



HAL
open science

Contribution à la conception et à l'évaluation des architectures de pilotage des systèmes de production adaptables : vers une approche anthropocentrée pour la simulation et le pilotage

Hind Bril El Haouzi

► To cite this version:

Hind Bril El Haouzi. Contribution à la conception et à l'évaluation des architectures de pilotage des systèmes de production adaptables : vers une approche anthropocentrée pour la simulation et le pilotage. Ingénierie assistée par ordinateur. Université de lorraine, 2017. tel-01875639

HAL Id: tel-01875639

<https://hal.science/tel-01875639>

Submitted on 17 Sep 2018

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

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



École Doctorale IAEM Lorraine

Habilitation à diriger des recherches

Université de Lorraine

Présentée par

Hind BRIL EL HAOUZI

Maître de Conférences - 61ème section

Contribution à la conception et à l'évaluation des architectures de pilotage des systèmes de production adaptables : vers une approche anthropocentrée pour la simulation et le pilotage

Soutenance prévue le 11 décembre 2017 devant le jury composé de :

Rapporteurs :	Pr Pierre BAPTISTE	Ecole Polytechnique de Montréal
	Pr Valérie BOTTA-GENOULAZ	Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
	Pr Henri PIERREVAL	SIGMA Clermont
Examineurs :	Pr André THOMAS	Université de Lorraine
	Pr Damien TRENTESAUX	Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
	Pr Nathalie SAUER	Université de Lorraine

Table des matières :

Chapitre I : Introduction générale

I.1	Notre démarche de recherche	1
I.2	Environnement CRAN-TRANE.....	2
I.2.1	<i>Le contexte industriel.....</i>	<i>3</i>
I.2.2	<i>Le contexte de recherche</i>	<i>4</i>
I.2.3	<i>Les principales contributions dans ce double contexte.....</i>	<i>5</i>
I.2.3.1	Travaux de thèse.....	5
I.2.3.2	Verrous issus des résultats de ma thèse	6
I.2.3.3	Projet « Usine numérique »	7
I.3	Intégration à l'écosystème CRAN-ENSTIB	9
I.3.1	<i>Le contexte ISET.....</i>	<i>9</i>
I.3.2	<i>Le contexte ENSTIB</i>	<i>9</i>
I.3.2.1	La chaîne logistique forêt-bois.....	10
I.3.2.2	Les entreprises du secteur de l'ameublement.....	12
I.3.2.3	Les entreprises de la construction.	12
I.4	Synthèse des activités de recherche	13

Chapitre II : Modélisation des systèmes de pilotage adaptables... des paradigmes aux architectures...

II.1	Introduction.....	16
II.2	Définitions de base	20
II.3	Vue externe	20
II.3.1	<i>Finalité du système de pilotage</i>	<i>20</i>
II.3.2	<i>Environnement du système de pilotage.....</i>	<i>23</i>
II.4	Vue interne du système	24
II.4.1	<i>Vue fonctionnelle.....</i>	<i>24</i>
II.4.2	<i>Vue organique</i>	<i>25</i>
II.4.3	<i>Vue évolutionniste</i>	<i>26</i>
II.4.3.1	Phase 1 : régulation :	26
II.4.3.2	Phase 2 : adaptation fonctionnelle	28
II.4.3.3	Phase 3 : adaptation structurelle.....	35
II.4.3.1	Phase 4 : évolution structurelle	37
II.5	Paradigmes de modélisation des systèmes complexes-adaptables	38
II.5.1	<i>Modèles des systèmes complexes-adaptables.....</i>	<i>38</i>
II.5.2	<i>Vers une approche anthropocentrée</i>	<i>41</i>
II.6	Architectures d'implémentation	43
II.6.1	<i>Synthèse de l'état de l'art.....</i>	<i>43</i>
II.6.2	<i>Présentation de TRACILOGIS.....</i>	<i>44</i>
II.6.2.1	Le système opérant.....	44
II.6.2.2	Le système de pilotage.....	45
II.7	AVANCEES TECHNOLOGIQUES.....	49
II.7.1	<i>Introduction</i>	<i>49</i>
II.7.2	<i>Les CPS.....</i>	<i>49</i>

