement l'un des domaines qui couvre les enjeux les plus importants. Avec les solutions de MES, les moyens de capture, de collecte, d'agrégation et de stockage de ces données sont déjà présents et localisés dans l'entreprise. La clé du succès consiste donc à identifier et à isoler les bonnes données, à les associer, à les "travailler" pour obtenir des indicateurs agrégés utiles à l'amélioration de la prise de décision et donc de la performance. Aussi, nous pouvons dire à ce jour que même si les données collectées par un MES ont une grande valeur intrinsèque, celles-ci sont souvent sous-exploitées. C'est dans cette problématique générale que cette thèse a apporté sa contribution.

Ce travail de recherche se focalise sur la problématique du diagnostic et du pronostic au niveau MES. Comme représenté sur la figure 5.22, il aborde en premier lieu la problématique de l'ingénierie des caractéristiques dans le cadre d'une approche par apprentissage à partir d'un modèle de données MES répondant au standard de la norme ISA-95 à des fins de généralité de l'approche finale.

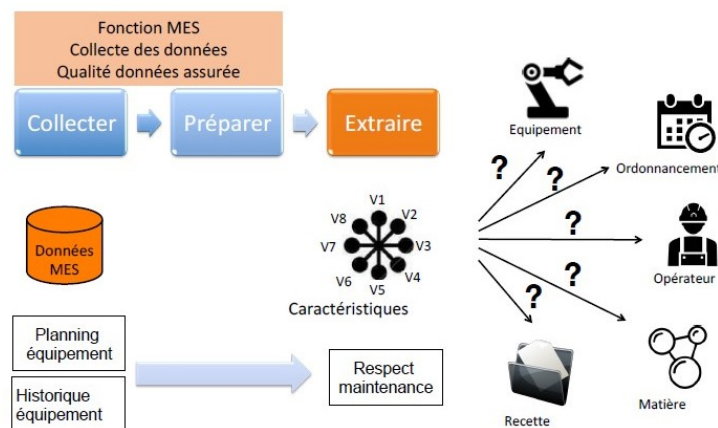


FIGURE 5.22 – Ingénierie des caractéristiques pour l'apprentissage : d'une base de données MES standardisée aux caractéristiques.

La figure 5.23 représente les trois étapes de l'approche proposée pour le diagnostic. Pour le pronostic, la démarche est identique car seule l'exploitation des modèles Bayésiens générés est différente.

L'étape A de modélisation est la plus importante, d'une part parce qu'elle en constitue les fondations et la garantie de généralité, d'autre part parce qu'elle intègre les relations de dépendances entre les variables du modèle ISA-95 qui seront par la suite exploitées à des fins de diagnostic et de pronostic.

L'étape B d'instanciation du modèle commence par la génération de l'ensemble des variables du modèle pour le système de production et le MES considérés. En effet, l'étape précédente peut être considérée comme une étape de définition des types de variables. L'étape B consiste donc à extraire de la base de données d'un MES installé,

5.4. ESTIMATION DE L'ÉTAT FUTUR D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

et en production depuis une durée suffisante, les informations nécessaires pour l'instanciation comme par exemple la liste des opérateurs intervenants sur le poste et ainsi générer pour chaque opérateur les variables associées. Par ailleurs et toujours par extraction des données MES, un modèle Bayésien est construit par poste de travail en fonction des ressources associées (équipement, personnel, produit, matière première).

Dans l'étape C, l'approche de diagnostic permet de mettre en exergue, sur la base de deux interrogations d'un réseau Bayésien à Noeuds Temporels (RBNT) à deux instants différents, les différences de probabilités obtenues sur chacune des causes potentielles. Une évolution significative des probabilités liées à chaque caractéristique sera considérée comme une cause à suspecter pour l'exploitant pour une variation linéaire significative d'une composante du TRS entre ces deux instants.

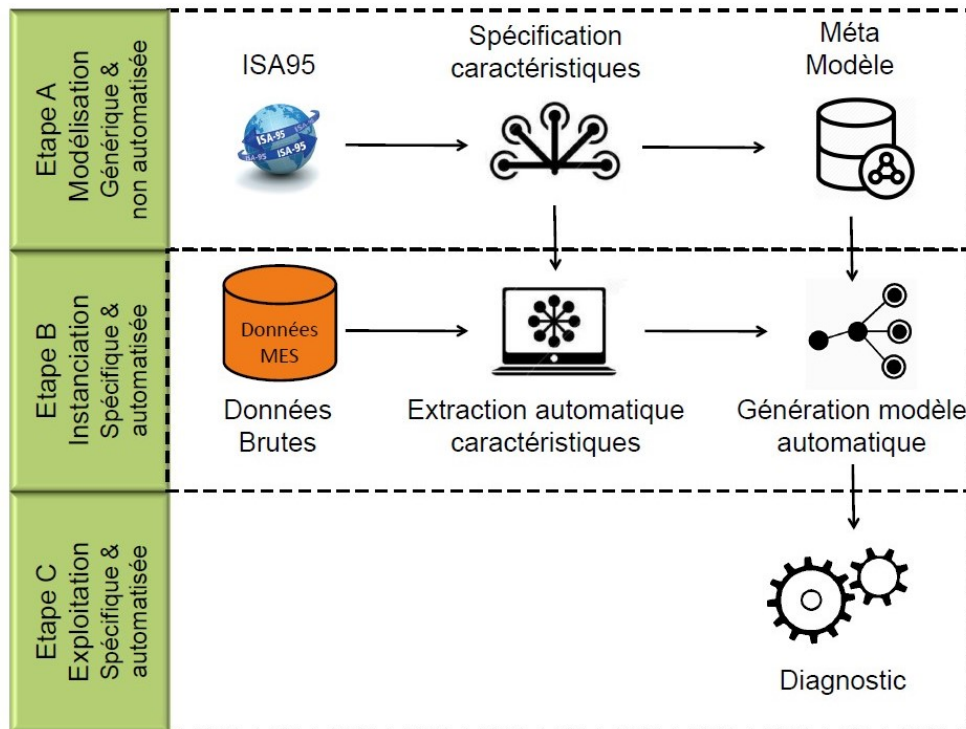


FIGURE 5.23 – Approche proposée "plug&play" d'intégration au sein d'un MES de fonctions de diagnostic et de pronostic.

L'approche proposée a été mise en œuvre sur l'atelier flexible du pôle Smart RAO situé sur le campus Lyon-Tech la Doua à Villeurbanne. L'intérêt de la démarche de mise en œuvre réside dans le fait de disposer d'une base de données suffisamment riche pour nous permettre de mener les différents tests et valider l'approche. Bien entendu, la plateforme utilisée n'est pas industrielle, et il est de ce fait inconcevable de la faire fonctionner 24h/24h et 365 jours par an afin de disposer d'un vrai historique de production et d'en récupérer des données tangibles pour nous permettre de mener un véritable apprentissage et de véritables inférences. Pour pallier à ce problème, nous avons retenu la philosophie suivante. Dans un premier temps, la ligne flexible de production étant réelle et opérationnelle dans le cadre de travaux pratiques pour des étudiants ingénieurs, nous avons repris la structure de la base de données réelle de ce TP et l'avons étendue à nos besoins. Sur la base de cette extension, nous avons ensuite lancé une campagne de production réelle sur la cellule afin de générer un ensemble de données réalistes. Sur la base de ces données, nous avons ensuite développé, sous @MATLAB 2014b, un programme qui nous a permis de simuler 10 ans de production (de 2007 à 2017) de ce même système. Le programme de simulation et d'extension de la base de données tient compte de la base initiale et de quelques règles (par exemple des seuils sur certaines variables) afin de générer des données cohérentes entre elles. La figure 5.24 donne un aperçu général de cette démarche.

Ce travail de thèse n'a pas permis d'atteindre pleinement l'objectif en se limitant à la fonction de diagnostic. Cependant, la finalité est de proposer une fonction de pronostic du TRS au regard de l'état réel de la ligne de production et de l'ordonnancement prévu sur différents horizons temporels (jour, semaine, mois). Si la prédiction se révèle être mauvaise dans les conditions présentes, des actions sont à engager sur la base des causes potentiels

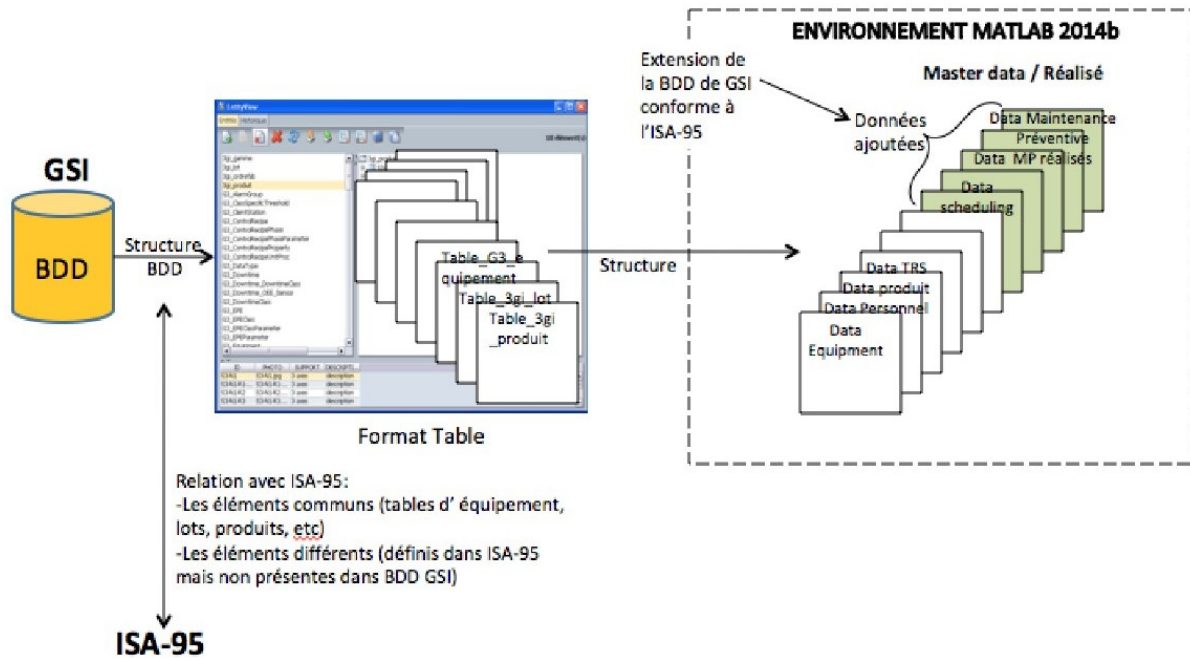


FIGURE 5.24 – Application des résultats sur la ligne flexible de production du pôle Smart RAO avec la solution MES Global Screen Intra.

de cette dérive. En effet, les réseaux Bayésiens ont l'avantage d'interpréter leurs résultats contrairement à d'autres outils comme les réseaux de neurones par exemple. Idéalement, la fonction de pronostic pourrait être intégrée à l'ordonnancement avec comme critère d'optimisation le TRS et comme contrainte le respect de la production à réaliser. Cette idée d'intégration à une solution MES de fonctions d'analyse basées sur des outils d'intelligence artificielle a conduit au dépôt en 2018 du projet FUI Flexia avec l'éditeur de MES Ordinal Software⁶ et l'entreprise ProBayes⁷ spécialiste des solutions d'intelligence artificielle pour l'industrie. Malheureusement, ce projet n'a pas été financé !

Suite à ce premier travail orienté sur les CPPS manufacturiers, la section suivante aborde le second travail mené au sein de la classe 3 «estimation d'état futur d'un système physique».

5.4.2 Pronostic de la consommation énergétique d'une chambre froide

Ce travail sur le pronostic de la consommation énergétique d'une chambre froide a été mené de 2016 à 2020 dans le cadre de la thèse CIFRE de M. Alnour RIBAUT [Ribault, 2020] avec l'entreprise Energy Pool⁸ et co-encadré à 33% avec le professeur Yacine OUZOUT et Samuel VERCRAENE, maître de conférences au laboratoire DISP. Les résultats de ce travail ont été publiés dans une revue internationale [Ribault et al., 2021], dans une conférence internationale [Ribault et al., 2019] et enfin dans un colloque national ROADEF [Ribault et al., 2017]. L'exploitation commerciale de ces travaux par l'entreprise Energy Pool a restreint les possibilités de publication.

L'Union Européenne a établi une stratégie de lutte contre le réchauffement climatique. Elle a notamment fixé pour objectifs d'ici 2030 une part d'au moins 32% d'énergies renouvelables dans son mix énergétique, ainsi qu'une amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 32.5%. L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique apporte de nouvelles contraintes sur la gestion du réseau électrique. Contrairement aux énergies fossiles ou à l'énergie nucléaire, la capacité de production de certaines énergies renouvelables est fortement dépendante de facteurs météorologiques. Puisqu'une production insuffisante à satisfaire la demande en énergie aurait pour conséquence des pannes de courant de grande ampleur, ce qui serait potentiellement désastreux pour les populations. Il est indispensable de trouver des moyens de compenser les baisses de production des énergies renouvelables intermittentes. Une première option est de compenser ces baisses de production par une production d'énergie dite pilotable. Une autre option est d'utiliser diverses techniques de stockage de l'énergie afin

6. <https://www.ordinal.fr>
 7. <https://www.probayes.com/>
 8. <https://www.energy-pool.eu>

5.4. ESTIMATION DE L'ÉTAT FUTUR D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

de conserver le surplus d'énergie produit pendant les pics pour compenser les creux de production. Une dernière option est d'inciter les consommateurs d'énergie à adapter leur consommation aux variations de la production : c'est ce qu'on appelle la maîtrise de la demande en énergie, ou demand side management, qui peut prendre deux formes :

- La première est celle de l'amélioration de l'efficacité énergétique.
- La seconde est ce qu'on appelle la réponse à la demande, ou demand response. Cette notion correspond à la modulation à court terme de la consommation d'énergie des consommateurs en réponse à des incitations économiques mises en places par le gestionnaire du réseau électrique.

Comme illustré sur la figure 5.25, l'offre de service de l'entreprise Energy Pool vise à proposer ces deux leviers d'action à des sites industriels à très forte consommation énergétique, comme par exemple les entrepôts frigorifiques.

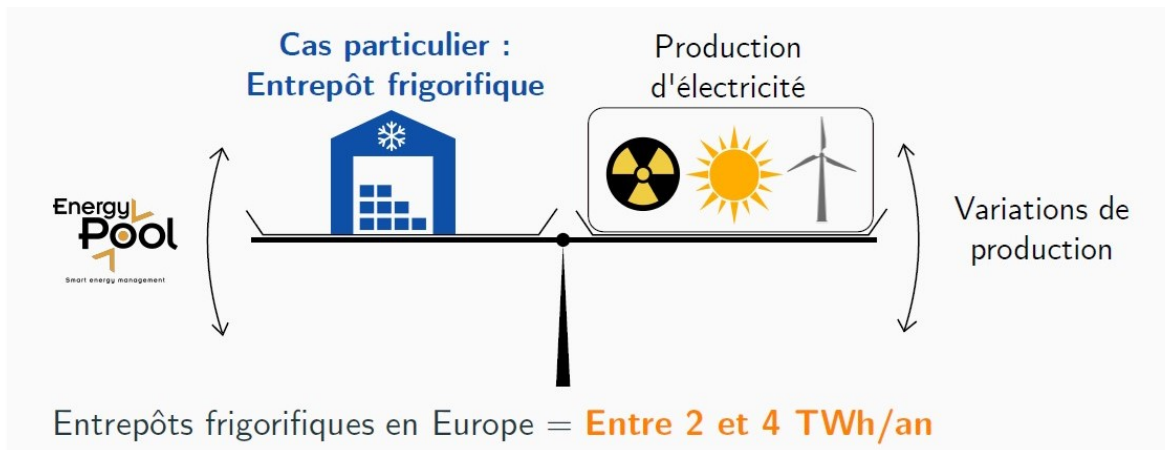


FIGURE 5.25 – Principe de réponse à la demande, ou demand response, développé par Energy Pool pour le compte de clients industriels.

L'objectif de ce travail illustré sur la figure 5.26 est donc de déterminer une méthode permettant de générer des profils de production et de distribution de froid à coût minimal pour des entrepôts frigorifiques, pour des valeurs données de conditions initiales, de prix spot de l'électricité et de température extérieure. Les prix spot de l'électricité sont les prix établis sur le marché de l'électricité par les bourses le jour J pour le lendemain. Deux bourses de l'électricité opèrent sur le marché de l'électricité en France : EPEX Spot et Nord Pool Spot⁹.

Face à cette problématique, deux approches ont été envisagées comme illustré sur la figure 5.27 :

- La première approche envisagée est une méthode de modélisation mathématique par un problème d'optimisation, définissant des variables de décisions, une fonction objectif à optimiser, et des contraintes à respecter. Un algorithme est ensuite conçu pour déterminer un profil solution optimal, ou à défaut dont la valeur du coût est proche de la valeur optimale.
- La seconde approche est basée sur l'apprentissage automatique à partir des données historiques industrielles dont nous disposons. Des modèles sont entraînés sur ces données afin de fournir une prédiction des valeurs futures de la température et du coût pour une décision et un contexte donné. En énumérant toutes les décisions possibles, et en effectuant les prédictions pour chacune d'elles, la meilleure décision peut être sélectionnée. 144 décisions sont ainsi sélectionnées consécutivement pour couvrir un horizon de temps de 24 heures.

Du point de vue d'un acteur cherchant à fournir des services d'optimisation énergétique, se pose la question de la généralisation de ces méthodes d'optimisation à des installations frigorifiques différentes ainsi qu'à des secteurs autres que celui de la réfrigération de chambres froides : par exemple, le maintien en température d'immeubles résidentiels ou de bureaux. Les coûts associés à l'industrialisation de l'approche par modélisation et optimisation peuvent être importants, car il peut être nécessaire d'adapter le modèle et l'algorithme pour une application à des installations frigorifiques différentes, ou bien à d'autres processus industriels. La seconde approche par apprentissage présente l'avantage d'être facilement généralisable, sous réserve de disponibilité des données historiques.

Ma contribution à ce travail a plus particulièrement concerné la seconde approche basée sur deux modèles de prédiction et un algorithme de décision. Le modèle de prédiction de coût est basé sur un réseau Bayésien alors que

9. <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-donnees-de-marche>

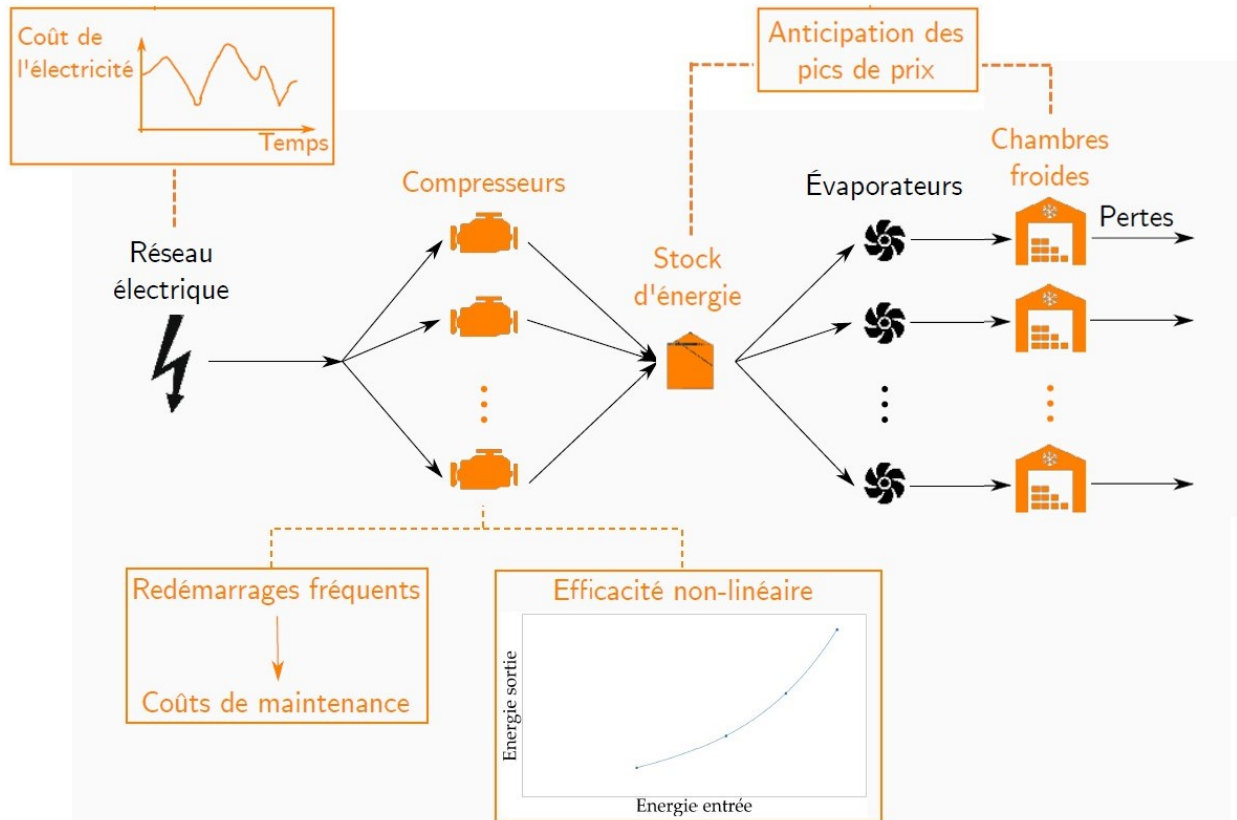


FIGURE 5.26 – Problématique d’optimisation du coût pour des entrepôts frigorifiques.

le modèle de prédiction de la température est basé sur un réseau de neurones récurrent. Ce travail a conduit à une étude comparative des deux approches basées sur une seule chambre froide pour laquelle le modèle d’optimisation par une mathheuristique a été développé. La figure 5.28 présente les résultats de cette étude comparative entre la première approche par programmation dynamique et la seconde avec des modèles de prédiction générés par apprentissage.

La méthode par apprentissage n’est pas, en l’état, suffisamment performante pour supplanter une approche par optimisation basée sur des outils de recherche opérationnelle. L’étude préliminaire réalisée ouvre néanmoins la voie à des perspectives de recherche. Une première piste d’amélioration est peut être de collecter et de traiter davantage de données. Dans l’application présentée dans cette étude, nous avons pu utiliser un peu moins d’un an de données. Certaines périodes de l’année sont toutefois absentes dans ces données, en raison d’incidents lors de la collecte de celles-ci. De plus, 30% des données doivent être réservées pour l’ensemble de test, qui sert à évaluer la performance du modèle final de façon non-biaisée, ce qui réduit encore la quantité de données disponible pour l’apprentissage. Au final, dans les données utilisées pour l’apprentissage, chaque jour de l’année était compris au mieux une fois, ce qui ne permet pas de prendre en compte les variations d’année en année. Enfin dans cette étude comparative, les coûts sont estimés sans avoir la possibilité de comparaison des coûts réels résultants de l’application de chaque approche sur une chambre froide réelle, dont le comportement réel sera forcément différent du modèle.

Après ce travail dans le domaine de l’énergie, la présentation de la troisième de mes travaux s’achève avec la présentation d’un travail dans le domaine maritime.

5.4.3 Pronostic de congestion d’un port maritime à conteneurs

Ce travail sur le pronostic de congestion d’un port maritime à conteneurs a été conduit de 2016 à ce jour dans le cadre de la thèse de Mme Siraprapa WATTANAKUL [Wattanakul, 2022] en co-tutelle avec l’Université de Chiang Mai en Thaïlande. Dans le cadre du projet Erasmus Mundus SmartLink, Mme Siraprapa WATTANAKUL a bénéficié d’une bourse pour un séjour de deux ans en France au sein du laboratoire DISP avant de poursuivre en Thaïlande

5.4. ESTIMATION DE L'ÉTAT FUTUR D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

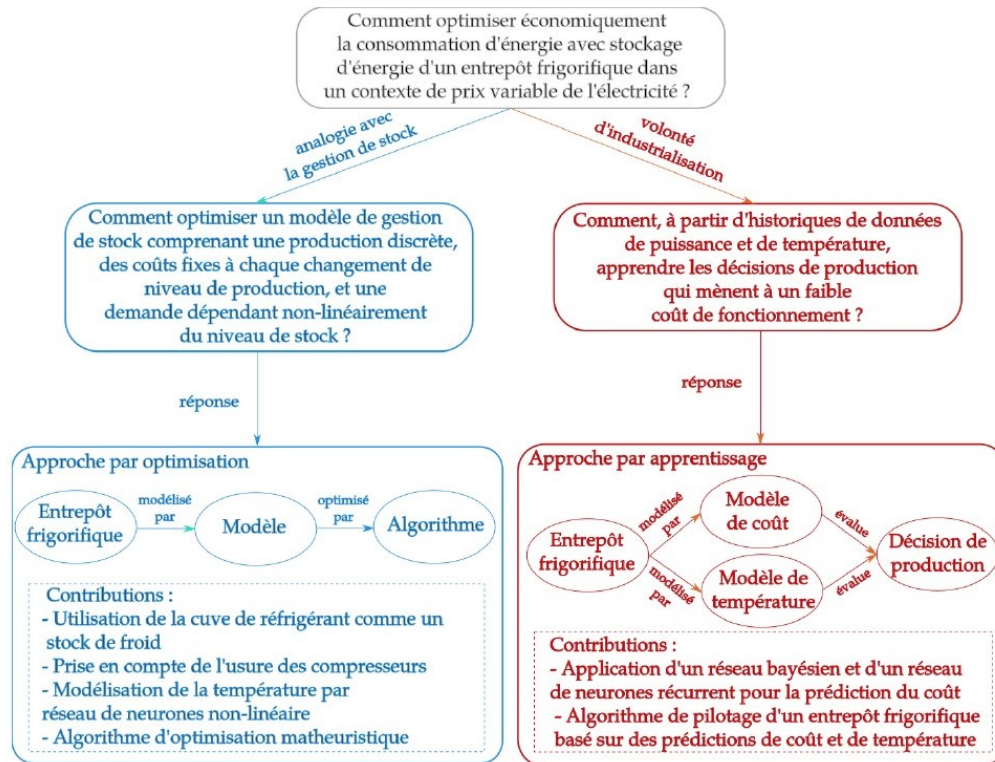


FIGURE 5.27 – Deux approches pour optimiser le coût énergétique d'une chambre froide, par une méthode de recherche opérationnelle ou d'apprentissage.

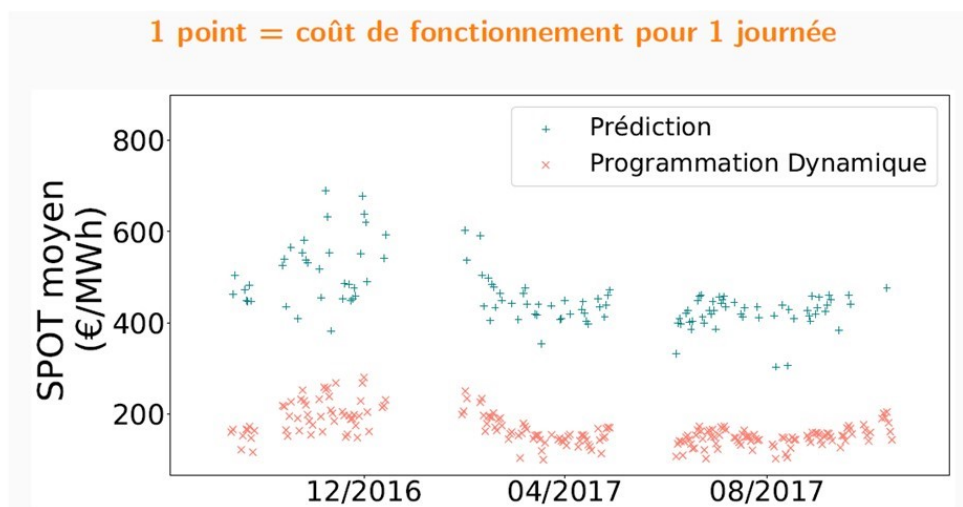


FIGURE 5.28 – Étude comparative des deux approches.

en tant que Lecturer in Software Engineering. La charge de travail associée à ce poste a considérablement ralenti l'avancement de son travail de thèse. Les résultats ont été publiés dans une revue internationale [Wattanakul et al., 2022] et trois conférences internationales [Wattanakul et al., 2017], [Wattanakul et al., 2018], [Wattanakul et al., 2019].

La logistique des ports à conteneurs transfère les conteneurs d'importation, d'exportation et de transbordement entre les accès maritimes et terrestres dans un flux bidirectionnel, en utilisant le même ensemble de ressources portuaires. Ces ressources comprennent l'espace d'accostage, les grues de quai, les camions internes, les grues de parc, les chariots élévateurs à portée (reach stackers) et l'espace de stockage du parc.

Un conteneur est l'élément microscopique exécutant les activités opérationnelles portuaires pour atteindre son

objectif logistique. Lors de chaque activité opérationnelle, un conteneur nécessite une ou plusieurs ressources portuaires pour un déplacement ou un stockage. L'illustration à gauche de la figure 5.29 présente les trois flux interconnectés des conteneurs dans la chaîne des opérations portuaires comme suit :

1. Chargement/déchargement de navires à quai
2. Transfert des quais à la zone de stockage
3. Chargement/déchargement de la zone de stockage aux autres modes de transport terrestre

Le système portuaire est connecté par le partage de ressources, liant de manière interdépendante les trois flux de conteneurs. Lorsqu'une ressource traite un conteneur, les autres conteneurs dans le même flux ou dans un flux connecté doivent attendre. Lorsque la ressource est occupée, la performance des flux de conteneurs connectés est impactée. En particulier, la période pendant laquelle le port est influencé par des facteurs internes et externes. La performance des opérations portuaires est difficile à estimer en raison de l'interdépendance des opérations. Ainsi, l'objectif est de prédire la performance des opérations portuaires sous incertitude. En fonction du planning initial et de l'avancement réel perturbé par les imprévus, le but est d'évaluer la pertinence de maintenir ce planning initial.

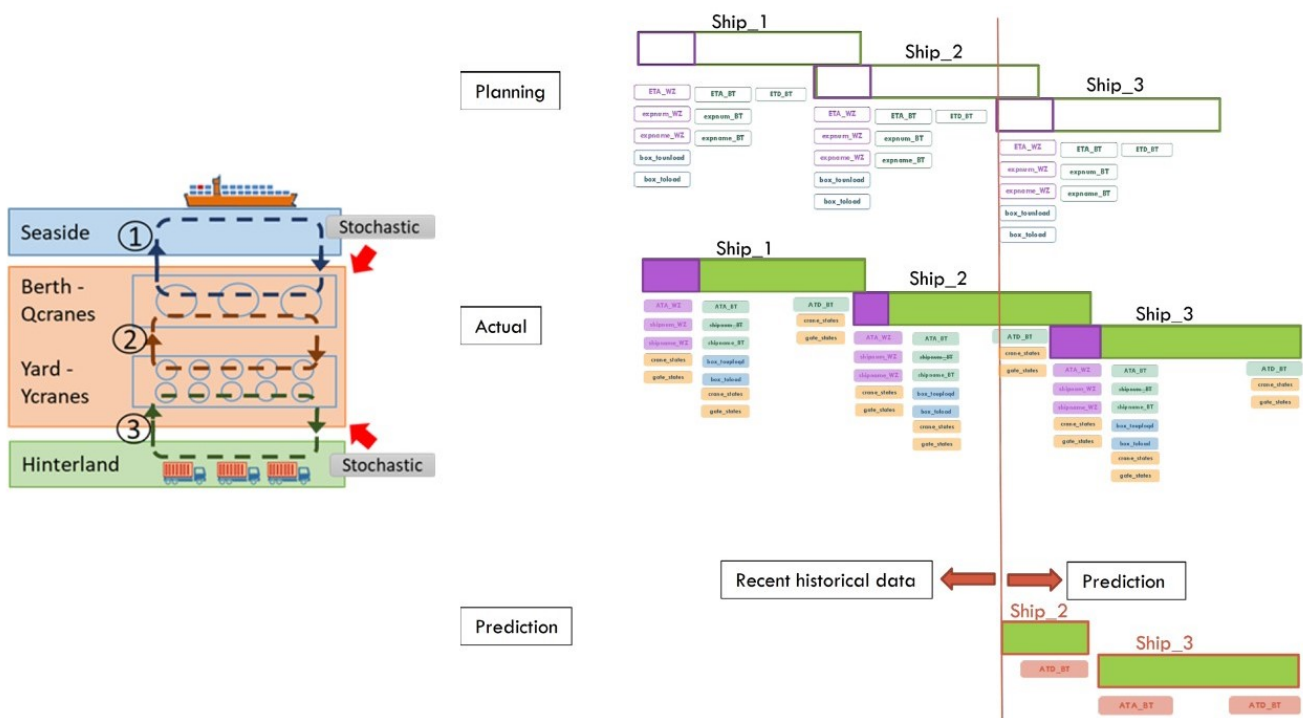


FIGURE 5.29 – Trois flux interconnectés de conteneurs dans un port.

Cette recherche visait à surmonter les limitations et contraintes évoquées ci-dessus en menant des expériences basées sur le cadre conceptuel suivant (figure 5.30). L'objectif principal de ce cadre était de gérer de manière dynamique le flux des connaissances portuaires provenant du système d'activités portuaires sous l'influence d'incertitudes. L'ingénierie des connaissances (KE) a été utilisée pour contrôler le processus de construction des connaissances. Le jumeau numérique (DT) a soutenu la génération des données temporelles synchronisées de toutes les instances d'activités. L'apprentissage automatique (ML) a ensuite transformé les données pour construire les relations entre les instances, représentant ainsi les connaissances du système d'activités portuaires par rapport aux impacts d'une incertitude. Le cas d'utilisation de l'allocation des quais a été réalisé pour la prédiction en utilisant le modèle d'apprentissage automatique basé sur les connaissances. Le temps de déviation par rapport au plan opérationnel initial a été prédit pour soutenir la prise de décision du port. Avec ou sans modifications du plan opérationnel initial, le cadre pouvait capturer en continu les récentes activités portuaires influencées par d'autres incertitudes opérationnelles afin de réaliser des prédictions de manière répétée.

Cette thèse est basée sur le cas d'un port en Thaïlande. Le port est un port de marchandises offrant des services de transport de conteneurs et de vrac. Pour les navires porte-conteneurs, le port dispose de 10 grues de quai sur des quais hybrides de 1 000 mètres pour les navires à moteur et les barges locales, permettant le transfert de 20 à 25 mouvements de conteneurs par heure. Dans le parc, il se compose de 23 blocs avec 24

5.4. ESTIMATION DE L'ÉTAT FUTUR D'UN SYSTÈME PHYSIQUE

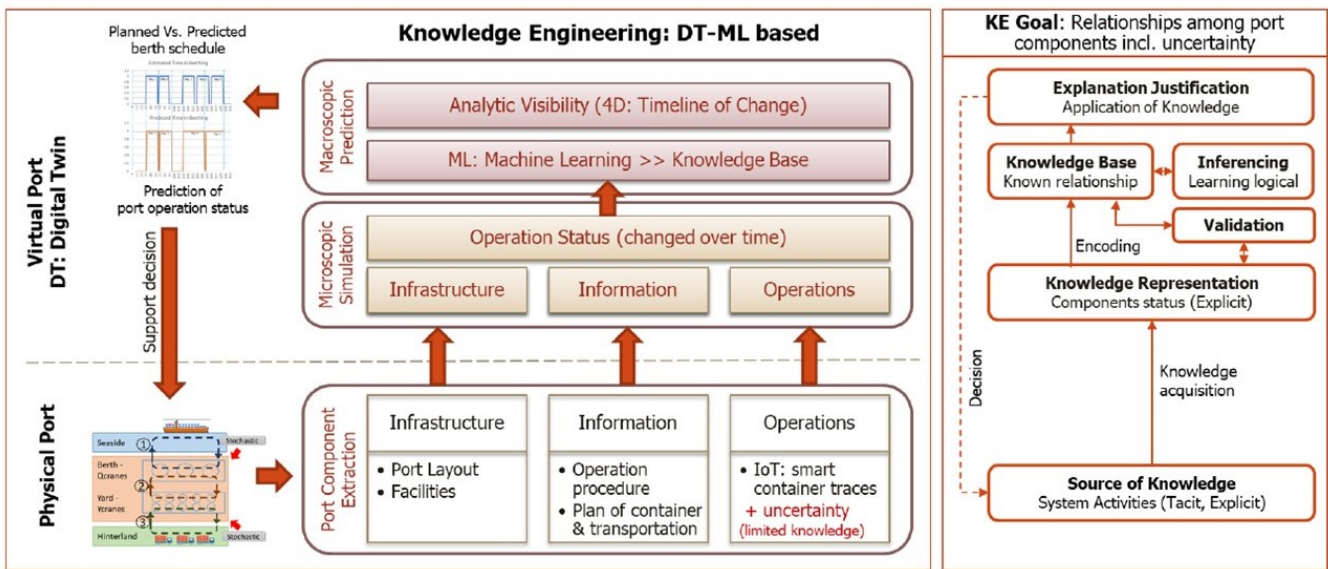


FIGURE 5.30 – Cadre conceptuel.

grues portiques sur pneus (RTG) pour le transfert des conteneurs d'exportation à un taux de 18 mouvements de conteneurs par heure et de 21 blocs avec 25 chariots élévateurs à portée (RS) pour le stockage des conteneurs d'importation. Le port dispose de 131 camions internes pour le transfert des conteneurs entre le quai et le parc via un pont de 3 000 mètres. Côté terrestre, cinq entrées et trois sorties sont prévues pour les camions extérieurs transportant des conteneurs d'exportation. De plus, trois entrées et trois sorties sont réservées pour les camions extérieurs transportant des conteneurs d'importation. Toutes ces informations sur les ressources portuaires et leur performance ont été collectées lors de plusieurs entretiens avec le responsable du port. Cependant, aucune donnée opérationnelle historique n'était disponible. En revanche, les mouvements des navires (date estimée d'arrivée, date réelle d'arrivée, date estimée de départ et date réelle de départ) sont des données accessibles sur Internet. Comme le montre la figure 5.31, les données sont générées à l'aide du logiciel de simulation AnyLogic à partir d'un modèle de port calibré. En effet, les paramètres du modèle de simulation ont été ajustés par corrélation avec les véritables mouvements des navires.

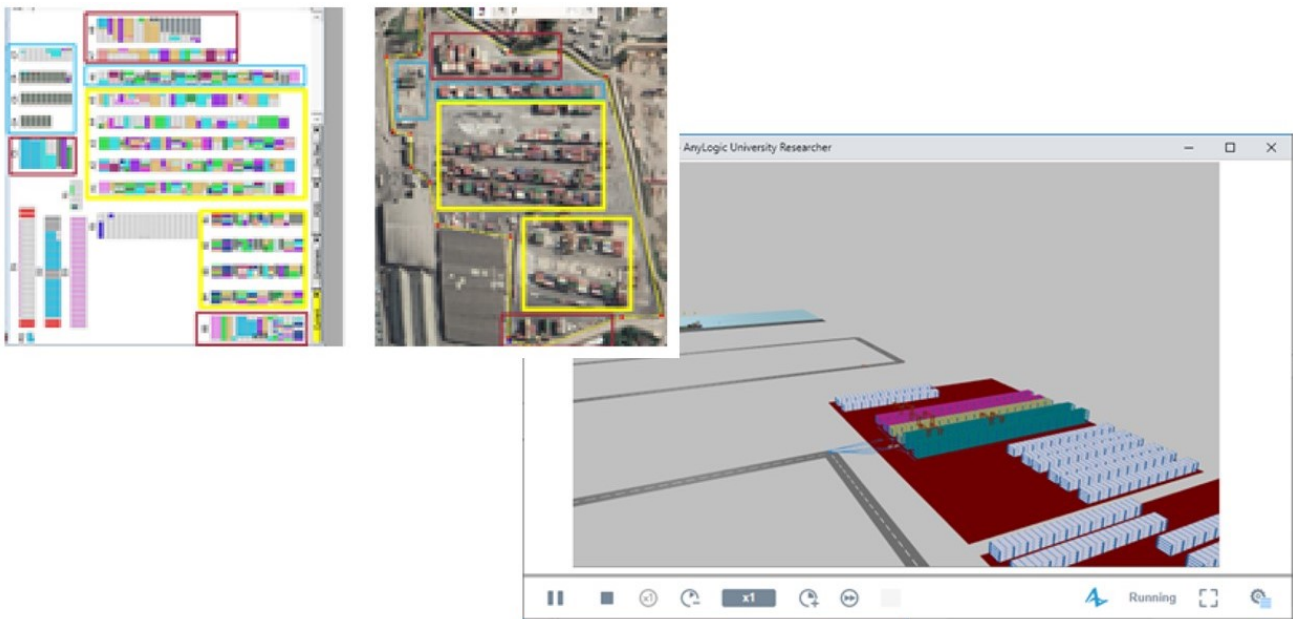


FIGURE 5.31 – Modèle portuaire pour la simulation avec le logiciel AnyLogic.

Pour évaluer la pertinence de maintenir ce planning initial, la dernière étape du cadre proposé est la prédiction. Le réseau neuronal multivarié Long-Short Term Memory (LSTM) présenté dans la figure 5.32 est utilisé pour modéliser l'apprentissage des activités opérationnelles portuaires sous l'influence des changements d'incertitude et ensuite pour prédire la performance de l'opération d'intérêt. Au préalable, l'ensemble de données obtenu à partir de la simulation est transformé afin de le préparer pour l'apprentissage automatique comme inférence du processus opérationnel. L'objectif de l'apprentissage est de construire une base de connaissances des opérations portuaires avec incertitude.

Les expériences sur le modèle de prédiction sont menées dans les buts suivants :

1. Vérifier que l'inférence proposée avec les caractéristiques dérivées des activités opérationnelles portuaires est éligible pour la modélisation prédictive LSTM.
2. Le modèle de prédiction LSTM est capable de prédire l'état de la performance portuaire en utilisant l'ensemble de données du cas réel d'opérations portuaires avec incertitude.
3. Explorer comment le comportement de la prédiction change en fonction de la configuration des étapes MIMO, comme illustré dans la figure 5.32.