II.7.3	<i>Définition IoT</i>	49
II.7.4	<i>Différences entre IoT et CPS</i>	50
II.7.4.1	Une histoire de communautés ?	50
II.7.4.2	Une différence d'axe de synchronisation	50
II.7.5	<i>Industrie 4.0</i>	51
II.7.5.1	Une stratégie, une vision	51
II.7.5.2	Des paradigmes.....	51
II.7.5.3	Une architecture de référence.....	52
II.8	Bilan et discussions	53

Chapitre III : La simulation et la virtualisation pour les systèmes de production intelligents

III.1	Introduction	55
III.2	Ingénierie des modèles de simulation adaptables	63
III.2.1	<i>Simulation générique ou basée sur des Templates ou patrons (GTS)</i>	63
III.2.2	<i>Simulation dirigée par les données (SDD)</i>	65
III.2.3	<i>Simulation dirigée dynamiquement par des données (DDDS)</i>	67
III.2.4	<i>La simulation dirigée par les modèles (MDS)</i>	69
III.3	Conclusion	70

Chapitre IV : Projet de recherche et d'enseignement

IV.1	Projet de recherche	73
IV.1.1	<i>Hypothèses et motivations</i>	73
IV.1.2	<i>Les résultats attendus</i>	74
IV.1.3	<i>Cadre institutionnel</i>	74
IV.1.3.1	Au niveau local	74
IV.1.3.2	Au niveau régional	77
IV.1.3.3	Au niveau national	79
IV.1.3.4	Au niveau international	80
IV.1.4	<i>Organisation du projet</i>	82
IV.1.5	<i>La thématique modélisation anthropocentrée pour des modèles de simulation adaptables au cœur des nouveaux systèmes de pilotage</i>	84
IV.1.5.1	Directions de recherche proposées	84
IV.1.5.2	Pistes de collaboration.....	85
IV.1.5.3	Pistes de modes de financement :	86
IV.1.5.4	L'action exploitation des données multimodales pour la simulation	86
IV.1.5.5	L'action synchronisation des modèles de simulation et de pilotage	88
IV.1.6	<i>La thématique contribution aux architectures de pilotage et d'organisation des systèmes industriels durables</i>	89
IV.1.6.1	Directions des recherches.....	89
IV.1.6.2	Collaboration	91
IV.1.6.3	Mode de financement.....	91
IV.1.6.4	L'action entreprises cyber-physiques	91
IV.1.6.5	L'action contribution de l'industrie 4.0 à l'autonomie	93
IV.2	Projet d'enseignement	94
IV.2.1	TRACILOGIS : Un bus de formation de l'acquisition des données, à la prise de décision, en passant par le traitement de l'information	94
IV.2.2	UE Innovation et Industrialisation	95
IV.3	Projet de transfert technologique	96