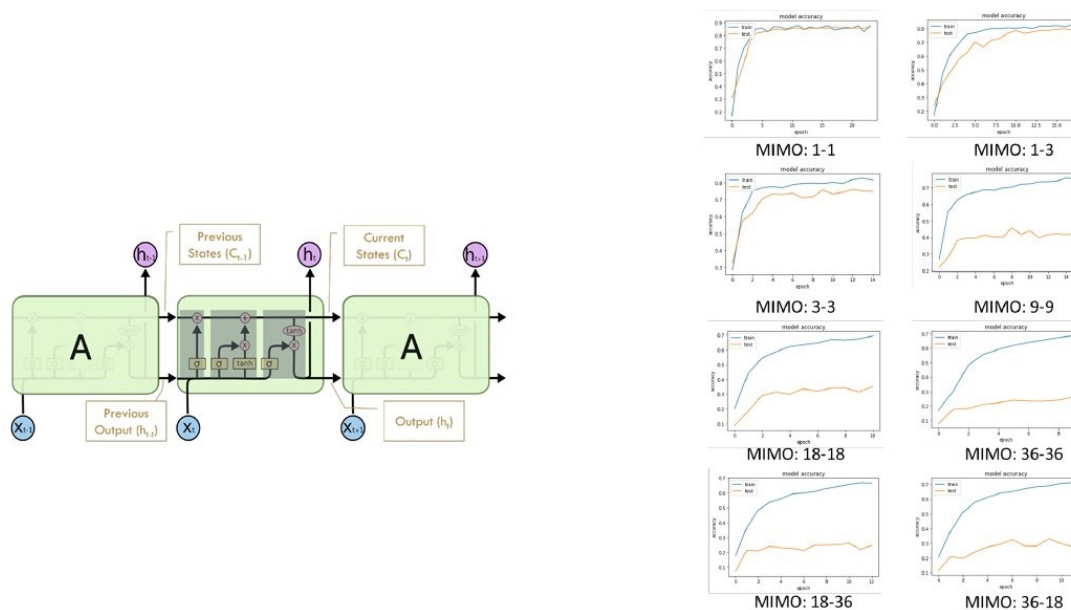


FIGURE 5.32 – Réseau neuronal LSTM et précision du modèle en fonction du nombre d'étapes de 10 minutes pour l'entrée et la sortie.

L'étude pourrait étendre l'expérience à l'ensemble du cycle du jumeau numérique. Cette recherche se concentre sur l'initialisation du modèle de prédiction basé sur les connaissances, en utilisant la simulation pour générer de l'incertitude et en exploitant des données provenant de plusieurs sources. Si les données sont accessibles directement depuis les opérations réelles, l'ensemble du cycle du jumeau numérique, qui effectue la prédiction en temps réel, pourra soutenir le gestionnaire du port.

Avant de conclure ce chapitre et afin d'être exhaustif, deux publications n'ont pas été citées, d'abord la conférence internationale [Henry and Faure, 2003] sur mes travaux de DEA en 2002 au laboratoire LURPA sous la direction du professeur Jean-Marc FAURE, et une seconde conférence internationale [Pietrac et al., 2011] issue de travaux avec deux collègues enseignants-chercheurs sur la formalisation du comportement d'un système MES.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents travaux de recherche menés depuis 2006 et classés en trois catégories. La première section visant à classer les travaux a commencé par préciser les objectifs des fonctions de détection, diagnostic et pronostic au regard de la trajectoire d'un système réel et de son modèle. Les quatre critères de classification ont ensuite été détaillés pour identifier les trois catégories mettant en

5.5. CONCLUSION

exergue notamment les approches, méthodologies et modèles utilisés. Les travaux au sein de chaque classe ont été présentés de manière synthétique en rappelant d'abord leur contexte avec les publications associées avant d'introduire brièvement la problématique, l'approche proposée et un extrait des résultats obtenus. Pour plus de détails sur ces différents travaux, le lecteur pourra se rapporter aux publications citées et aux mémoires des cinq thèses co-encadrées.

Le point commun à l'ensemble des travaux est l'estimation d'état d'un CPPS. La première caractéristique de ces travaux est de considérer comme référence la trajectoire d'un système réel. L'application aux systèmes de production n'est pas sans poser quelques difficultés pour obtenir les données nécessaires. En tant que docteur, mes patients sont des systèmes de production dont les données contiennent le savoir faire de leur propriétaire peu enclin par conséquent à les diffuser ! Une thèse avec une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) reste encore le meilleur cadre pour disposer de ces données.

Les travaux dont ce chapitre a dressé une synthèse ont nourri mes réflexions sur mon projet de recherche présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 6

Projet scientifique

Ce sixième et dernier chapitre est consacré à la présentation du projet scientifique auquel mon activité de recherche sera consacrée. Ce projet est basé sur les compétences en recherche acquises depuis mon DEA en 2001, ma thèse et mes projets passés de recherche avec les encadrements de thèse présentés au chapitre précédent, mais également sur mes compétences scientifiques et technologiques à travers d'une part ma formation initiale m'ayant amené à l'agrégation de mécanique et d'autre part ma formation tout au long de la vie liée à mes enseignements d'automatisme industriel au sens large de l'automatisation de la production (sécurité machine, programmation de contrôleurs industriels type automate ou robot, vision, supervision en pied de machine jusqu'au pilotage de ligne de production).

Même si tout change vite aujourd'hui jusqu'aux concepts scientifiques ayant des durées de vie réduite, la réalité de l'industrie tant économique qui impose le cycle de renouvellement des systèmes de production que l'évolution des compétences humaines amène à considérer que nous sommes bien au début de la quatrième révolution industrielle. Cette lente évolution de l'industrie par comparaison avec les produits de notre vie quotidienne se matérialise par exemple avec la parution en juin 2023 du règlement européen 2023-1230 sur la sécurité machine applicable en janvier 2027 en remplacement de la directive machine parue en 2006 et entrée en application en janvier 2012. Un autre exemple de cette lente évolution est celui des Jumeaux Numériques. Alors que la directive machine de 2006 a autorisé la robotique collaborative, le nouveau règlement ouvre la porte aux technologies de l'industrie 4.0 : IoT, IA, Système autonome en milieu non connu, système auto-apprenant. Alors que le concept de jumeau numérique date du début des années 2000, la dernière publication¹ en 2023 sur ce sujet de l'Alliance pour l'Industrie du Futur (AIF) positionne le concept au début de la pente de consolidation du cycle de Gartner, il est un peu dans le creux de la vague comme illustré sur la figure 6.1.

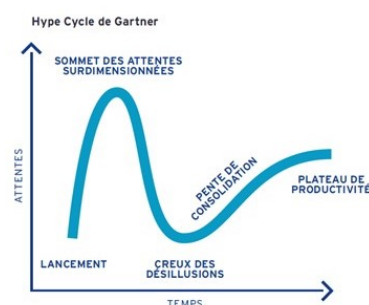


FIGURE 6.1 – Jumeau Numérique, début de l'ascension de la pente de consolidation.

Le cœur du projet scientifique concerne justement ce concept de Jumeau Numérique appliqué aux CPPS. Une définition très informelle de ce concept consiste à considérer qu'un modèle permettant de prédire avec exactitude l'état d'un CPPS serait un jumeau numérique du système réel. Les travaux présentés au chapitre 5 précédent sur l'estimation d'état d'un CPPS sont par conséquent une base indéniable à un projet de recherche sur le jumeau numérique. Ce chapitre commence par introduire et analyser le concept de jumeau numérique avant de s'intéresser à son application au CPPS à travers un ensemble de réflexions. Ces éléments ouvrent la voie à la présentation du

1. Jumeau Numérique, levier majeur de la transformation digitale de l'industrie, mars 2023

coeur du projet de recherche vers une approche centrée ingénierie système et encapsulation pour les JN de CPPS. Sur cette base, une analogie avec le secteur du bâtiment précise un peu plus l'approche proposée jusqu'à proposer une démarche de co-construction de JN basée sur le partage de données entre acteurs permettant d'exploiter la puissance de l'apprentissage automatique. Enfin, la dernière section qui est la plus courte de ce chapitre aborde cependant un sujet majeur, celui d'un modèle de CPS adapté à l'urgence climatique.

6.1 Concept de Jumeau Numérique

6.1.1 Première définition d'un Jumeau Numérique

Derrière le terme jumeau illustré sur la figure 6.2 se cache le rêve d'un jumeau numérique qui serait une réplique exacte de son jumeau physique. Dans ce cas, le comportement des deux jumeaux est identique. D'un point de vue système, cela revient à obtenir la même sortie $Y(t)$ pour chaque jumeau soumis à la même excitation en entrée $X(t)$. Un rêve n'est jamais inatteignable mais force est de constater que nous manquons aujourd'hui de moyens pour capter toutes les données sur le jumeau physique d'un niveau microscopique à un niveau macroscopique. Les phénomènes physiques à la base du comportement de chaque composant relèvent d'abord d'un niveau microscopique comme l'écoulement d'un fluide dans un distributeur, le frottement entre deux pièces dans un vérin, la résistance et le vieillissement des matériaux liée à leur structure moléculaire, le comportement d'un capteur lié à l'effet d'un phénomène physique sur un courant électrique, etc. Au niveau d'un équipement, les modèles peuvent devenir plus précis en intégrant par exemple dans un assemblage la géométrie réelle des pièces à partir d'un scan 3D de chaque pièce. Avec la même démarche, il faudrait également intégrer la position réelle de chaque élément lié par une liaison complète en scannant complètement l'équipement. Sans oublier, le manque d'observation du comportement des opérateurs et de tout ce qui entre physiquement dans un CPPS (consommable, matière, composant, sous-ensemble, emballage, etc). Sur ce dernier point, une solution à terme serait de recevoir du fournisseur le jumeau numérique de tous ces éléments physiques qui entrent en supposant que le transport n'ait pas eu d'impact sur ces éléments ! Au-delà des limites actuelles d'observation de certaines caractéristiques physiques des composants, le coût est également un frein important à cette observation du réel notamment pour les CPPS contrairement à d'autres domaines comme le spatial par exemple. Il est impossible de se soustraire à la réalité économique !



FIGURE 6.2 – Le concept de jumeau numérique, du rêve à la réalité.

Avant que le rêve devienne réalité, nous sommes donc contraints à considérer un jumeau numérique comme ayant un comportement similaire à son jumeau physique. D'un point de vue système, si la réponse du jumeau physique à une excitation $X(t)$ est $Y(t)$, alors la réponse du jumeau numérique à la même excitation $X(t)$ est $Y(t) \pm \epsilon$ comme représenté sur la figure 6.2. L'objectif est alors d'obtenir un ϵ en adéquation avec l'usage souhaité du jumeau numérique, c'est-à-dire un ϵ qui n'impact pas la prise de décision basée sur le jumeau numérique. Par exemple pour la formation des opérateurs, un écart de position de l'ordre du millimètre est certainement sans conséquence sur l'acquisition des compétences alors que ce même écart modifiera considérablement le comportement d'un assemblage mécanique avec un vieillissement totalement différent, voir le comportement d'un capteur. En résumé, la problématique est de pouvoir estimer à $\pm \epsilon$ l'état d'un système réel connaissant les sollicitations auxquelles il est soumis.

Bien évidemment, la représentation proposée figure 6.2 peut surprendre celles et ceux plus habitués à une représentation classique avec des interactions bidirectionnelles entre jumeau physique et jumeau numérique. Pourtant, ces deux représentations ne sont pas contradictoires. La différence entre ces deux représentations est juste liée au temps et au cycle de vie des jumeaux. Après cette première définition et avant de revenir sur ces interactions entre les jumeaux, nous aborderons d'abord l'origine du concept, sa raison d'être et les nombreuses définitions existantes aujourd'hui

6.1.2 Les origines du concept

Comme mentionné dans la synthèse de l'action du GRD MACS «Les Jumeaux Numériques pour les systèmes de production»² lancée fin 2020 pour une durée de deux ans dans laquelle j'ai été impliqué en tant que membre, un premier résultat de cette action a été de montrer la diversité de définition de ce concept, sans véritable consensus. Récemment, [Semeraro et al., 2021] a identifié plus de 30 définitions de ce concept. Pour ne pas augmenter encore le nombre de définitions, la vision de ceux ayant largement contribué à l'émergence du concept de jumeau numérique est reprise ici sur la base de l'article [Grieves and Vickers, 2017]. Plus que donner une définition, cet article vise avant tout à définir le besoin auquel un jumeau numérique doit répondre.

Le concept de jumeau numérique remonte à une présentation à l'Université du Michigan lors d'une formation d'industriels sur la gestion du cycle de vie d'un produit (Product Life Cycle Management - PLM). L'illustration utilisée lors de cette présentation de 2002 est celle en bleu au centre de la figure 6.3.

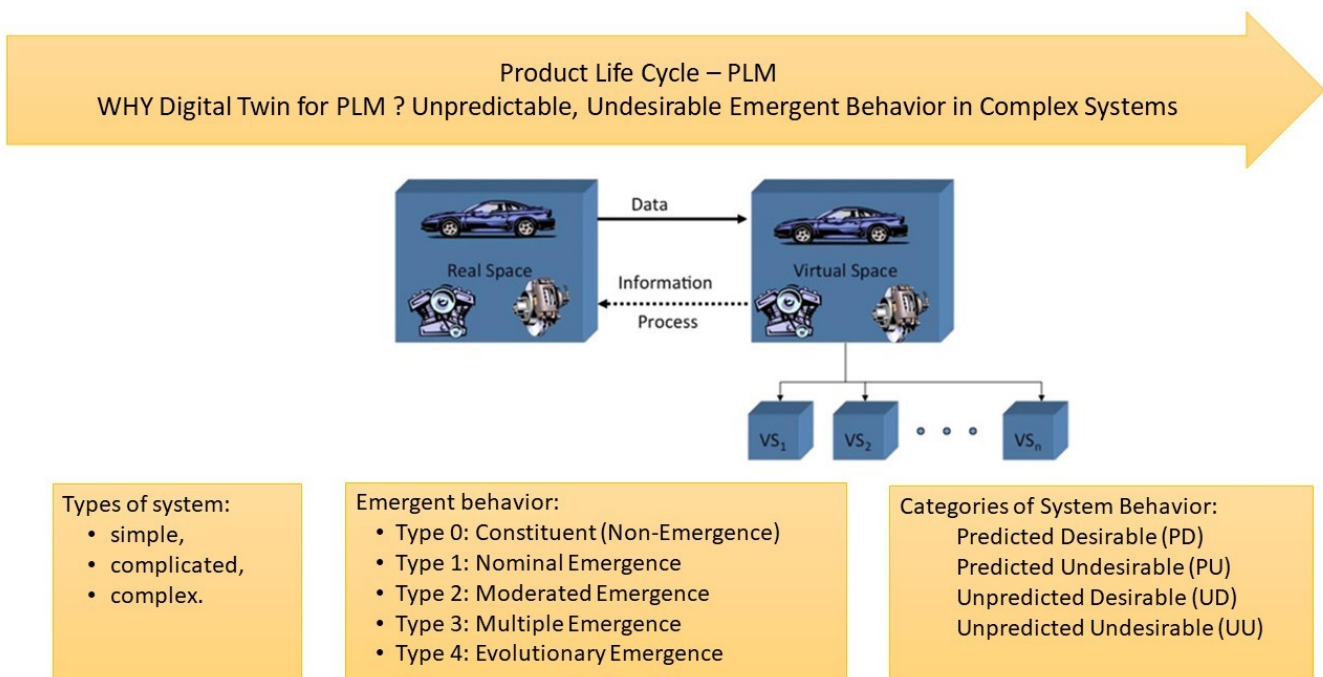


FIGURE 6.3 – De l'origine du concept à la finalité d'un jumeau numérique.

Suite à différentes terminologies visant à caractériser le modèle conceptuel «Mirrored Spaces Model», «Information Mirroring Model», le caractère très descriptif du terme «Digital Twin» a finalement été celui retenu et repris dans un nombre croissant de publications scientifiques, de 404 résultats en 2016 sur Google Scholar à plus de 26 000 pour l'année 2022 pour le terme «Digital Twin». La définition citée dans l'article [Grieves and Vickers, 2017] est la suivante «While the terminology has changed over time, the basic concept of the Digital Twin model has remained fairly stable from its inception in 2002. It is based on the idea that a digital informational construct about a physical system could be created as an entity on its own. This digital information would be a "twin" of the information that was embedded within the physical system itself and be linked with that physical system through the entire lifecycle of the system.»

Au delà de rappeler cette définition, l'article s'intéresse avant tout au besoin auquel un JN doit répondre. Commencer par définir le besoin est essentiel dans une démarche d'ingénierie³. Ce besoin est d'anticiper et limiter l'effet d'un comportement émergent indésirable et imprévisible d'un système complexe. Les systèmes peuvent être classifiés en trois catégories : simple, compliqué et complexe. Les systèmes simples et compliqués sont totalement prévisibles. Des modèles bien définis caractérisent entièrement le comportement de ces systèmes. La différence entre ces systèmes réside seulement dans le nombre de composants. Malgré l'absence d'accord sur le terme «complexe», une caractéristique des systèmes complexes est la difficulté à prédire tous leurs états. Les systèmes complexes comportent un élément de surprise le plus souvent indésirable lié à un comportement émergent im-

2. <https://action-jn.sciencesconf.org/>

3. <http://cdio.org/>

6.1. CONCEPT DE JUMEAU NUMÉRIQUE

prévu. Sur les cinq types de comportement émergent cités sur la figure 6.3, un jumeau numérique vise à apporter une réponse aux quatre premiers dans une approche multi-échelles et multi-physiques trop complexe pour être appréhendé par un expert. Le système n'a pas changé mais nous n'avons tout simplement pas su prédire le problème ! Le dernier type correspond à une modification dynamique du système ce qui soulèverait de graves problèmes de sécurité dans un contexte industriel. Un jumeau numérique vise donc à réduire au maximum les comportements émergents imprévisibles et indésirables. Ces éléments caractérisant le besoin de jumeau numérique sont repris sur la figure 6.3.

Au regard de la définition citée précédemment, l'illustration de 2002 reprise au centre de la figure 6.3 comportait déjà tous les éléments d'un jumeau numérique : l'espace réel, l'espace virtuel, les liens des échanges d'information entre ces deux espaces et les sous-espaces virtuels. Cependant, il manquait un élément essentiel dans cette représentation mais qui était l'objet même de la présentation : la gestion du cycle de vie du produit. Les systèmes virtuels et réels seraient connectés au fur et à mesure que le système passerait par les quatre principales étapes : conception, production, utilisation et fin de vie.

6.1.3 PLM et Jumeau Numérique

Le premier élément essentiel à retenir est donc l'association du concept de jumeau numérique (JN) à la gestion du cycle de vie. La figure 6.4 illustre donc le concept de JN dans le cadre du cycle de vie d'un produit permettant d'introduire les notions de prototype de JN et d'instances de JN. En phase de conception à l'exception de prototypes physiques de moins en moins nombreux, le produit existe uniquement dans l'espace virtuel en tant que prototype de JN. La production qui donne naissance aux produits réels donne simultanément naissance au jumeau numérique de chaque produit. Dès lors, les jumeaux, physique et numérique, sont connectés et le reste jusqu'à la fin de vie du produit réel. Seul l'instance de jumeau numérique (IJN) survie afin de conserver toutes les informations sur la vie du produit. Les informations issues des IJN serviront alors à la conception du prototype de JN de la version suivante ou d'un nouveau produit.

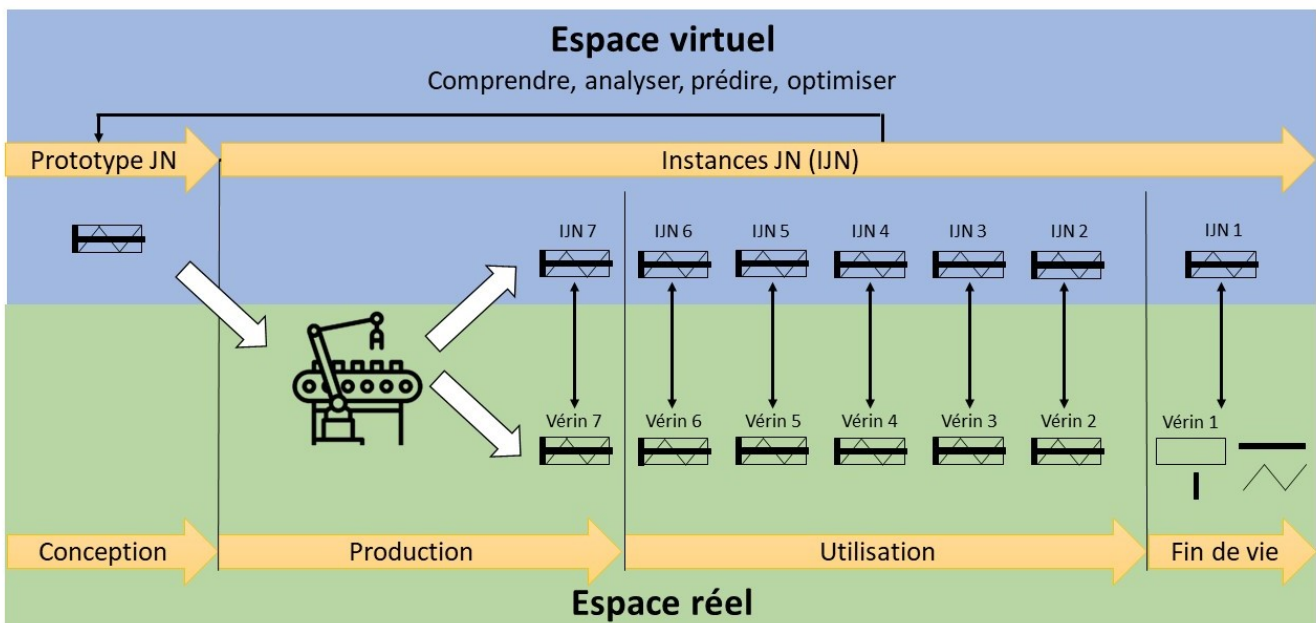


FIGURE 6.4 – Prototype et instances de jumeau numérique.

Dans la continuité du développement de la CAO puis du concept de PLM (Product Life Cycle Management), le concept a émergé pour des produits complexes avec une composante mécanique importante dans les domaines notamment de l'aviation et de l'aérospatiale pour des applications civiles et militaires. Désormais, le concept de JN a été repris dans de nombreux domaines d'applications avec des niveaux différents de maturité dans chaque domaine⁴ :

- Développement rapide : industrie, bâtiment, ville, territoire.

4. AIF - Jumeau Numérique, levier majeur de la transformation digitale de l'industrie

- En cours d'étude : mobilité, télécommunication, port et aéroport, ferroviaire.
- Émergent : santé et médecine, biologie et énergie.

Le développement dans ces différents domaines contribuera sans doute à atteindre l'objectif du concept de CPS de pouvoir coupler des CPS de différents domaines, comme celui de l'énergie avec l'industrie, le bâtiment et la mobilité pour la gestion des réseaux électriques du futur avec des sources distribuées et intermittentes de production.

Suite à cette introduction du concept de jumeau numérique, la section suivante s'intéresse plus particulièrement à l'application au CPPS qui fait aujourd'hui l'objet d'un développement rapide à travers non seulement de nombreux travaux scientifiques mais également de consortiums industriels comme «Industrial Digital Twin Association»⁵.

6.2 Jumeau Numérique de CPPS

6.2.1 Particularité d'un JN de CPPS

Au regard de la vision d'un JN présentée précédemment, la première question est de savoir si un CPPS est un système complexe, c'est à dire un système qui présente des comportements émergents imprévisibles et indésirables. La réponse est potentiellement différente en fonction du niveau considéré : un composant comme un actionneur, une chaîne fonctionnelle constituée de plusieurs composants, un équipement ou une ligne de production, voire de plusieurs lignes de production au sein d'une même chaîne logistique. Au niveau d'un équipement, la finalité des indicateurs de performance tel que le Taux de Rendement de Synthétique (TRS) est justement de mesurer l'impact des comportements émergents imprévisibles et indésirables afin in fine de supprimer ces comportements avec des actions correctives. Un TRS de 99% dès le démarrage d'un équipement est sans doute le rêve de beaucoup d'industriels. Mais malheureusement, il n'y a rien d'exceptionnel à avoir parfois des TRS plus proche des 50% que des 100%. Le TRS étant l'image du temps à fabriquer des produits conformes à la cadence nominale, un TRS de 60% par exemple correspond à 40% de temps de production perdue à cause d'arrêts non planifiés, d'écarts de cadence et de non conformités des produits. Bien évidemment au niveau d'une ligne de production constituée d'un ensemble d'équipements, la complexité peut uniquement croître. Au niveau inférieur d'une chaîne fonctionnelle ou d'un composant comme un actionneur, la réponse est beaucoup plus discutable et dépendante des composants.

Comme évoqué précédemment, les publications scientifiques sont aujourd'hui extrêmement nombreuses concernant les jumeaux numériques et notamment dans le domaine des systèmes de production. L'objectif n'est pas ici de faire une nouvelle analyse de tous ces travaux comme par exemple dans [Liu et al., 2023] mais de mettre en exergue les principales caractéristiques d'un JN de CPPS afin d'introduire le projet scientifique envisagé.

La figure 6.5 illustre les caractéristiques d'une ligne de production et de son JN sur l'ensemble de son cycle de vie :

- Ligne de production bien souvent unique amenant une seule instance de JN.
- Amortissement des coûts de conception et fabrication sur cette seule instance.
- Approche de conception, de fabrication, d'assemblage et de mise en service très différente de celle pour des produits en grande série.
- Une optimisation moins avancée en conception impliquant des modifications très nombreuses en mise en service et en utilisation.
- Un processus de fabrication, assemblage et mise en service basé en grande partie sur l'expertise humaine. Un pilotage extrêmement faible de ces activités par un système cyber avec une très faible observation.
- Un passage du prototype à l'instance de JN imposant alors une activité non automatisée de calibration à $\pm\epsilon$ de l'instance du JN par rapport à l'espace réel.
- Des maintenances curatives et préventives modifiant l'espace réel impliquant une nouvelle activité de calibration à $\pm\epsilon$ du JN. Ces maintenances surviennent indépendamment du JN et donc sans action de l'espace virtuel sur l'espace réel.
- Des évolutions des produits, des actions d'amélioration et des maintenances prédictives modifiant l'espace réel conformément aux prescriptions du jumeau numérique mais des opérations de modification "sur mesure" non automatisée avec une intervention humaine impliquant une nouvelle activité de calibration à $\pm\epsilon$ du JN.
- Des opérations de fin vie non automatisée et donc non pilotées par un système cyber, avec nécessairement une forte implication humaine, dans le pilotage comme dans la réalisation des opérations.
- Un processus automatisable d'échange des données de l'espace virtuel à l'espace réel, mais un processus de l'espace réel à l'espace virtuel beaucoup plus délicat à gérer.

5. <https://industrialdigitaltwin.org/en/>

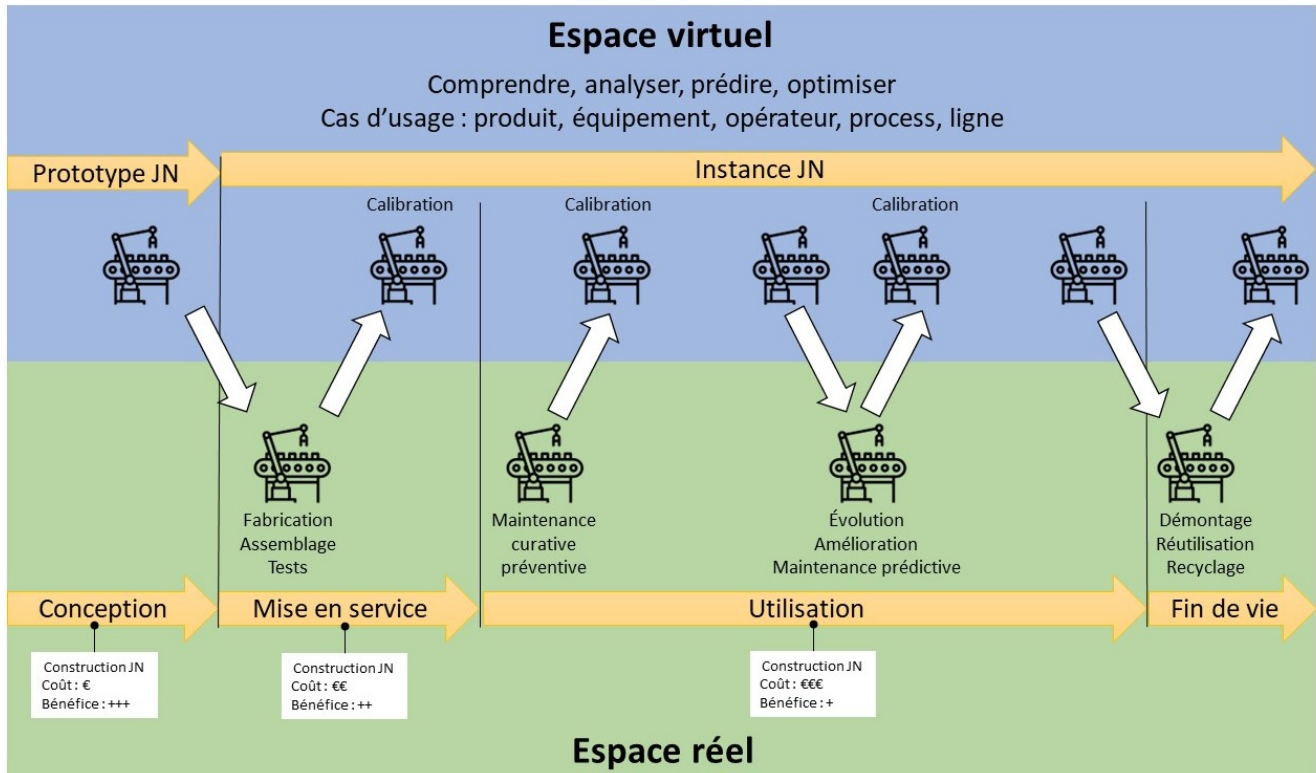


FIGURE 6.5 – Cycle de vie d'un CPPS et interactions avec son jumeau numérique.

Nous retrouvons bien dans la figure 6.5 les échanges bidirectionnels entre espace virtuel et espace réel conformément à la définition d'un jumeau numérique et sans contradiction avec la définition proposée au début de ce chapitre. En revanche, cette figure apporte un éclairage sur la nature et la fréquence de ces échanges qui ne sont pas du même ordre que ceux du système cyber du CPPS avec le système physique.

6.2.2 Coût et bénéfice d'un JN de CPPS

Associée à chaque étape du cycle de vie dans l'espace réel sur la figure 6.5, une estimation du coût et du bénéfice de construction d'un JN est proposée. Le développement du JN intégré à la phase de conception aura un coût limité si l'approche de conception est suffisamment formalisée, supportée par un système d'information et en intégrant cette dimension JN. Le bénéfice d'une construction au plus tôt du JN sera lui très important car le prototype de JN nourrira la conception réduisant les modifications ultérieures en mise en service et en utilisation. Plus une modification a lieu tôt dans le cycle de vie moins elle est coûteuse. De plus, le JN sera prêt pour la phase de mise en service faisant l'objet du projet ANR DT4CPS porté par le laboratoire CRESTIC, tant en amont pour la mise en service virtuelle (virtual commissioning), qu'en aval pour la première calibration du JN avant le démarrage de la production. Enfin, le JN sera opérationnel dès les premières pièces produites permettant très tôt de profiter des usages du JN mais également de nourrir le JN pour ajuster si nécessaire sa calibration.

La construction de l'instance de JN durant la phase de mise en service demandera un effort plus important pour collecter toutes les données de conception et passer sans préparation en amont des modèles de conception, quand ils existent, aux modèles pour le JN. Le JN sera prêt au mieux au début de la production mais il ne profitera pas à la conception ni même à la mise en service.

Enfin, le développement du JN en cours de production verra son coût augmenté par la nécessité de collecter, en plus des données de conception et de mise en service dont les traces sont parfois difficiles à retrouver, toutes les données sur les modifications réalisées depuis le début de l'utilisation du système de production. Par ailleurs, le bénéfice sera restreint à la phase d'utilisation du CPPS. Une ligne de production ne se change pas comme on change de smartphone à chaque nouveau modèle ou de voiture après trois ans de location. Toute la difficulté est donc là aujourd'hui avec des systèmes de production existants pour lesquels le rapport bénéfice/coût d'un JN ne justifie pas nécessairement d'investir dans cette technologie pour un industriel. Mais même dans un cas idéal, la conception d'une nouvelle ligne de production manque encore aujourd'hui de vision globale, de formalisation et de

système d'information support du niveau microscopique au niveau macroscopique. Les informations fournies lors de la livraison d'un équipement de production suffisent à illustrer ce propos. Des plans mécaniques, électriques et pneumatiques standardisés sont la seule exigence du client en terme d'informations formalisées. Toutes les autres informations sont sous forme de texte et parfois d'illustration sans lien formel avec les plans fournis. C'est comme si le fonctionnement du CPPS dépendait exclusivement du système physique ! Tout cela est très loin d'être suffisant pour construire un JN. Cette focalisation sur la formalisation uniquement du système physique est aussi source de divergence sur ce que couvre un JN. Doit-il intégrer les contrôleurs voir le système MES⁶ de pilotage de la ligne de production ?

6.2.3 JN associé à chaque niveau de CPPS

Afin de répondre à cette question et conformément à la définition d'un JN donnée au début de ce chapitre, l'identification de l'entrée $X(t)$ et de la sortie $Y(t) \pm \epsilon$ de son JN et par conséquent les éléments constitutifs du JN. Sur la figure 6.6, cette analyse est proposée pour un actionneur, une chaîne fonctionnelle, un équipement et une ligne de production.

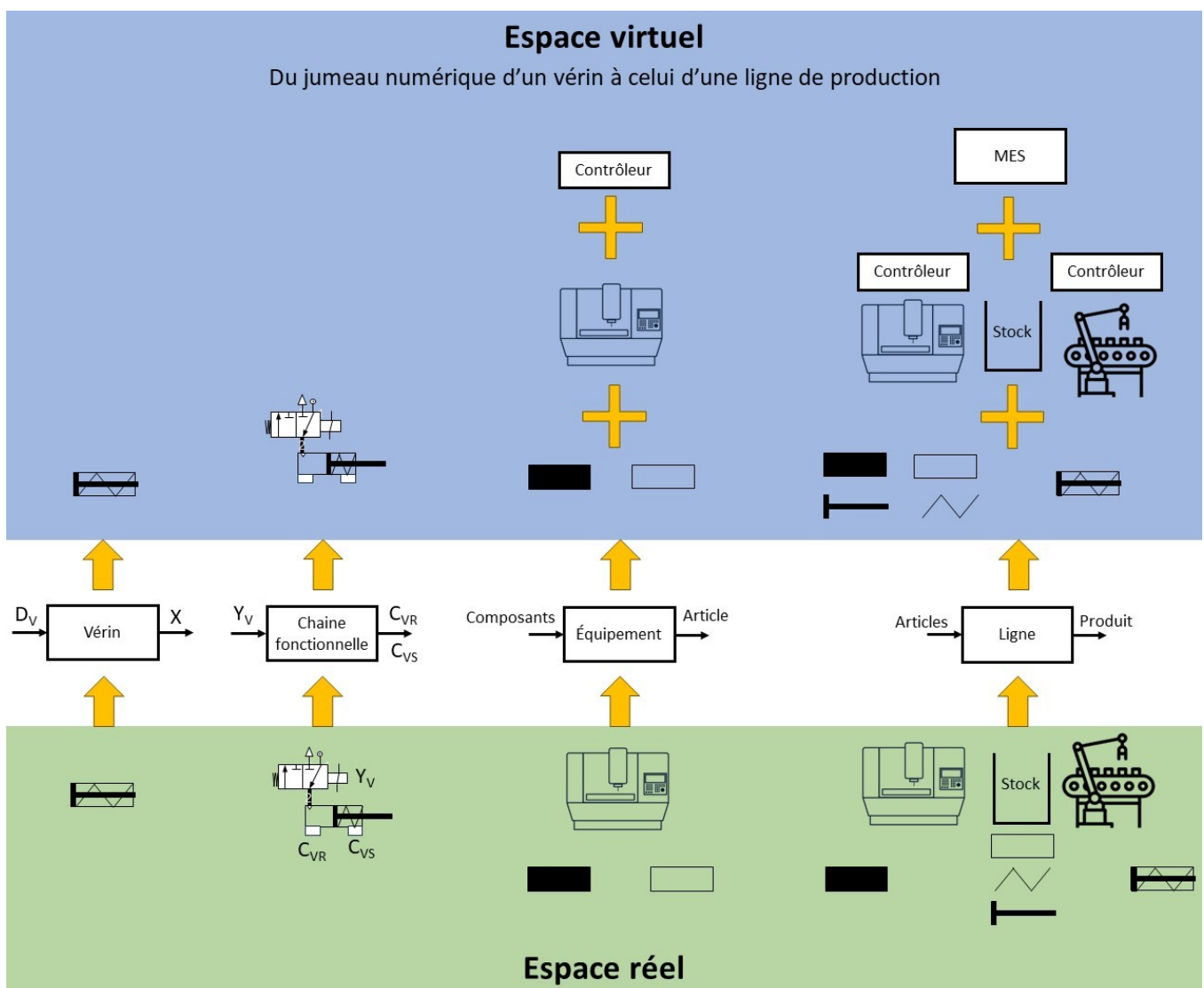


FIGURE 6.6 – Jumeaux numériques de CPPS à différents niveaux.

Nous nous attarderons pas sur le vérin ni sur la chaîne fonctionnelle associée. En revanche d'un point de vue

6. Manufacturing Execution System, également nommé Manufacturing Operation management

système pour un équipement au sein d'une ligne de production, l'entrée sera un composant correspond par exemple à un brut d'usinage et la sortie un article correspond par exemple au corps d'un vérin usiné. Le JN de cet équipement au sein d'une ligne de production doit donc avoir la même entrée et la même sortie à $\pm\epsilon$. Cette tolérance de $\pm\epsilon$ correspond bien évidemment à une tolérance géométrique du corps du vérin mais également à une tolérance sur le temps d'usinage, l'usure des outils, l'usure de la machine, etc. Pour que le JN de l'équipement soit l'image de cette opération de production, ce JN doit donc intégrer le système physique et cyber de l'équipement avec le composant en entrée et l'article en sortie. Un JN qui correspondrait uniquement à la partie physique intéresserait peut-être les spécialistes de la CFAO⁷ ! Sur la base du même raisonnement, une ligne de production constituée de deux poste et d'un stock a en entrée différents composants (corps brut avant usinage, ressort, sous-ensemble tige et piston) et en sortie un vérin assemblé. Le JN de cette ligne doit intégrer le système de pilotage de la ligne afin de pouvoir exécuter des ordres de fabrication et produire des vérins avec des performances similaires à la ligne réelle. Sans cela, le JN serait incapable de prédire les performances de la ligne de production avec un ϵ acceptable. Il ne s'agit pas là de calculer un ordonnancement optimale que les conditions réelles rendront extrêmement difficile à appliquer mais bien d'avoir dans l'espace virtuel une ligne qui produise des vérins virtuels. Si intégrer le système cyber d'un CPPS au jumeau numérique semble être au premier abord extrêmement simple avec la virtualisation, cela est un peu plus difficile en y regardant de plus près. En effet si les modèles de systèmes physiques sont prévus pour fonctionner à une échelle de temps différents du temps réel (accélérer, ralentir), la virtualisation des systèmes cybers n'offre pas cette possibilité et tous les efforts sont au contraire portés sur une virtualisation avec un comportement temporel au plus proche du comportement réel (émulateur de contrôleur de robot, émulateur d'API⁸). Un autre exemple est celui des MES prévus uniquement pour fonctionner à l'échelle réelle du temps. Un JN complet d'un équipement et d'une ligne de production nécessitera de considérer des échelles de temps différentes.

Notons qu'il manque dans la représentation de la figure 6.6, les déchets en sortie et les consommables en entrée (huile de coupe et outillage).

6.2.4 Place de l'humain dans un JN

En l'absence également de consensus sur la place de l'humain au sein d'un JN qui avait l'objet du premier atelier «Quelle est la place de l'humain dans le Jumeau Numérique ?» de l'action citée précédemment sur le JN du GDR MACS, ce point est discuté avant de conclure cette section sur la définition d'un JN de CPPS. Pour cette réflexion, deux systèmes dans deux domaines très différents d'application sont représentés sur la figure 6.7 : un équipement de production avec l'opérateur de conduite et un avion de combat avec le pilote.

L'opérateur et l'équipement de production permettent au sein d'une ligne de production de réaliser une opération (fabrication, assemblage, contrôle, logistique). Cette opération est entièrement définie au préalable dans les moindres détails tant du point de vue des effets sur le produit que de la manière de procéder. En fonctionnement normal, l'opérateur de conduite doit d'abord se conformer à une procédure et n'a pas vocation à prendre des décisions qui pourraient perturber le poste considéré voir la ligne de production. Au regard de ces éléments et avec la même démarche d'analyse que précédemment en adoptant un point de vue système, il semble cohérent d'intégrer l'opérateur dans le JN d'une ressource globale de production apte à réaliser des opérations de production. L'intérêt de cette intégration dans le JN des opérateurs de conduite est d'évaluer l'impact sur les performances du CPPS de leur comportement "humain", à condition bien évidemment de pouvoir formaliser un JN d'opérateur. Nous reviendrons sur ce point dans la suite de ce chapitre.

La trajectoire exacte de l'avion permettant de remplir une mission dépendra fortement d'éléments extérieurs survenant au cours de la mission et face auxquels le pilote adaptera la trajectoire de l'avion et prendra seule des décisions dans des délais extrêmement courts. Les très fortes incertitudes sur les éléments extérieurs pouvant survenir durant le vol et le processus décisionnel en temps réel d'un pilote qui différencie le "bon" pilote du pilote "exceptionnelle" rendent la création d'un JN avec le pilote extrêmement complexe et finalement peu utile. Le manque de consensus sur la place de l'humain dans le jumeau numérique mérite d'aborder la question en fonction des interactions de l'humain avec le système et de son rôle.