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : L'HEURISTIQUE SYSTEMIQUE DE RECHERCHE ADOPTEE.....	2
FIGURE 2 : CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT ET LES PROBLEMES DE VARIABILITES.....	3
FIGURE 3 : PYRAMIDES DE CONTROLE SELON LES DEUX VISIONS CIM ET SCP.....	4
FIGURE 4 : POSITIONNEMENT DES 3 THESES CIFRE (COLLABORATION TRANE-CRAN).....	8
FIGURE 5 : LE CAMPUS BOIS.....	10
FIGURE 6 : UN EXEMPLE DE PLAN DE COUPE D'UN BILLON (WERY ET AL., 2014).....	11
FIGURE 7 : L'EVOLUTION DES ACTIVITES DE RECHERCHE ET COLLABORATIONS.....	14
FIGURE 8 : EVOLUTION DES BESOINS ET DES PARADIGMES DE PRODUCTION.....	17
FIGURE 9 : LA CLASSIFICATION DE « CHANGEABILITY » SELON (WIENDAHL ET AL., 2007).....	19
FIGURE 10 : L'APPROCHE CLASSIQUE DE LA PERFORMANCE SELON LE MODELE DE (GIBERT, 1980).....	21
FIGURE 11 : UNE APPROCHE PLURIELLE DE LA PERFORMANCE.....	22
FIGURE 12 : MODELES D'ENVIRONNEMENT DU SYSTEME DE PILOTAGE EXTRAITS (TRENTEAUX, 2002).....	23
FIGURE 13 : LE META-MODELE DE BEER.....	24
FIGURE 14 : LES COMPOSANTS DE LA RESILIENCE SELON (HOLLNAGEL, 2006).....	25
FIGURE 15 : LE REFERENTIEL DE L'EQUILIBRATION ADAPTE DE (LE MOIGNE, 1994).....	26
FIGURE 16 : UN EXEMPLE DE POINT DE DECOUPLAGE TIRE DE (THOMAS, 2004).....	27
FIGURE 17 : DES BOUCLES DE REGULATION PAR KANBAN.....	27
FIGURE 18 : LA STRUCTURE MRPII TIRE DE (THOMAS, 2004).....	28
FIGURE 19 : EXTRAIT DE L'ONTOLOGIE PROPOSEE DANS (GIOVANNINI ET AL., 2012).....	29
FIGURE 20 : LE CAS D'ETUDE UTILISE.....	30
FIGURE 21 : LES DIFFERENTES SOURCES DE VARIABILITE (GIOVANNINI, 2015).....	31
FIGURE 22 : ASSOCIATION DES CARACTERISTIQUES FONCTIONNELLES ET GEOMETRIQUES (GIOVANNINI ET AL., 2015).....	31
FIGURE 23 : PRINCIPE DE REPRISE D'UN PRODUIT (NOYEL ET AL., 2015).....	32
FIGURE 24 : DEFINITION DES REGLES D'ORDONNANCEMENT EN FONCTION DES ZONES DE SATURATION.....	33
FIGURE 25 : SCENARIO D'ETUDE.....	34
FIGURE 26 : LE FILM DE PRODUCTION D'UN PRODUIT (GAMME LOGIQUE).....	35
FIGURE 27 : MODELE DE PILOTAGE VIABLE EST SES DIFFERENTES PHASES D'EQUILIBRATION.....	38
FIGURE 28 : LA STRUCTURE DU « PRODUIT » INTELLIGENT SELON LE MODELE VSM [1].....	39
FIGURE 29 : LES COMMUNAUTES D'AGENTS POUR LA PLANIFICATION ET LE CONTROLE [1].....	40
FIGURE 30 : CADRE DE MODELISATION DES SYSTEMES ADAPTABLES CENTRE HOMME.....	42
FIGURE 31 : CADRE DE CARACTERISATION DES SYSTEMES COMPLEXES-ADAPTABLES.....	43
FIGURE 32 : SYSTEME OPERANT DE LA CELLULE CAD DE TRACILOGIS.....	44
FIGURE 33 : ZONE ASSEMBLAGE (C).....	45
FIGURE 34 : ZONE DE DECOUPLAGE (B).....	45
FIGURE 35 : LA STRUCTURE LOGICIELLE.....	45
FIGURE 36 : L'ARCHITECTURE DE PILOTAGE IMPLEMENTEE POUR LA PLATE-FORME TRACILOGIS.....	46
FIGURE 37 : PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT DES AGENTS PRODUITS ET RESSOURCES.....	47
FIGURE 38 : LA DECOUVERTE DE L'ENVIRONNEMENT DU PRODUIT ET SON CHOIX DE PARCOURS.....	47
FIGURE 39 : ILLUSTRATION DU COMPORTEMENT SWAP.....	48
FIGURE 40 : LES CPS AU CŒUR DES 3 TYPES D'INTERNET.....	50
FIGURE 41 : LA DIFFERENCE ENTRE IOT ET CPS SELON J LEE.....	51
FIGURE 42 : L'ARCHITECTURE RAMI (SOURCE).....	52
FIGURE 43 : DIFFERENCES ENTRE L'INITIATIVE I4.0 ET IIC.....	53
FIGURE 44 : INDICE DE MATURITE DE LA GESTION DE LA TRANSFORMATION NUMERIQUE DES ENTREPRISES.....	54
FIGURE 45 : LE DIGITAL TWIN.....	56
FIGURE 46 : LES NOUVELLES TENDANCES DE LA SIMULATION.....	56
FIGURE 47 : VENTILATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE DES CHERCHEURS EUROPEENS SELON LES RA.....	58
FIGURE 48 : COUVERTURE DES 7 DEFIS PAR L'ACTION DE RECHERCHE 1.....	59
FIGURE 49 : LES DEFIS A EXPLOITER LES POTENTIELS DE SIMULATION DANS LES USINES BASEES CPS.....	60
FIGURE 50 : CYCLE DE VIE PRODUIT ET PROCESSUS (TIRE DU PATHFINDER).....	61
FIGURE 51 : LES PRINCIPAUX OBJETS DE MODELISATION ET LEURS INTER-RELATIONS.....	64
FIGURE 52 : INTERFACE DU COMPOSANT « POSTE DE TRAVAIL ».....	64
FIGURE 53 : SCHEMA REPRESENTANT LE PILOTAGE DE LA CELLULE FRONT-END.....	65