En synthèse et comme mentionné par l'Alliance pour l'Industrie du Futur (AIF) dans sa publication sur le JN cette année⁹, un système doit répondre à trois critères à la fois pour être qualifié de jumeau numérique :

1. Un jumeau numérique est un ensemble organisé de modèles numériques représentant une entité du monde réel pour répondre à des problématiques et des usages spécifiques.

7. Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur

8. Automate Programmable Industriel

9. AIF - Jumeau Numérique, levier majeur de la transformation digitale de l'industrie

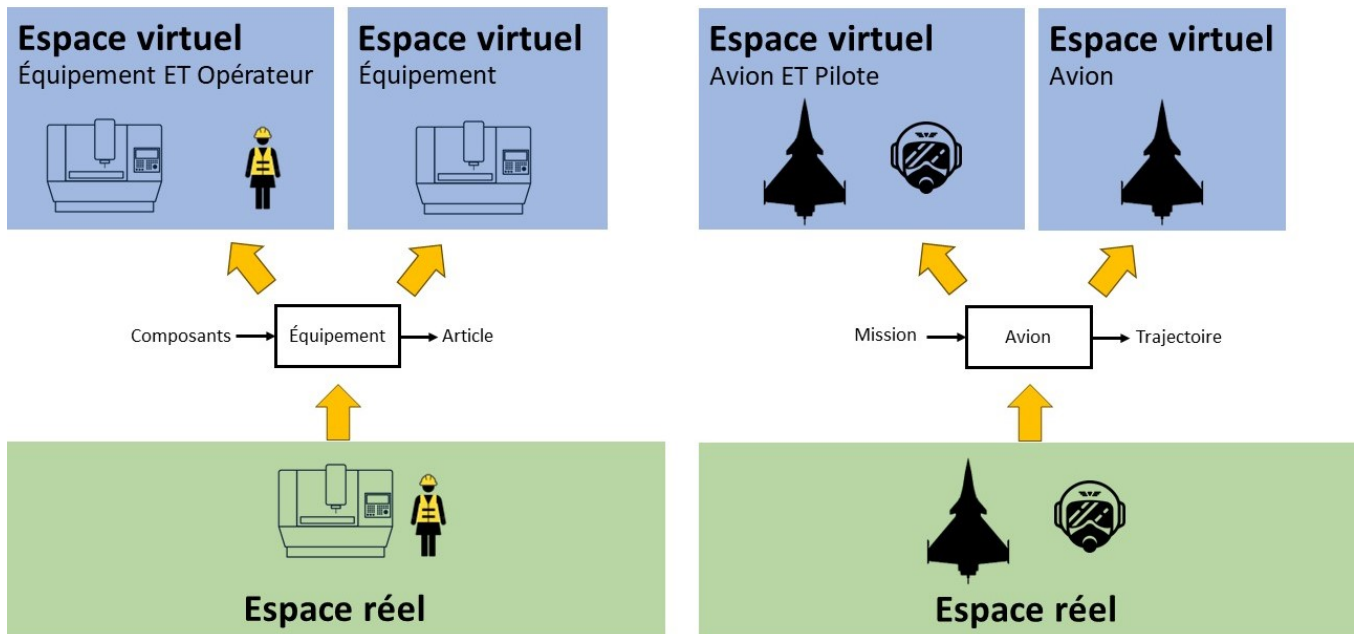


FIGURE 6.7 – Système et place de l'humain dans le jumeau numérique.

2. Le Jumeau Numérique est mis à jour par rapport au réel à une fréquence et une précision adaptées à ses problématiques et à ses usages.
3. Le jumeau numérique est doté d'outils d'exploitation avancés permettant notamment de : comprendre, analyser, prédire et optimiser.

Le concept de Jumeau Numérique se caractérise donc dans un contexte de cycle de vie de l'actif considéré avec des interactions bidirectionnelles entre espaces réel et virtuel, et des modèles multi-échelles et multi-physiques formalisant un comportement à $Y(t) \pm \epsilon$ acceptable pour la prise de décision. Sur la base de cette définition, la section suivante aborde la question de la construction d'un JN au plus tôt dans le cycle de vie du système.

6.3 JN de CPPS, vers une approche centrée ingénierie système et encapsulation

6.3.1 Une approche multi-échelles

Un JN d'une ligne de production doit être multi-échelles et multi-physiques afin d'approcher au mieux le comportement réel. Dans l'analyse proposée de [Liu et al., 2023] des travaux existant sur le JN, une classification à trois niveaux est proposée : équipement, ligne de production (système) et inter-lignes de production (système de système). Cependant en premier lieu, l'architecture d'un JN a besoin de formaliser les relations entre ces niveaux et de capter le comportement des entités du niveau microscopique au niveau macroscopique comme le mention [Grieves and Vickers, 2017]. Un équipement est déjà un système composé de nombreux composants basés sur des phénomènes physiques différents (mécanique, électrique, pneumatique, hydraulique) à l'origine du comportement de l'équipement et en particulier de ces comportements indésirables et imprévisibles que le JN doit mettre en exergue. Le comportement de l'équipement ne peut donc pas être dissocié de celui de ses composants regroupés au sein de chaînes fonctionnelles¹⁰. Construire un JN à partir du niveau équipement reviendrait à construire un JN d'une maison sans ses fondations ne permettant pas d'expliquer l'apparition de fissures lors de période sécheresse. L'approche proposée vise donc à construire progressivement un JN d'une ligne de production à partir de ses composants élémentaires en passant par deux niveaux intermédiaires d'agrégation : la chaîne fonctionnelle et l'équipement.

¹⁰. Une chaîne fonctionnelle est un sous-ensemble d'un système technique. Elle permet de réaliser une des fonctions élémentaires participant à la réalisation de la fonction globale du système.

6.3.2 Des briques élémentaires multi-physiques

La figure 6.8 illustre la construction du JN d'une chaîne fonctionnelle par agrégation des JN de ces composants avec une vision système permettant de formaliser les interactions entre les composants eux-mêmes et le niveau supérieur.

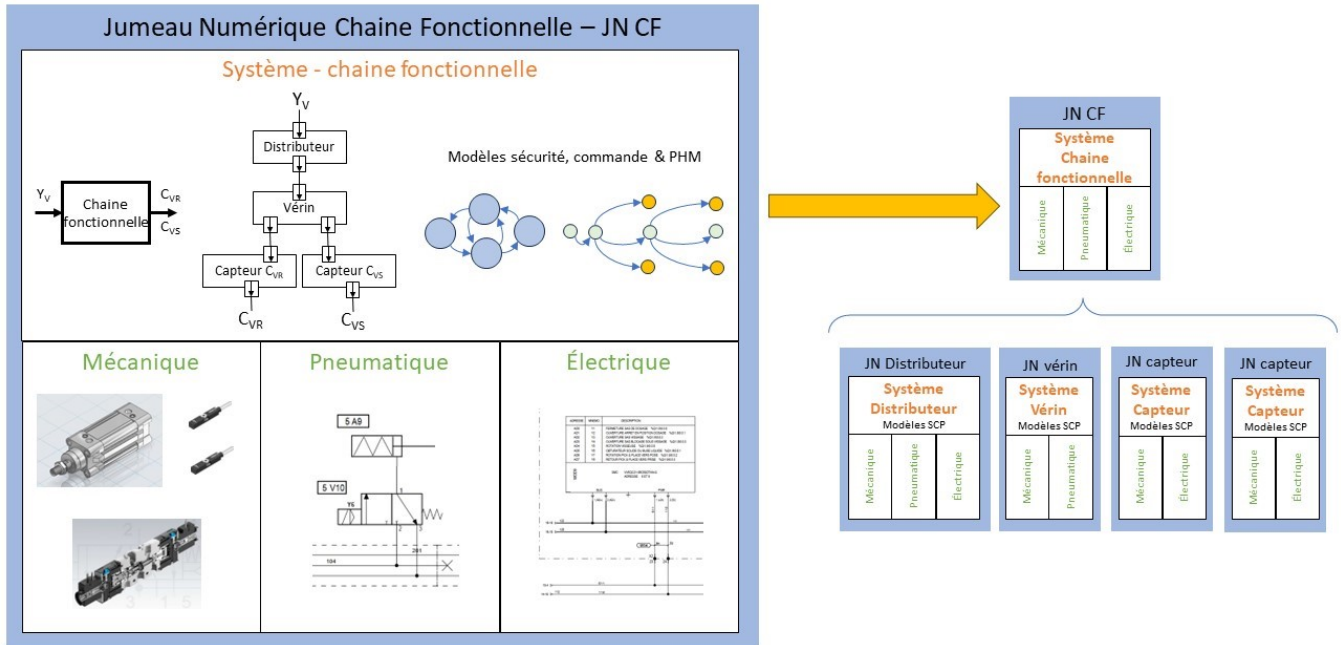


FIGURE 6.8 – Jumeau numérique d'une chaîne fonctionnelle centré ingénierie système et encapsulation.

L'exemple d'une chaîne fonctionnelle est caractéristique de la situation industrielle actuelle où chaque composant apparaîtra dans des représentations différentes (mécanique, électrique, pneumatique) mais l'entité chaîne fonctionnelle apparaîtra dans aucune représentation en tant que système laissant à la charge des experts d'avoir cette connaissance et de l'exploiter pour définir le fonctionnement de la chaîne fonctionnelle utilisé dans un équipement. Cette représentation système d'une chaîne fonctionnelle doit permettre de formaliser les interactions entre ces composants et le comportement de la chaîne fonctionnelle. Ce comportement intégrerait toutes les facettes de la chaîne fonctionnelle à travers des modèles pour la commande et la gestion de son état de santé - PHM¹¹ (détection, diagnostic, pronostic avec des modèles de vieillissement et de dysfonctionnement basé sur des données de commande et PHM de ces composants, etc). Pour cela chaque composant doit lui même disposer de son JN intégrant une représentation système et des représentations technologiques (mécanique, électrique, pneumatique, hydraulique, thermique, etc) intégrant toutes les données sur leur fonctionnement dans son ensemble connu par le fournisseur. Bien que cette première proposition puisse paraître simpliste, elle n'en demeure pas essentielle pour la construction d'un JN d'équipement et surtout totalement inexistante dans les pratiques industrielles actuelles et notamment chez les fabricants de machines en l'absence d'un standard pour représenter ce comportement. En effet, il est tout de même surprenant qu'un équipement soit aujourd'hui livré avec des schémas (mécanique, électrique, pneumatique) mais sans aucune description formelle du comportement des composants et des chaînes fonctionnelles. La conséquence de cette situation est le «grand saut» évoqué précédemment des automaticiens qui au mieux livrent une spécification du comportement globale de l'équipement mais sans relation formelle avec le comportement des composants, charge au suivant de les retrouver. En revanche, le JN de l'équipement a besoin de ces relations pour intégrer toutes les informations sur l'équipement et approcher de son comportement réel et offrir des outils d'exploitation avancés.

6.3.3 Un niveau charnière, la ressource de production

Ces premières briques de base pourraient ensuite être assemblées afin de constituer un JN d'une ressource de production représenté sur la figure 6.9

11. Prognostic Health Management

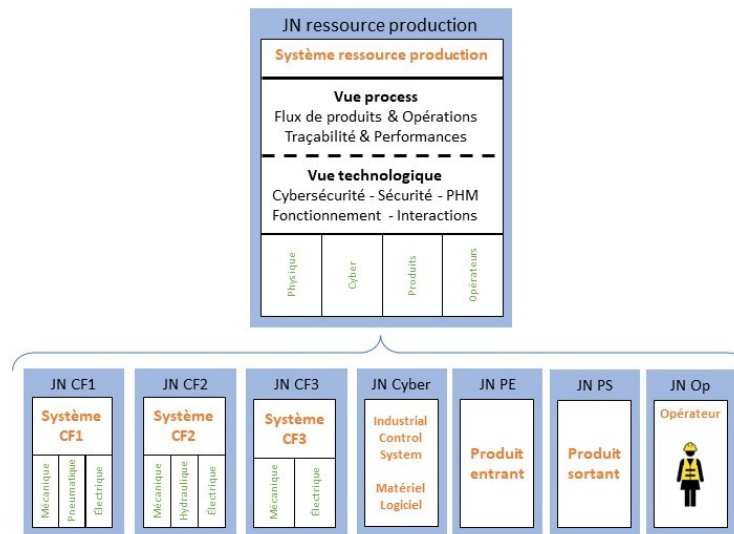


FIGURE 6.9 – Jumeau numérique d’une ressource de production centré ingénierie système et encapsulation.

Comme évoqué au chapitre 4 concernant l’architecture physique d’un CPPS, la particularité d’un équipement est sa capacité à réaliser une opération de production contrairement au niveau inférieur. Cependant, un JN d’un équipement seul avec ses chaînes fonctionnelle ne permet pas de reproduire dans l’espace virtuel un opération de production (fabrication, contrôle, assemblage, logistique) qui nécessite un opérateur de conduite, des articles entrant, des articles sortant et un équipement composé d’un système cyber et d’un système physique basé sur plusieurs chaînes fonctionnelles. Tous ces éléments doivent avoir leur JN intégrés dans celui d’une ressource de production. D’un point de vue système, un JN de ressource de production comporterait deux vues liées entre elles : technologique et process. La vue technologique intégrerait les modèles de cybersécurité, de sécurité machine, de PHM, de fonctionnement avec les interactions entre les entités constituant la ressource de production. Sur la base de cette vue technologique, la vue process représenterait l’usage attendu de cette ressource à travers les opérations disponibles, le flux de produits générés avec les éléments associés de traçabilité et de performance. Le JN d’une ressource de production pourrait alors produire dans l’espace virtuel à des échelles différentes de temps et avoir ses propres performances mesurées avec les mêmes indicateurs que dans l’espace réel. A titre d’exemple, la vue process d’une ressource de production ressemblerait aux modèles utilisés en simulation à évènements discrets.

6.3.4 Finalité, la gestion de production

Enfin, le JN d’une ligne de production serait basé sur l’agrégation de JN de ressource de production avec celui du système de pilotage de la ligne (MES) et des produits entrants et sortants de la ligne comme représenté sur le figure 6.10.

D’un point de vue système, le JN de ligne comporterait également deux vues liées entre elles : process et gestion de production. La vue process intégrerait les interactions entre les JN constituants la ligne. La vue gestion de production modéliserait le fonctionnement prévue de la ligne avec son système de pilotage permettant d’intégrer les données associés aux produits, notamment la nomenclature, et celles associées au travail à exécuter, i.e. les ordres de fabrication. Enfin toujours dans l’espace virtuel, cette vue fournirait les informations de suivi de production sur l’état d’avancement des OF et la traçabilité des produits.

6.3.5 JN d’un système de production et ses usages

L’ensemble des JN interconnectés et regroupés dans un même espace virtuel représentés sur la figure 6.11 formerait le JN d’un système de production sur lequel les différents usages seraient basés. L’ensemble des données facilement accessibles dans l’espace virtuel n’imposerait plus à ces usages d’être contraint par l’architecture de commande dans l’espace réel. Les différents usage de ce JN global impliquent de synchroniser temporellement ou au contraire de désynchroniser les espaces, réel et virtuel :

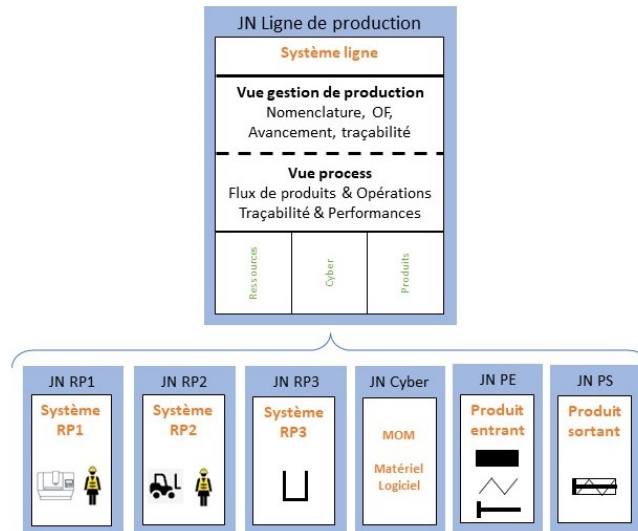


FIGURE 6.10 – Jumeau numérique d’une ligne centré ingénierie système et encapsulation.

- Pour explorer le passé et mener des diagnostics avec l’historique des données de l’espace réel, le JN se trouverait à un instant antérieur au jumeau physique (JP).
- Pour surveiller l’état présent du JP et détecter d’éventuelles dérives, le JN serait temporellement synchronisé avec le JP.
- Pour explorer le futur et prédire les performances du JP, le JN serait en avance sur le JP.
- Pour former des opérateurs de conduite, le JN serait déconnecté du JP.

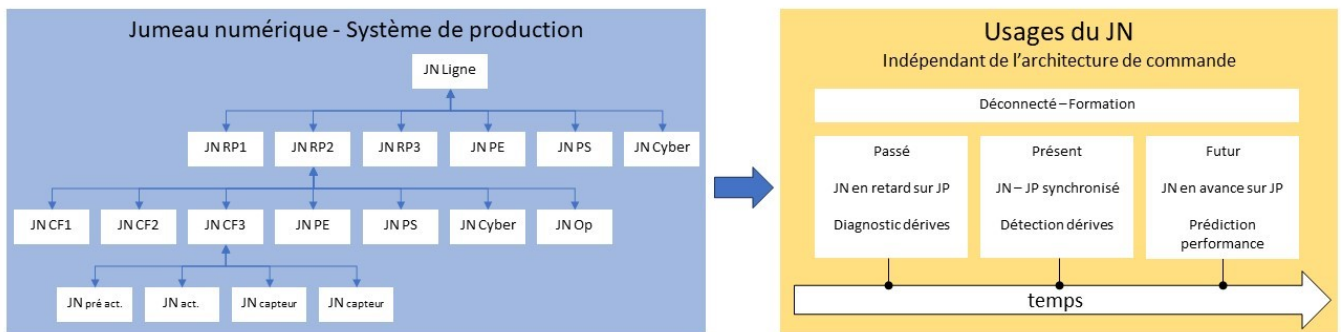


FIGURE 6.11 – Jumeau numérique d’un système de production et ses usages.

En plus du problème de synchronisation comportementale des deux JN à travers les calibrations évoqués précédemment, il y a un problème sous-jacent de gestion de ces différentes instances d’un même JN fonctionnant à des moments différents.

Définir un cadre de construction d’un JN est essentiel pour aboutir à un comportement dans l’espace virtuel similaire à celui dans l’espace réel en collectant et structurant toutes les données sur le CPPS en premier lieu au cours de sa conception extrêmement riche en données. Ce cadre doit aussi permettre de capter les données liées aux nombreuses modifications que le CPPS subira au cours de sa vie, de sa mise en service à sa fin de vie. Accélérer la construction d’un JN et réduire les coûts associés est envisageable à condition de capitaliser et partager des structures génériques de JN voir des JN complets d’éléments standards. Un très grand acteur pourra éventuellement définir ses standards et des bibliothèques de JN partagées en interne mais cela sera toujours moins efficient dans le temps qu’un partage entre acteurs. Cette problématique est abordée dans les deux sections suivantes en commençant par un parallèle entre CPPS et bâtiment pour la gestion du cycle de vie de ses systèmes.

6.4 CPPS et Bâtiment, un cycle de vie similaire

6.4.1 CPPS et produit mécanique, une histoire commune mais des différences.

L'essor de la CAO¹² en mécanique dans les années 90 est lié à des besoins en conception de produits complexes et optimisés d'un point de vue mécanique, initialement dans le secteur de l'aéronautique et de l'automobile, avant de se propager à tous les secteurs industriels jusqu'aux produits les plus simples. Au fil des années, la CAO mécanique est devenue la fondation des autres outils de conception de produit, d'industrialisation jusqu'à l'organisation industrielle. L'offre actuelle d'éditeur historique comme Dassault System illustre parfaitement cela avec une approche centrée sur la maquette géométrique qui est leur coeur de compétence.

La CAO puis les approches PLM actuelles en conception de produits visent plus à gérer des modifications dans un temps limité durant la phase de conception avec uniquement un système virtuel jusqu'à la validation de la version qui passera en production. La maquette numérique de cette version évoluera très peu voir pas du tout dans le temps durant toute la phase d'utilisation des produits fabriqués avec cette maquette numérique. Elle servira éventuellement de point de départ dans le cadre d'une évolution du produit vers une nouvelle version.

Les caractéristiques de ces produits mécaniques complexes (aérospatiale, aviation, voiture, train, bateau, sous-marin, application militaire) sont :

- Un acteur principal majeur gère les spécifications et pilote dans le détail la conception globale et notamment la maquette 3D.
- Les pièces sont majoritairement spécifiques avec très peu d'intégration de composants existants.
- Un coût de conception amorti soit sur un grand nombre de produits fabriqués, soit justifié par les risques potentiels.
- Un nombre très limité de modifications de chaque produit en phase d'utilisation.
- Des systèmes majoritairement embarqués.

Malgré toutes ces caractéristiques d'un produit mécanique complexe différentes de celles d'un CPPS, les modèles de représentation restent très proche en raison d'un point commun historique : des concepteurs de CPPS et de produits mécaniques complexes tous issus des mêmes formations de mécanique très orientées conception de produits mécaniques complexes, ce qui est justifié d'un point de vue purement mécanique. En terme de difficulté, la conception d'un CPPS relève aujourd'hui certainement plus du domaine de l'ingénierie système que de la mécanique.

Si le génie mécanique a longtemps été en avance dans l'utilisation des outils numériques de conception, le génie civil confronté à des produits tous sur mesure dispose désormais de ces propres outils numériques notamment pour la gestion du cycle de vie des bâtiments : approche BIM - Building Information Modeling. Les similitudes entre CPPS et bâtiments sont plus nombreuses qu'il n'y paraît au premier abord en terme de gestion du cycle de vie du système et donc de son jumeau numérique.

6.4.2 CPPS et Bâtiment, beaucoup de similitudes

La figure 6.12 présentent les principales caractéristiques d'un bâtiment et leurs implications sur la gestion de son cycle de vie dans le cadre d'une approche BIM. Un bâtiment de type immeuble tertiaire par exemple est un système qui se caractérise par :

- Une seule instance du système réel et donc une instance de JN unique à construire.
- Des coûts de conception du système réel et de développement du JN amortis sur cette seule instance.
- Un système basé sur un assemblage d'un grand nombre de composants standards avec des composants sur mesure.
- Des acteurs très nombreux et différents à toutes les étapes du cycle de vie, de la conception à la construction et l'exploitation jusqu'à la fin.
- Une durée de vie longue de plusieurs dizaines d'années.
- Un très grand nombre de modifications du bâtiment durant la phase d'utilisation.
- Un système exploité par des professionnels
- Un système fixe dans l'espace

Face à ces caractéristiques, la gestion du cycle de vie d'un bâtiment a été pensée différemment de celle d'un produit mécanique tel qu'une voiture. Le BIM¹³ s'est imposé ces derniers années dans la construction d'immeubles

12. Conception Assistée par Ordinateur

13. Building Information Modeling

6.4. CPPS ET BÂTIMENT, UN CYCLE DE VIE SIMILAIRE

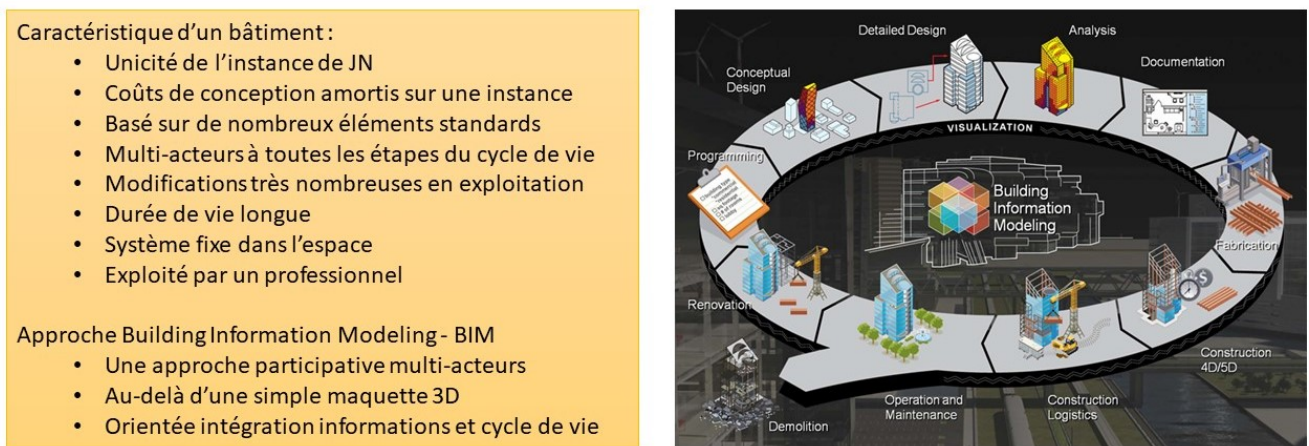


FIGURE 6.12 – CPPS et bâtiments des caractéristiques similaires, l'approche Building Information Modeling (BIM).

avec une approche :

- Une approche participative de tous les acteurs à la construction du JN.
- Un apport de chaque acteur qui dépasse la maquette numérique 3D
- Une approche plus orientée système permettant l'intégration d'un grand nombre d'informations issues de tous les acteurs dans un contexte de gestion du cycle de vie pour supporter toutes les étapes et notamment celle d'exploitation avec toutes ces modifications à gérer.

Un bâtiment et un CPPS ont des caractéristiques similaires mais des approches actuellement différentes dans la gestion de leur cycle de vie et donc de construction de leur JN. Comme pour le bâtiment, la gestion du cycle de vie d'un CPPS doit beaucoup plus être centrée système et moins maquette numérique 3D. Au delà des modèles et des outils afin de maximiser le retour sur investissement, cela impacte le processus de conception d'un CPPS afin de construire au plus tôt le JN et les compétences des équipes de conception, de mise en service et d'exploitation.

Afin d'imaginer plus précisément ce que chaque acteur pourrait apporter à la conception d'un CPPS et de son JN, l'apport de chaque acteur dans une approche BIM est détaillé.

6.4.3 BIM, une approche multi-acteurs au delà de la maquette 3D

La figure 6.13 illustre l'apport de chaque acteur à la construction d'un bâtiment avec en vert les systèmes physiques et en bleu les informations associées. Aujourd'hui, les prescripteurs en charge de la rédaction des cahiers des charges pour la consultation imposent aux fournisseurs les informations à transmettre avec leur format pour des projets d'immeuble notamment tertiaires. Comme dans tous les domaines, l'histoire des standards est fait d'évolutions successives mais avec une convergence dans le bâtiment. La norme américaine COBie¹⁴ remplacée progressivement par l'ISO 16739 standardise le modèle des données par un schéma conceptuel de données et un format de fichier d'échange permettant d'intégrer non seulement des modèles CAO à un projet mais également tout un ensemble d'informations. La ISO 16739 est aujourd'hui la norme internationale qui définit les caractéristiques du format IFC pour le partage de données dans un processus BIM. Dans une approche de cycle de vie, les données sont associées à un niveau de développement allant du niveau 1 des premières esquisses au niveau 6 d'exploitation.

En imaginant l'existence un jour d'un tel standard pour les CPPS et au regard de l'approche proposée précédemment centrée ingénierie système et encapsulation, nous pourrions alors considérer que :

- Tout composant acheté sur catalogue serait vendu avec son JN par le fournisseur, tel un pré-actionneur, un actionneur et un capteur.
- Les architectures standards de chaînes fonctionnelles proposées par les fournisseurs disposeraient de leur prototype de JN avec une structure standard, voir même d'une instance de JN générée automatiquement par les outils actuels de configuration de chaînes fonctionnelles (vérin avec son distributeur et ses capteurs issus du même fournisseur, convoyeur avec son moteur et son variateur de vitesse, etc).
- Les équipements sur catalogue tel qu'un centre d'usinage à commande numérique seraient vendus avec leur prototype de JN instancié lors de l'intégration sur une ligne de production en fonction des opérations à réaliser et des opérateurs de conduite.

14. Construction Operations Building Information Exchange

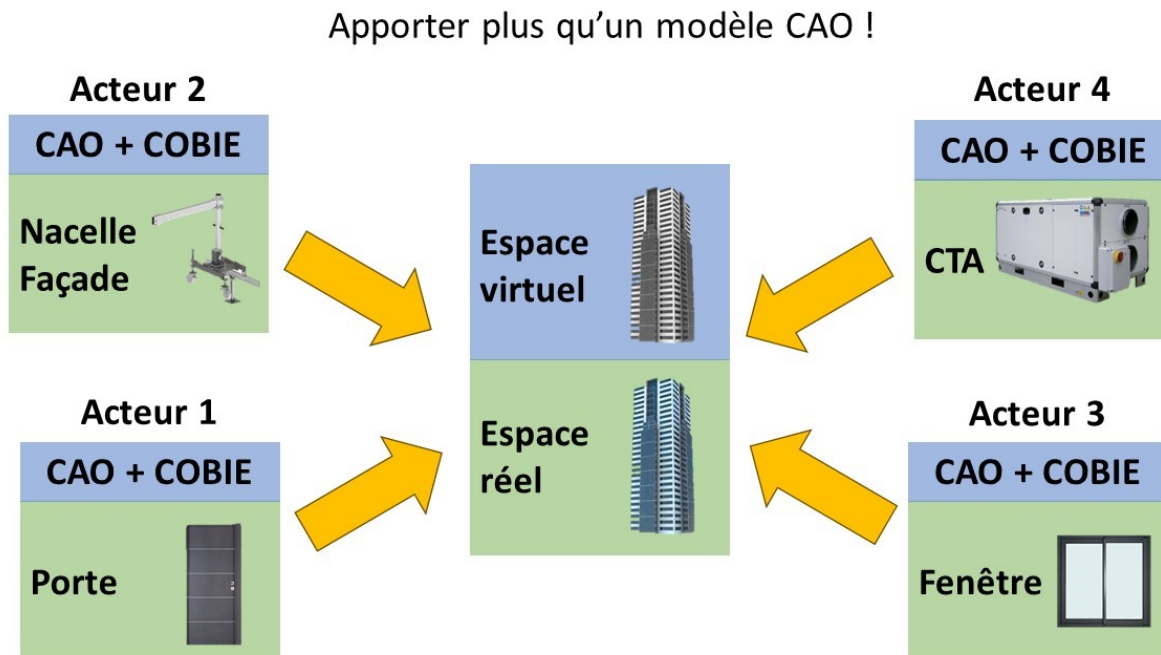


FIGURE 6.13 – BIM une approche centrée intégration de sources de données multi-acteurs.

- Un fabricant de machines spéciales concevrait le JN en même temps que la machine et fournirait l'instance du JN après mise en service et réception de la machine par le client. Si la construction du prototype de JN découle de la conception de la machine avec une méthodologie d'instanciation bien définie lors de la mise en service, le coût de construction serait sans doute plus que raisonnable.

Enfin en couplant fortement la construction d'un JN de ligne de production aux outils d'industrialisation et d'organisation industrielle pour la conception et l'amélioration de ligne, il est fort probable que le coût final du JN soit relativement faible. Finalement en voyant un CPPS comme un légo géant constitué de briques élémentaires standards, la construction d'un JN pourrait se révéler bien moins fastidieuse qu'actuellement.

En considérant construire le JN progressivement durant les phases de conception et de mise en service d'un CPPS, le peu de données collectées lors de la mise en service ne seront pas suffisantes pour utiliser des outils d'intelligence artificielle et notamment d'apprentissage automatique. Quelle sera alors la place de l'IA dans une telle approche de construction d'un JN ? La section suivante aborde cette question.

6.5 Partager des données pour co-construire des Jumeaux Numériques

6.5.1 Apport de l'apprentissage automatique pour les JN

Avant d'aborder la question des apports potentiels pour les JN, le principe de l'apprentissage automatique (Machine Learning - ML) est rappelé ainsi que les étapes nécessaires à son déploiement et ses limites dans un contexte industriel.

La définition formelle de l'apprentissage automatique la plus fréquemment utilisée est celle proposée par [Mitchell, 1997] : «A computer program is said to learn from experience E with respect to some task T and some performance measure P , if its performance on T , as measured by P , improves with experience E .»

Moins formellement, l'apprentissage automatique peut être résumé comme le fait qu'un algorithme devienne meilleur à une tâche donnée avec de l'expérience. Une autre définition moins formelle est celle proposée par la CNIL¹⁵ : «L'apprentissage automatique (machine learning en anglais) est un champ d'étude de l'intelligence artificielle qui vise à donner aux machines la capacité d'« apprendre » à partir de données, via des modèles mathématiques. Plus précisément, il s'agit du procédé par lequel les informations pertinentes sont tirées d'un ensemble de données d'entraînement. Le but de cette phase est l'obtention des paramètres d'un modèle qui atteindront les

15. Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés, www.cnil.fr

meilleures performances, notamment lors de la réalisation de la tâche attribuée au modèle. Une fois l'apprentissage réalisé, le modèle pourra ensuite être déployé en production.»

L'ensemble des données utilisées pour l'apprentissage constitue l'expérience évoquée par Mitchell. Les performances du modèle obtenu par apprentissage dépendront donc de la qualité et de la quantité des données sans connaître à priori le niveau requis de qualité ni le volume nécessaire. Si les données ne sont pas représentatives de la réalité, alors ce biais sera appris et reproduit par le modèle. Cette dépendance aux données de l'apprentissage automatique constitue toute la difficulté de ces approches dont les premières étapes basées sur l'expertise humaine sont cruciales afin de fournir des données «bien» préparées à l'algorithme d'apprentissage soigneusement lui-même sélectionné par un expert. La figure 6.14 illustre toutes les étapes d'une approche d'apprentissage automatique et en particulier la préparation des données avec une boucle d'itération visant à optimiser les performances du modèle obtenu. Si l'étape d'apprentissage du modèle à partir des données préparées est automatique, toutes les étapes en amont et en aval sont basées sur l'expertise humaine de la collecte des données, à leur préparation en passant par la sélection de l'algorithme jusqu'à la validation du modèle, ce qui ne constitue pas en soit une approche «Plug & Play».

Au delà des données, un phénomène de biais existe également au niveau de l'algorithme d'apprentissage dont le résultat peut dévier par rapport à un résultat neutre, loyal ou équitable. Enfin, les algorithmes d'apprentissage automatique posent des problèmes d'explicabilité de leur résultat et donc des décisions prises sur la base de ces résultats. Dans le cadre des applications de l'apprentissage automatique, les biais des données et des algorithmes engendrent inévitablement des risques qui soulèvent des questions de responsabilité en raison des difficultés à expliquer des décisions. Ces éléments sont aujourd'hui au coeur des réflexions sur la future loi sur l'IA de l'Europe qui sera la première réglementation de l'intelligence artificielle. Le 14 juin 2023, les députés européens ont adopté leur position de négociation sur la loi sur l'IA.

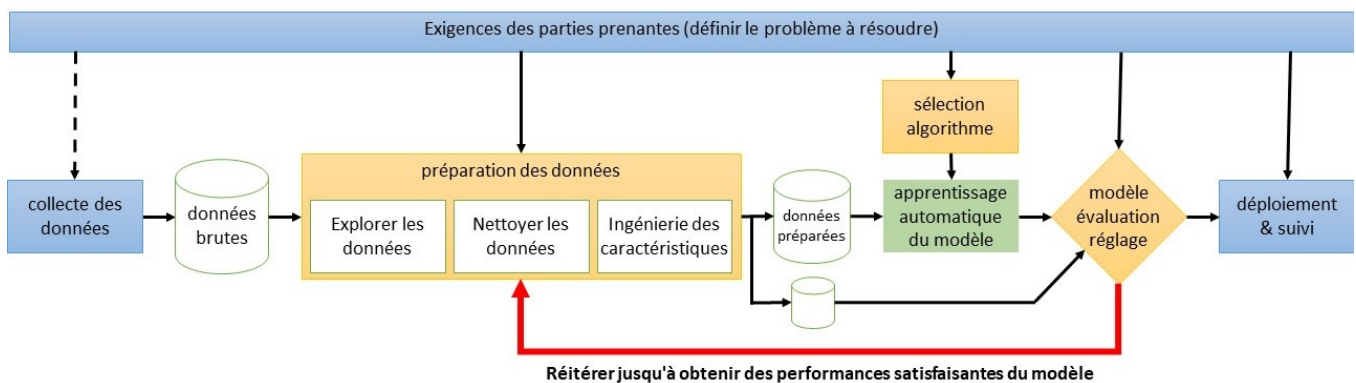


FIGURE 6.14 – Apprentissage Automatique d'un modèle, une étape d'un processus métier basé sur l'expertise humaine.

Dans le cadre des CPPS, cette dépendance aux données soulèvent plusieurs questions. A priori, la collecte des données ne sera plus un problème avec les technologies de l'industrie 4.0 même si quelques années voire plus seront nécessaires pour accéder facilement et en toute sécurité à toutes les données. Les premiers déploiement industriels comme l'exemple de Renault ¹⁶ qui a connecté récemment 8500 équipements imposent encore aujourd'hui de faire des choix tant sur les variables collectées que sur la fréquence d'acquisition. La difficulté suivante est l'exploitation de ces données, non pas tant du point de vue du volume, mais plus au regard du nombre de variables. En effet en «grandes» dimensions (à partir de ~100 variables), toute nouvelle prédiction doit de toute façon très probablement être considérée comme de l'extrapolation [Balestriero et al., 2021]. Dans un contexte industriel avec des contraintes fortes de sécurité et de rentabilité visant à tout optimiser, cela soulève sans doute quelques questions. Un apprentissage par renforcement, succession d'essais-erreurs comme pour apprendre à marcher, est délicat à envisager dans un contexte industriel avec ses contraintes de sécurité et de rentabilité. Par conséquent, le système doit être invariant temporellement (cf. chapitre 4) sur une période suffisamment longue pour d'une part collecter des données représentatives de l'expérience E et d'autre part assurer un déploiement suffisamment long pour être rentable.

Au regard de ces éléments, les données collectées pour un CPPS seront-elles suffisamment représentatives de l'expérience nécessaire pour l'apprentissage ? Deux questions se cachent derrière cette interrogation :

16. <https://manufacturing.fr/renault-connecte-8500-equipements-de-production/>

- Les données sont-elles disponibles en qualité et en quantité suffisantes ?
- Un CPPS est-il un système suffisamment invariant temporellement pour justifier l'usage de l'apprentissage automatique ?

Pour une ligne de production toujours faite sur mesure, comme pour une machine spéciale, la figure 6.15 illustre la première question du point de vue de la structure des données collectées. Alors que dans de nombreux domaines, les données collectées concernent un très grands nombres d'entités d'une population, les données d'un CPPS sont généralement relatives à une collecte périodique pour une seule entité. Cette limite a été évoqué au chapitre 5 dans les travaux sur le pronostic de la consommation énergétique d'une chambre froide : le modèle de prédiction de la température a des performances acceptables contrairement au modèle d'évaluation du coût en raison de données disponibles sur une année seulement. L'intervalle de temps sur lequel les données sont collectées doit être suffisamment long pour disposer d'une expérience représentative du comportement du système, alors même que certains comportements indésirables se produisent rarement. Avec moins d'une occurrence par an par exemple, les données doivent être collectées durant plusieurs années pour être représentatives. Si les performances du modèle obtenu sont excellentes, l'usage de l'apprentissage automatique nécessite d'accepter une longue période de collecte des données et cet usage devient rentable si la durée de déploiement est suffisamment longue.

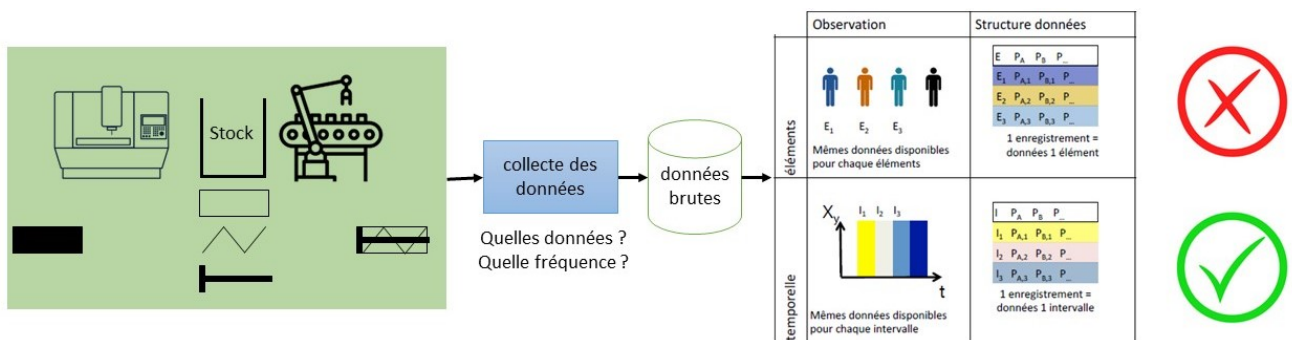


FIGURE 6.15 – Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique, limites de l'application au CPPS.

Durant tout ce temps de collecte des données et de déploiement du modèle appris, le système doit être suffisamment invariant pour ne pas devoir relancer une nouvelle collecte des données et un nouveau déploiement. Suite au premier déploiement, les itérations suivantes peuvent sans doute être beaucoup plus automatisées et cela sera déjà un gain. Mais, il reste à s'assurer de la stabilité du système observé, en l'occurrence un CPPS dans le cadre de ce projet scientifique. Comme évoqué précédemment au chapitre 4, la démarche d'amélioration continue dans laquelle quasiment toutes les entreprises sont aujourd'hui engagées basée sur une stratégie de petits pas et l'introduction toujours plus fréquente de nouvelles références de produits en production réduisent considérablement l'horizon de temps sur lequel une ligne de production et ses équipements ne subissent pas de modification. Cet horizon de temps est de l'ordre du mois du point de vue amélioration continue et de quelques mois pour de nouvelles références en fonction des secteurs industriels bien évidemment. Il est donc fort probable qu'une ligne de production et les équipements soient à considérer comme appartenant à la classe des systèmes variants temporellement. Il s'agit donc d'explorer la branche représentée sur la 4.6 des systèmes variables dans le temps.

En résumé, ces considérations sur cette nécessaire période de collecte des données soulèvent des questions sur l'usage de l'apprentissage automatique pour construire un JN au regard de l'objectif de création d'un JN conjointement à la conception du jumeau physique pour aboutir à une première calibration du JN dès la phase de mise en service. Cela semble en effet contradictoire : disposer d'un JN dès la fabrication de la première pièce vs disposer d'une période de collecte de données de plusieurs années. Mais, il serait tout de même dommage de ne pas profiter des opportunités offertes par l'apprentissage automatique d'extraire des connaissances des données disponibles sur un CPPS toujours plus nombreuses. Deux pistes sont envisageables pour cela :

- Coupler les approches d'ingénierie système et d'apprentissage automatique pour une calibration progressive, d'une initialisation basée majoritairement sur l'expertise humaine à un raffinement plus basé sur les données.
- Partager des données sur des éléments standards pour co-construire des JN.

Dans le cadre d'une approche d'ingénierie système pour la construction d'un JN, la première piste consisterait à prévoir un ensemble de paramètres de JN avec une valeur initiale fixée par un expert suivi par un processus de mise à jour de cette valeur au fur et à mesure de l'acquisition des données. Cela impose bien évidemment de pouvoir définir en amont la préparation des données notamment l'ingénierie des caractéristiques et la sélection de l'algorithme d'apprentissage sur la base des CPPS existants. Tous les travaux de recherche déjà menés sur l'utilisa-

tion de l'apprentissage automatique appliquée au CPPS est une base de connaissance pour ce travail préparatoire et d'intégration dans une démarche d'ingénierie système. Cette piste reste à explorer en commençant certainement par définir des classes de CPPS en se basant sur les trois classes existantes, continue, par lots et discrète, qui sont peut-être suffisantes.

Des premiers éléments pour la seconde piste sont soumis dans les deux sections suivantes pour des JN de CPPS standards et des JN d'opérateur de production.

6.5.2 Construire un JN de CPPS standard

Comme évoqué précédemment, une ligne de production est comme un «Lego» géant composé de très nombreux éléments standards mais assemblés de manière particulière, comme si chaque boîte de Lego était unique ! Il n'existe pas deux lignes identiques de production mais tous les éléments standards, d'un simple composant comme un vérin à un équipement comme une cireuse à bouteilles¹⁷, sont des produits dit sur catalogue dont le fournisseur a vendu quelques exemplaires voire quelques milliers. Comme représenté sur la figure 6.15, l'observation d'une population composée de plusieurs entités similaires est la structure de données la plus classique en apprentissage automatique favorisant une qualité et une quantité suffisantes de données.

En considérant résolu le problème de partage des données en toute sécurité lié aux nouvelles technologies de l'industrie 4.0 et des CPS, le fournisseur d'un CPPS standard comme ceux cités précédemment pourrait collecter toutes les données relatives à ses produits en fonctionnement. Avec cette base de données représentatives d'une population comme illustré sur la figure 6.16, le fournisseur en plus d'apporter un prototype de JN centrée ingénierie système comme évoqué précédemment dans ce chapitre aurait alors la capacité d'intégrer à ce JN des valeurs issues de l'analyse de cet historique de données mais également des modèles appris à partir de ces données. Au delà de capitaliser les connaissances sur un produit catalogue, une telle approche serait de nature à faciliter l'étape de préparation des données et notamment d'ingénierie des caractéristiques au regard du niveau très élevé d'expertise du fournisseur sur ses propres produits.

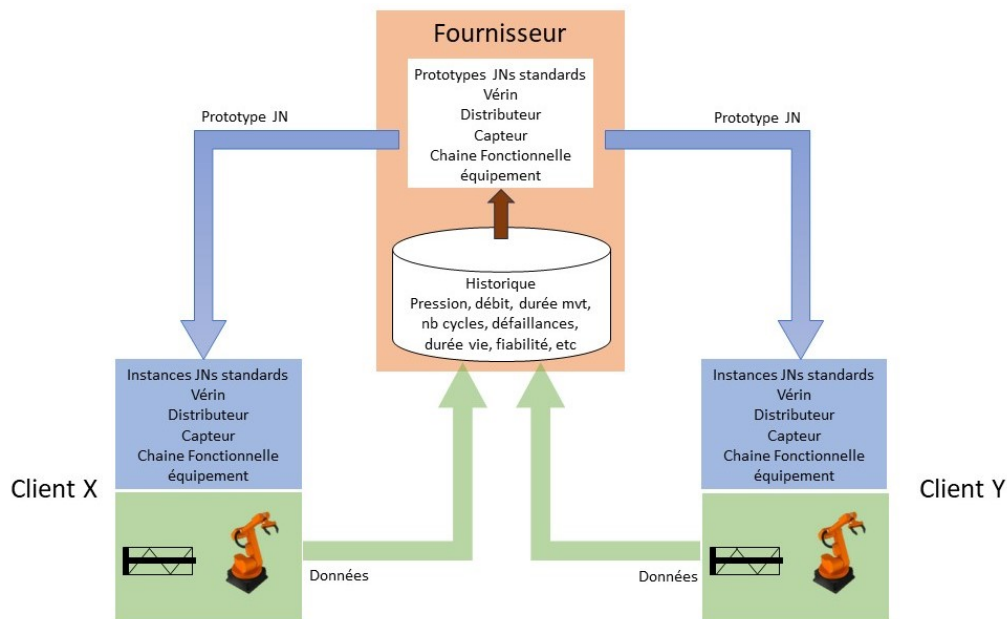


FIGURE 6.16 – Partager des données et co-construire des jumeaux numériques plus précis.

Sur la base de la même démarche de partage des données, la section suivante s'intéresse aux JN d'opérateurs.

6.5.3 Construire un JN d'opérateur

Le comportement humain peut-il être formalisé à partir de l'apprentissage automatique ? Une première réponse se trouve certainement dans le domaine du marketing dont le premier objectif est de comprendre le comportement

17. www.fichet-distribution.fr/nos-cireuses/

humain pour mieux vendre. Et effectivement, il y a plus de trois millions de résultats à la recherche «Machine Learning for marketing» sur google scholar, à comparer aux 300 000 résultats pour «Industrie 4.0» et aux moins de 100 000 résultats pour «Cyber-Physical System». Les comportements humains peuvent donc être classifiés à partir de l'analyse de données. Il est donc envisageable de classifier le comportement des opérateurs de production et de créer des prototypes de JN de profils d'opérateur en fonction par exemple de leur expérience (ancienneté dans leur poste, qualification, etc). Comme le marketing qui exploise toutes les traces numériques laissées par les consommateurs à travers leur recherche sur internet et leurs achats, il faut formaliser les traces numériques des actions des opérateurs, les collecter et enfin les analyser. Avant d'imaginer des technologies futuristes, il est d'abord possible de considérer la situation actuelle en s'intéressant aux Interfaces Homme-Machine (IHM) comme représenté sur la figure 6.17. En considérant révolue l'époque des IHM basées sur des boutons et des voyants, les écrans tactiles avec des tailles toujours plus grandes se sont généralisés pour la conduite et la maintenance des machines. La réalité augmentée est également aujourd'hui une technologie pour les IHM industrielles qui va progressivement se développer au fur et à mesure de la fin des barrières techniques (autonomie, masse, etc) et de la baisse des coûts, tant du matériel que du développement des applications si elle devient une nouvelle corde à l'arc des équipes d'industrialisation et d'organisation industrielle. Comme pour l'analyse des expériences d'apprentissage avec des formats spécifiques pour la collecte des traces des apprenants, les applications d'IHM et de réalité augmentée doivent intégrer les mécanismes nécessaires au recueil des traces numériques. Il sera alors possible soit au niveau d'une entreprise soit d'un fournisseur d'IHM de collecter ces traces numériques afin par apprentissage de créer des JN pour différents profils utilisateurs. Il y aura certainement quelques barrières réglementaires notamment vis à vis du Règlement Général sur la Protection des Données - RGPD mais pour lesquelles il existe certainement déjà des solutions.

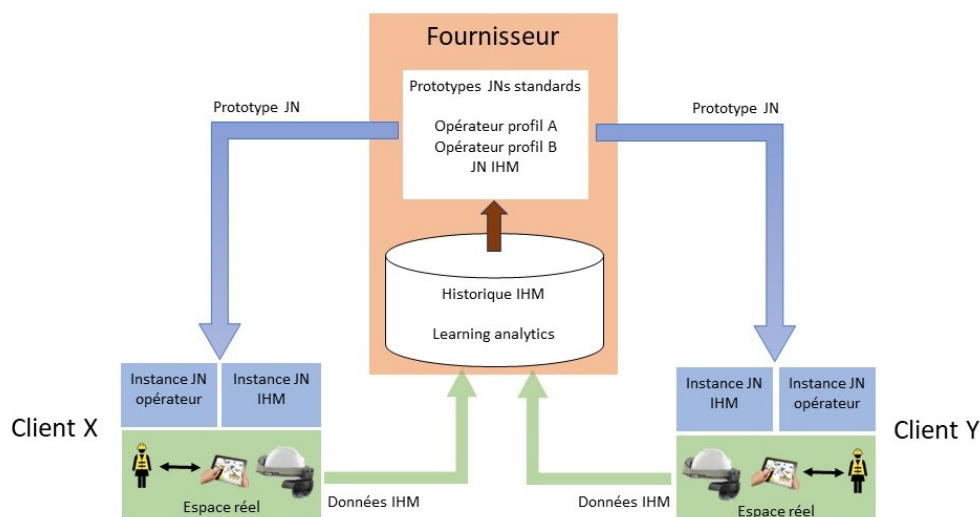


FIGURE 6.17 – Construire des jumeaux numériques d'opérateurs de production.

Au regard de la situation actuelle, ce chapitre consacré au projet scientifique ne pouvait pas se conclure sans aborder l'enjeu climatique.

6.6 Urgence climatique, un modèle adapté de CPS

Nos collègues physiciens plus habitués que nous à des phénomènes avec des ordres de grandeur qui nous dépassent tous à titre individuel font état d'une urgence climatique. Quand un consensus entre 195 pays du monde est trouvé sur la base de plus de trente ans de travaux scientifiques internationaux, il y a sûrement là des éléments qui pourraient amener chacun et chacune à quelques questions sur la situation. Face à cela et avant même d'apporter des réponses, les Universités à travers leurs équipes de recherche et pédagogiques doivent avant tout exposer la situation actuelle en toute impartialité sur un sujet parfois un peu clivant (pour ne pas dire toujours) en raison de son impact potentiel sur nos modes de vie. Les solutions collectives à imaginer ne sont probablement pas la généralisation des actions individuelles actuelles. Au delà de cette nécessaire prise de conscience collective pour

6.7. CONCLUSION

imaginer des solutions au niveau industriel, la dimension environnementale doit explicitement apparaître dans nos représentations et plus particulièrement dans les concepts de haut niveau.

Dans les chapitres précédents, il a été évoqué le triptyque historique coût, délai et qualité qui doit évoluer pour intégrer la dimension environnementale. Il n'y a rien d'innovant dans cette proposition, il s'agit plus de mettre en avant ce qui pourrait passer inaperçu et ce que l'Alliance pour l'Industrie du Futur a déjà intégré dans ces dernières publications et notamment celle sur le jumeau numérique évoqué précédemment : coût, qualité, délai et **impact environnemental**. Seule une prise de conscience collective de la situation climatique fera de l'impact environnemental un critère incontournable au même titre que les trois autres.

Dans la même démarche, une extension du concept de CPS présenté au chapitre 4 est proposée sur la figure 6.18 avec la représentation explicite de l'environnement et de l'impact des CPS dessus.

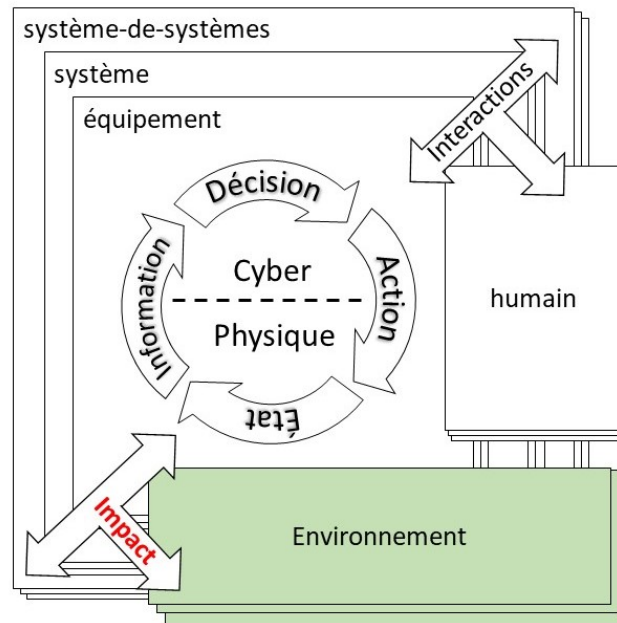


FIGURE 6.18 – Un modèle de CPS pour intégrer l'enjeu climatique.

Ce chapitre se termine sur cette courte mais essentielle section.

6.7 Conclusion

Le projet scientifique présenté dans ce chapitre se focalise plus particulièrement sur deux critères qui définissent un jumeau numérique de CPPS : un JN est constitué d'un ensemble de modèles multi-physiques & multi-échelles, et un JN nécessite des calibrations successives par rapport au réel. Après avoir introduit et discuté au regard des nombreuses définitions existantes le concept de jumeau numérique fortement lié à celui de cycle de vie du système réel, la déclinaison de ce concept au CPPS a été discuté au travers de plusieurs spécificités : une seule instance de JN qui correspond à l'unicité du CPPS réel, une décomposition en plusieurs niveaux reflétant celle du CPPS basé sur de nombreux éléments standards, un processus spécifique de conception et de fabrication d'un CPPS ne facilitant pas la construction conjointe de son JN, un besoin de calibrations successives du JN à chaque évolution du système réel, un rapport bénéfice et coût des JN très variable, une place particulière de l'humain au sein du JN au regard de celle au sein d'un CPPS. Sur la base de ces réflexions, le coeur du projet scientifique a été décliné par une approche centrée ingénierie système basée sur l'agrégation de briques assurant la cohérence multi-physiques et multi-échelles du JN. Afin d'envisager cette approche dans un contexte industriel, sa faisabilité et son coût ont conduit à proposer une approche plus orientée BIM¹⁸ pour les bâtiments que PLM¹⁹ pour des produits manufacturiers de série. Face au déluge de données annoncées par l'industrie 4.0, la construction et la transmission de JN par les fournisseurs de produits sur catalogue ont été esquissées à travers le partage par les

18. BIM : Building Information Modeling

19. PLM : Product Lifecycle Management

clients des données sur l'utilisation de ces produits sur catalogue. Malgré des CPPS à considérer plus comme des systèmes variables dans le temps qu'invariants comme aux chapitres précédents, ce partage des données par les clients amène une nouvelle valorisation des données par l'apprentissage automatique. Ce chapitre a été ponctué par une réflexion sur les concepts de haut niveau sur lesquels repose ce projet scientifique par leur capacité à favoriser l'émergence de solutions à un problème holistique : l'urgence climatique annoncée.

Dès le début du chapitre 4 sur la notion de système, cette seconde partie constituée de trois chapitres consacrés à mes travaux de recherche passés, présents et futurs a été illustrée par de nombreux «petits» vérins ! Il semble donc logique de terminer cette seconde partie par la figure 6.19.



FIGURE 6.19 – Le vérin de la fin !

Conclusion Générale

Le métier d'enseignant-chercheur est un métier passionnant aux multiples facettes. Limiter mon mémoire d'HDR à la seule présentation de mon activité de recherche aurait été trop réducteur. Si les activités d'un enseignant-chercheur peuvent être dissociées dans un dossier, l'enseignant-chercheur est une même et seule personne nourrie par toutes les facettes de son métier. Une répartition idéale serait de consacrer 50% de son temps à l'enseignement et 50% de son temps à la recherche. Un juste équilibre entre ces deux activités n'est pas une chose simple à trouver comme le rappelle la définition même du mot équilibre : «Juste proportion entre des choses opposées ; état de stabilité ou d'harmonie qui en résulte». En effet bien que l'enseignement et la recherche s'enrichissent mutuellement, le contexte et les contraintes associées à chacune de ces deux activités peuvent créer des forces qui s'opposent. Une condition nécessaire au maintien de cet équilibre est d'exercer l'une et l'autre dans un environnement stimulant. J'espère que la lecture de ce mémoire aura rendu compte de cette recherche d'équilibre.

Bibliographie

- [Abid et al., 2021] Abid, A., Khan, M. T., and Iqbal, J. (2021). A review on fault detection and diagnosis techniques : basics and beyond. *Artificial Intelligence Review*, 54(5) :3639–3664.
- [Balestriero et al., 2021] Balestriero, R., Pesenti, J., and LeCun, Y. (2021). Learning in High Dimension Always Amounts to Extrapolation. arXiv :2110.09485 [cs].
- [Ben Khedher, 2012] Ben Khedher, A. (2012). *Amélioration de la qualité des données produits échangées entre l'ingénierie et la production à travers l'intégration de systèmes d'information dédiés*. PhD Thesis, Université Lyon 2.
- [Ben Khedher et al., 2009a] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2009a). Industrialization and manufacturing steps within the Global Product Lifecycle context. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS'09)*, page 9, Bordeaux, France.
- [Ben Khedher et al., 2009b] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2009b). Interaction between product life cycle management and production management : PLM-MES integration. In *2nd Doctoral Workshop IFIP WG 5.7*, page 13, Bordeaux, France.
- [Ben Khedher et al., 2010a] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2010a). An analysis of the interaction among design, industrialization and production. In *International Conference on Product Lifecycle Management (PLM10)*, page 0, BREMEN, Germany.
- [Ben Khedher et al., 2010b] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2010b). Towards integration between product and production information through the PLM-MES interoperability. In *Doctoral Spring Whorkshop "Product and Asset Lifecycle Management (DSW-PALM)*, Islantilla, Spain.
- [Ben Khedher et al., 2011a] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2011a). Industrialization and manufacturing steps within the Global Product Lifecycle context. In *APMS 2009 : Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches*, volume 338 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology book series (IFIPAICT)*, pages 400–408. Springer.
- [Ben Khedher et al., 2011b] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2011b). Integration between MES and Product Lifecycle Management. In *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'11)*, page 8, Toulouse, France.
- [Ben Khedher et al., 2011c] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2011c). Intégration des systèmes d'information dédiés aux produits et aux systèmes de production. In *Journées Doctorales du GDR MACS (JD-JN-MACS'11)*, page 6, Marseille, France.
- [Ben Khedher et al., 2012a] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2012a). Architecture for integration of product life cycle management and production. *Revue MundoPM-Project Management*, page 13.
- [Ben Khedher et al., 2012b] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2012b). Intégration des systèmes d'information dédiés aux produits et aux systèmes de production. In *13ème colloque national AIP Priméca*, page 5, Le Mont-Dore, France.
- [Ben Khedher et al., 2012c] Ben Khedher, A., Henry, S., and Bouras, A. (2012c). QUALITY IMPROVEMENT OF PRODUCT DATA EXCHANGED BETWEEN ENGINEERING AND PRODUCTION THROUGH THE INTEGRATION OF DEDICATED INFORMATION SYSTEMS. In *11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis ESDA 2012*, page 7, Nantes, France.
- [Bonnot de Condillac, 1749] Bonnot de Condillac, E. (1749). *Traité des systèmes*. Batilliot.
- [Bortolini et al., 2018] Bortolini, M., Galizia, F. G., and Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems : Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49 :93–106.

- [Bouleux et al., 2015] Bouleux, G., Marcon, E., and Mory, O. (2015). Early Index for Detection of Pediatric Emergency Department Crowding. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(6) :1929–1936.
- [Cadiou et al., 2019] Cadiou, A., Henry, S., Cheutet, V., and Eyssautier, C. (2019). A PLC Variable Identification Method by Manual Declaration of Time-Stamped Events. In *International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing SOHOMA 2019*, SOHOMA 2019 : Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, pages 313–325, Valencia, Spain.
- [Capawa Fotsoh et al., 2020] Capawa Fotsoh, E., Castagna, P., Mebarki, N., and Berruet, P. (2020). MODULARITY OF RMS : WHAT ABOUT THE AGGREGATION ? In *13ème CONFERENCE INTERNATIONALE DE MODELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020, AGADIR (virtuel), Morocco*.
- [Cassandras and Lafortune, 2008] Cassandras, C. G. and Lafortune, S., editors (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer US, Boston, MA.
- [Charles et al., 2022] Charles, A., Bouleux, G., and Cherifi, C. (2022). Understanding the situation at a glance : the powerful value added of complex networks to analyse humanitarian operations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Publisher : Elsevier.
- [Combacau et al., 2000] Combacau, M., Berruet, P., Zamai, E., Charbonnaud, P., and Khatab, A. (2000). Supervision and Monitoring of Production Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(17) :849–854.
- [de Bruin et al., 2017] de Bruin, T., Verbert, K., and Babuška, R. (2017). Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(3) :523–533. Conference Name : IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.
- [Deschamps, 2007] Deschamps, E. (2007). *Diagnostic de Services pour la Reconfiguration Dynamique de Systèmes à Événements Discrets Complexes*. phdthesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- [Deschamps et al., 2006a] Deschamps, E., Henry, S., and Zamai, E. (2006a). Models of knowledge on manufacturing systems for control law synthesis. In *12 th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, May 17-19, 2006, Saint-Etienne, France, pages –, France. Elsevier Science.
- [Deschamps et al., 2006b] Deschamps, E., Henry, S., and Zamai, E. (2006b). Petri Nets Modelling for Control of Discrete Events Systems. In *4th CESA Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"*, October 4-6, 2006, Beijing, P.R. China, pages p. 904–911, France. Tsinghua University Press.
- [Deschamps et al., 2006c] Deschamps, E., Henry, S., and Zamai, E. (2006c). Synchronization of Operating Part Model in Failure Context. In *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation*, 29 November to 1 December 2006, Sydney, Australia, pages –, France. IEEE Computer Society.
- [Deschamps et al., 2007a] Deschamps, E., Henry, S., and Zamai, E. (2007a). Automatic design of control laws based on Petri nets formalism for complex Discrete Event Systems. *Studies in Informatics and Control*, 16(1) :–. Publisher : Informatics and Control Publications.
- [Deschamps et al., 2007b] Deschamps, E., Henry, S., and Zamai, E. (2007b). Operating part model for on-line diagnosis. In *Proceeding of the International Workshop on Principles of Diagnosis (DX'07)*, page pp, Lyon, France. DX'07.
- [Deschamps et al., 2004] Deschamps, E., Henry, S., Zamai, E., and Jacomino, M. (2004). Controlled System Model with Petri Net Formalism for Reconfiguration. In *IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control (MIM'04)*, Athènes, Greece.
- [Diallo et al., 2014a] Diallo, T., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2014a). Towards a more efficient use of process and product traceability data for continuous improvement of industrial performances. In *APMS Doctoral Whorkshop*, Ajaccio, France.
- [Diallo et al., 2015a] Diallo, T., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2015a). Construction de la structure des Réseaux Bayésiens causaux appliqués au diagnostic. In *6ème Journées Doctorales / Journées Nationales MACS (JD-JN-MACS 2015)*, Bourges, France.
- [Diallo et al., 2014b] Diallo, T. L., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2014b). Using Unitary Traceability for an Optimal Product Recall. In Grabot, B., Vallespir, B., Gomes, S., Bouras, A., and Kiritsis, D., editors, *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2014)*, volume AICT-438 of *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*, pages 159–166, Ajaccio, France. Springer. Issue : Part I.

- [Diallo et al., 2016] Diallo, T. M., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2016). Effective use of food traceability in product recall. In Santaclara, M. E. F., editor, *Advances in Food Traceability Techniques and Technologies - Improving Quality Throughout the Food Chain*, Advances in Food Traceability Techniques and Technologies. Elsevier.
- [Diallo et al., 2018] Diallo, T. M., Henry, S., Ouzrout, Y., and Bouras, A. (2018). Data-based fault diagnosis model using a Bayesian causal analysis framework. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 17(02) :583–620. Publisher : World Scientific Publishing.
- [Diallo, 2015] Diallo, T. M. L. (2015). *Approche de diagnostic des défauts d'un produit par intégration des données de traçabilité unitaire produit/process et des connaissances expertes*. PhD Thesis, Université Lyon 1.
- [Diallo et al., 2015b] Diallo, T. M. L., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2015b). Bayesian Network Building for Diagnosis in Industrial Domain based on Expert Knowledge and Unitary Traceability Data. In *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2015)*, volume 48, pages 2411–2416, Ottawa, Canada. Issue : 3.
- [Diedrich et al., 2022] Diedrich, A., Buchholz, F., and Niggemann, O. (2022). Learning Causal System Descriptions for Diagnosing Cyber-Physical Systems. In *33rd International Workshop on Principle of Diagnosis – DX 2022*. LAAS-CNRS-ANITI.
- [Duboue, 2020] Duboue, P. (2020). *The Art of Feature Engineering : Essentials for Machine Learning*. Cambridge University Press. Google-Books-ID : ILbrDwAAQBAJ.
- [Elshenawy et al., 2021] Elshenawy, L. M., Halawa, M. A., Mahmoud, T. A., Awad, H. A., and Abdo, M. I. (2021). Unsupervised machine learning techniques for fault detection and diagnosis in nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy*, 142 :103990.
- [Escudero et al., 2022] Escudero, C., Massioni, P., Zamaï, E., and Raison, B. (2022). Analysis, prevention, and feasibility assessment of stealthy ageing attacks on dynamical systems. *IET Control Theory and Applications*, 16(4) :381–397. Publisher : Institution of Engineering and Technology.
- [Estefania et al., 2018] Estefania, T. V., Samir, L., Robert, P., Patrice, D., and Alexandre, M. (2018). The integration of ERP and inter-intra organizational information systems : A Literature Review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11) :1212–1217.
- [European Commission. and EFFRA, 2013] European Commission. and EFFRA (2013). *Factories of the future :multi annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020*. Publications Office, LU.
- [Ganz and Isaksson, 2023] Ganz, C. and Isaksson, A. J. (2023). Trends in Automation. In Nof, S. Y., editor, *Springer Handbook of Automation*, Springer Handbooks, pages 103–117. Springer International Publishing, Cham.
- [Grieves and Vickers, 2017] Grieves, M. and Vickers, J. (2017). Digital Twin : Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., and Alves, A., editors, *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems : New Findings and Approaches*, pages 85–113. Springer International Publishing, Cham.
- [Griffor et al., 2017] Griffor, E., Greer, C., Wollman, D., and Burns, M. (2017). Framework for Cyber-Physical Systems : Volume 1, Overview.
- [Guériau, 2016] Guériau, M. (2016). *Systèmes multi-agents, auto-organisation et contrôle par apprentissage constructiviste pour la modélisation et la régulation dans les systèmes coopératifs de trafic*. phdthesis, Université de Lyon I Claude Bernard.
- [Han, 2020] Han, S. (2020). A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(3) :323–336.
- [Heidel, 2019] Heidel, R. (2019). *Industrie 4.0 : The Reference Architecture Model RAMI 4.0 and the Industrie 4.0 component*. Beuth Verlag, Berlin Wien Zürich.
- [Henry, 2005] Henry, S. (2005). *Synthèse de Lois de commande pour la configuration et la reconfiguration des systèmes industriels complexes*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- [Henry et al., 2006] Henry, S., Deschamps, E., Bellemain, P., and Zamaï, E. (2006). Atelier logiciel de synthèse de lois de commande. In *Journées de la section Automatique du club EEA consacrées aux démonstrateurs en Automatique à vocation recherche*, Angers, France.
- [Henry et al., 2004a] Henry, S., Deschamps, E., Zamaï, E., and Jacomino, M. (2004a). Control Law Synthesis Algorithm for Discrete-Event Systems. In *IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'04)*, Santiago, Chile.

- [Henry and Faure, 2003] Henry, S. and Faure, J.-M. (2003). Elaboration of invariant safety properties from fault-tree analysis. In *IMACS-IEEE "CESA'03" : "Computational Engineering in Systems Applications"*, pages CD ROM paper S2-I-04-0372, Lille, France.
- [Henry et al., 2012] Henry, S., Zamaï, E., and Jacomino, M. (2012). Logic control law design for automated manufacturing systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4) :824 à 836. Publisher : Elsevier.
- [Henry et al., 2003] Henry, S., Zamaï, E., and Jacomino, M. (2003). Decisional Requirements for Supervision, Monitoring and Control Structures. In *IEEE International Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA'03)*, Lille, France.
- [Henry et al., 2004b] Henry, S., Zamaï, E., and Jacomino, M. (2004b). Real time reconfiguration of manufacturing systems. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'04)*, 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, La Haye, Netherlands. IEEE.
- [Henry et al., 2005] Henry, S., Zamaï, E., and Jacomino, M. (2005). Controlled-system model adapted to the control law synthesis. In *16th IFAC World Congress*, pages –, Prague, Czech Republic.
- [Hong and Pula, 2022] Hong, Y.-Y. and Pula, R. A. (2022). Methods of photovoltaic fault detection and classification : A review. *Energy Reports*, 8 :5898–5929.
- [lung, 2019] lung, B. (2019). De la maintenance prédictive à la maintenance prescriptive : Une évolution nécessaire pour l'industrie du futur. In *Conference on Complexity Analysis of Industrial Systems and Advanced Modeling, CAISAM 2019*, Ben Guerir, Morocco.
- [Lee, 2006] Lee, E. A. (2006). Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate ? *n Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems*, 2 :1–9.
- [Leitão et al., 2023] Leitão, P., Karnouskos, S., Strasser, T. I., Jia, X., Lee, J., and Colombo, A. W. (2023). Alignment of the IEEE Industrial Agents Recommended Practice Standard With the Reference Architectures RAMI4.0, IIRA, and SGAM. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 4 :98–111. Conference Name : IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society.
- [Lin et al., 2017] Lin, S.-W., Murphy, B., Clauer, E., Loewen, U., Neubert, R., Bachmann, G., Pai, M., and Hankel, M. (2017). Architecture Alignment and Interoperability. *An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper*.
- [Liu et al., 2023] Liu, S., Zheng, P., and Bao, J. (2023). Digital Twin-based manufacturing system : a survey based on a novel reference model. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- [Lu et al., 2016] Lu, Y., Morris, K., and Frechette, S. (2016). Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems. Technical Report NIST IR 8107, National Institute of Standards and Technology.
- [Manufacturing, 2018] Manufacturing, S.-G. I. I. (2018). Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing System Architecture. Technical report, Standardization Council Industrie 4.0, Federal Ministry of Economic Affairs and Energy, Berlin.
- [Mishra et al., 2015a] Mishra, D. K., Henry, S., Sekhari, A., and Ouzrout, Y. (2015a). Traceability as an integral part of supply chain logistics management : an analytical review. In *7th International Conference on Logistics and Transport (ICLT 2015)*, Lyon, France.
- [Mishra et al., 2015b] Mishra, D. K., Sekhari, A., Henry, S., Mishra, D. K., Ouzrout, Y., Shrestha, A. K., and Bouras, A. (2015b). Towards Realizing the Smart Product Traceability System. In *9th IEEE International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications (SKIMA 2015)*, Kathmandu, Nepal.
- [Mishra et al., 2016] Mishra, D. K., Sekhari, A., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2016). Traceability in Product Supply Chain : A Global Model. In Harik, R., Rivest, L., Bernard, A., Eynard, B., and Bouras, A., editors, *13th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM 2016)*, volume AICT-492 of *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*, pages 377–384, Columbia, SC, United States. Springer International Publishing.
- [Mishra et al., 2017] Mishra, D. K., Sekhari, A., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2017). Data Model in PLM System to Support Product Traceability. In Ríos, J., Bernard, A., Bouras, A., and Fofou, S., editors, *14th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM 2017)*, volume AICT-517 of *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future*, pages 612–622, Seville, Spain. Springer International Publishing.
- [Mitchell, 1997] Mitchell, T. M. (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill Education, New York, 1st edition edition.

- [Moigne, 1994] Moigne, J.-L. L. (1994). *La théorie du système général : Théorie de la modélisation*. FeniXX. Google-Books-ID : lcOBDwAAQBAJ.
- [Monostori, 2014] Monostori, L. (2014). Cyber-physical Production Systems : Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*, 17 :9–13.
- [Nielsen et al., 2023] Nielsen, C. P., Avhad, A., Schou, C., and Ribeiro da Silva, E. (2023). Control system architecture for matrix-structured manufacturing systems. *Computers in Industry*, 146 :103851.
- [Nunes et al., 2023] Nunes, P., Santos, J., and Rocha, E. (2023). Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40 :53–67.
- [Pedone and Mezgár, 2018] Pedone, G. and Mezgár, I. (2018). Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies. *Computers in Industry*, 100 :278–286.
- [Pietrac et al., 2011] Pietrac, L., Lelevé, A., and Henry, S. (2011). On the use of SysML for Manufacturing Execution System design. In *ETFA 2011*, pages 1–8, Toulouse, France.
- [Rahman et al., 2023] Rahman, M. H., Wuest, T., and Shafae, M. (2023). Manufacturing cybersecurity threat attributes and countermeasures : Review, meta-taxonomy, and use cases of cyberattack taxonomies. *Journal of Manufacturing Systems*, 68 :196–208.
- [Ribault, 2020] Ribault, A. (2020). *Optimisation de la consommation d'énergie d'un entrepôt frigorifique : double approche par la recherche opérationnelle et l'apprentissage automatique*. PhD Thesis, Université Lyon 2.
- [Ribault et al., 2017] Ribault, A., Vercaene, S. V., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2017). Optimisation économique de la production d'énergie thermique avec stockage. In *18ème Congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2017)*, Metz, France.
- [Ribault et al., 2021] Ribault, A., Vercaene, S. V., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2021). Economic optimisation of cold production : a matheuristic with artificial neural network approach. *International Journal of Production Research*, 59(22) :6941–6962. Publisher : Taylor & Francis.
- [Ribault et al., 2019] Ribault, A., Vercaene, S. V., Henry, S., Ouzrout, Y., and Peguet, L. (2019). Economically Optimal Control of a Cold Room Using an Artificial Neural Network and Dynamic Programming. In *9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019*, volume 52, pages 2002–2007, Berlin, Germany. Issue : 13.
- [Semeraro et al., 2021] Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., and Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm : A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130 :103469.
- [Soares et al., 2021] Soares, N., Monteiro, P., Duarte, F. J., and Machado, R. J. (2021). Extending the scope of reference models for smart factories. *Procedia Computer Science*, 180 :102–111.
- [Tahiri et al., 2023] Tahiri, I., Philippot, A., Carré-Ménétrier, V., and Riera, B. (2023). A Fault-Tolerant and Reconfigurable Control Framework : Modeling, Design, and Synthesis. *Processes*, 11(3) :701. Publisher : MDPI.
- [Tamzalit et al., 2021] Tamzalit, D., Cortes-Cornax, M., Cardin, O., and Goepp, V. (2021). Synthèse Action commune INFORSID – MACS. In *Congrès Inforsid*, Dijon.
- [Tham et al., 2023] Tham, C.-K., Liu, W., and Chattopadhyay, R. (2023). Prescriptive Maintenance of Freight Vehicles using Deep Reinforcement Learning. In *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, pages 1–5. ISSN : 2577-2465.
- [Tran, 2018] Tran, N. H. (2018). *Extension des systèmes MES au diagnostic des performances des systèmes de production au travers d'une approche probabiliste Bayésienne*. PhD Thesis, Grenoble INPG.
- [Tran et al., 2016] Tran, N.-H., Sébastien, H., and Zamai, E. (2016). Generic and configurable diagnosis function based on production data stored in Manufacturing Execution System. In *3rd European Conference of the Prognostics and Health Management Society (PHME 2016)*, volume 7, pages 303–312, Bilbao, Spain. Issue : 057.
- [Usuga-Cadavid et al., 2022] Usuga-Cadavid, J. P., Lamouri, S., Grabot, B., and Fortin, A. (2022). Using deep learning to value free-form text data for predictive maintenance. *International Journal of Production Research*, 60(14) :4548–4575. Publisher : Taylor & Francis.
- [Valentin et al., 2023] Valentin, C., Lagoutière, F., Choubert, J., Couenne, F., and Jallut, C. (2023). Knowledge-based model and simulations to support decision making in wastewater treatment processes. In *33rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE33)*, page 6 pages, Athens, Greece.

- [Wattanakul, 2022] Wattanakul, S. (2022). *Digital twin for decision making to manage port operation with uncertainties : a knowledge approach based on machine learning*. PhD thesis, Université Lyon 2, Université de Chiang Mai, Chiang Mai.
- [Wattanakul et al., 2017] Wattanakul, S., Henry, S., Bentaha, M. L., Reeveerakul, N., and Ouzrout, Y. (2017). Improving risk management by using smart containers for real-time traceability. In *9th International Conference on Logistics and Transport (ICLT 2017)*, Bangkok, Thailand.
- [Wattanakul et al., 2018] Wattanakul, S., Henry, S., Bentaha, M. L., Reeveerakul, N., and Ouzrout, Y. (2018). Improvement of the Containerized Logistics Performance Using the Unitary Traceability of Smart Logistics Units. In Chiabert, P., Bouras, A., Noël, F., and Ríos, J., editors, *15th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM 2018)*, volume AICT-540 of *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*, pages 410–419, Turin, Italy. Springer International Publishing.
- [Wattanakul et al., 2022] Wattanakul, S., Henry, S., Napaporn, R., and Ouzrout, Y. (2022). A Port Digital Twin Model for Operational Uncertainty Management. *The Journal of Modern Project Management*, 9(3). Publisher : jmpm.
- [Wattanakul et al., 2019] Wattanakul, S., Napaporn, R., Henry, S., and Ouzrout, Y. (2019). Uncertainty handling in containerized logistics : Unitary Traceability Object approach. In *13th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications - IEEE SKIMA 2019*, page 8 pages, Ukulhas, Maldives.
- [Xia et al., 2018] Xia, T., Dong, Y., Xiao, L., Du, S., Pan, E., and Xi, L. (2018). Recent advances in prognostics and health management for advanced manufacturing paradigms. *Reliability Engineering & System Safety*, 178 :255–268.

Résumé

La problématique scientifique de cette HDR est centrée sur l'estimation d'état des systèmes à événements discrets appliquée aux systèmes de production. Dans un monde idéal en imaginant disposer d'une estimation extrêmement précise à chaque instant, les systèmes de production auraient d'une part des performances exceptionnelles avec des indicateurs proches des 100% grâce à une anticipation de tous les aléas à venir et d'autre part une capacité d'adaptation extrêmement rapide face à l'évolution des produits à fabriquer et de leur environnement. Mais, les systèmes de production sont des systèmes complexes dont les modèles actuels reproduisent partiellement leur comportement réel et dont l'observation reste très partielle. Le facteur humain est certainement non négligeable mais il existe d'innombrables autres facteurs de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. En effet, à ces différentes échelles, les modèles sont le plus souvent disjoints ne permettant pas de refléter les interactions entre ces échelles. Afin de positionner cette problématique scientifique au regard des connaissances actuelles, ce mémoire introduit en premier lieu le concept de système à événements discrets. Avant de décliner ce concept aux systèmes de production, les caractéristiques de ces derniers sont identifiées au travers de la quatrième révolution industrielle que nous vivons. Un état de l'art sur la modélisation des systèmes cyber-physiques de production (CPPS - Cyber-Physical Production System) et les limites actuelles pour les usages souhaités finit de positionner la problématique scientifique.

Une vision d'ensemble des résultats scientifiques est ensuite apportée avec une classification des travaux basée sur quatre critères. Le premier critère concerne l'approche et la méthodologie de construction des modèles. Le second critère est relatif aux éléments dont l'état est modélisé et considéré comme données d'entrée pour l'estimation. Les éléments dont nous cherchons à estimer l'état constituent le troisième critère. Enfin, l'horizon temporel associé à la fonction visée (détection, diagnostic ou pronostic) forme le quatrième critère. Sur la base de ces critères, la classification amène à identifier trois classes principales. La première concerne l'estimation d'état présent d'un système cyber. L'estimation d'état passé et présent d'un système physique constitue la deuxième classe. Enfin, l'estimation d'état futur d'un système physique forme la troisième et dernière classe. Après cette classification, les travaux associés à chaque classe sont présentés avec le même schéma : besoin industriel, problématique scientifique, résultats obtenus et enfin les perspectives.

Le projet scientifique vise à développer une approche de conception et de calibration du jumeaux numériques de systèmes de production. Avant de détailler ce dernier, le concept de jumeau numérique est d'abord discuté en veillant à mettre en exergue les caractéristiques principales. La première d'entre elle qui est fondamentale est la notion indissociable de gestion du cycle de vie du concept de jumeau numérique. Tous les secteurs étant désormais concernés par ce concept de jumeau numérique, de l'énergie à la santé jusqu'aux transports et aux bâtiments, sa déclinaison aux systèmes cyber physique de production est débattue en considérant : les particularités des CPPS, le coût et le bénéfice d'un jumeau numérique au regard du cycle de vie du CPPS, les différents niveaux à considérer et enfin la place de l'humain dans un jumeau numérique. De cette discussion émerge le projet scientifique vers une approche centrée ingénierie système et encapsulation pour concevoir un jumeau numérique multi-échelles et multi-physiques. Ce projet est consolidé en considérant les similitudes entre le cycle de vie d'un bâtiment et un CPPS. De ce rapprochement, une approche de co-construction des jumeaux numériques est proposée basée sur le partage de données entre acteurs dans un contexte d'industrie 4.0 où l'accès sécurisé aux données des différents acteurs industriels sera extrêmement simple. Enfin face à l'urgence climatique, cette dimension est intégrée au projet scientifique.