FIGURE 54 : PLATE-FORME DE SIMULATION POUR LE PILOTAGE DE LA CELLULE FRONT-END	66
FIGURE 55 : SYSTEME D'AIDE A LA DECISION POUR L'OPTIMISATION DE LA TAILLE DES JOBS.....	66
FIGURE 56 : UNE REPRESENTATION CONCEPTUELLE DU CADRE DE SIMULATION TIREE DE (DUMETZ ET AL., 2017)	67
FIGURE 57 : LES CINQ NIVEAUX DE MATURITE DE L'ADAPTATION DES MODELES DE SIMULATION.....	68
FIGURE 58 : EXTRAIT DE LA MATRICE DE MATURITE POUR LES MODELES DE SIMULATION ADAPTABLES.....	69
FIGURE 59 : CONSTRUCTION DIRIGEE PAR LE MODELE	70
FIGURE 60 : LES APPROCHES DE VALIDATION SIL ET HIL (R.PANNEQUIN,2007)	71
FIGURE 61 : SITUATION D'USAGE DE LA SIMULATION DANS LA VIE DU SYSTEME DE PILOTAGE	71
FIGURE 62 : LES 3 PLATEFORMES DU PLATEAU TECHNIQUE TRACIOLOGIS	75
FIGURE 63 : EXTRAIT DE LA DEMARCHE DE DEPLOIEMENT DE L'USINE DU FUTUR DE LA REGION GRAND-EST	78
FIGURE 64 : SCHEMA DE REFERENCE DE FOF 2020-(EFFRA, 2012)	80
FIGURE 65 : CADRE DE PRIORISATION SELON AXES TRL/EFFORT POUR L'ORGANISATION DE MES ACTIONS DE RECHERCHE.....	83
FIGURE 66 : APPROCHES SYNCHRONIQUE ET DIACHRONIQUE SELON (MEINADIER, 98)	84
FIGURE 67 : LE REFERENTIEL TEMPS, ESPACE, FORME (LE MOIGNE, 1994).....	85
FIGURE 68 : L'INGENIERIE DIRIGEE PAR LES MODELES POUR LA SIMULATION	86
FIGURE 69 : EXTRAIT DE LA DEMANDE DE CPER ENTREPRISE CYBER-ENTREPRISE APPEL 2017-2018	88
FIGURE 70 : LA VISION DIGITALE TWIN SELON (WEYER ET AL, 2016)	88
FIGURE 71 : LA DURABILITE DANS LE CYCLE DE VIE DU PRODUIT SELON (BI, 2011)	91
FIGURE 72 : SCHEMA ADAPTE DE (KAGERMANN H., 2013).....	92
FIGURE 73 : SCHEMA EXTRAIT DU PROJET CPER (2015-2016)	93
FIGURE 74 : LES MODULES DE FORMATION UTILISANT OU QUI POURRONT UTILISER TRACIOLOGIS.....	95
FIGURE 75 : LES ETAPES DE NUMERISATION POUR LA FILIERE BOIS-FORET.....	97
FIGURE 76 : HEURISTIQUE DE RECHERCHE UTILISEE ET SYNTHESE DE NOS TRAVAUX.....	100

Avant-propos

Au cours des dernières décennies, les besoins des consommateurs ont évolué, de produits à bas coût et faiblement différenciés à des produits complexes et très personnalisés. Cette évolution, associée à des considérations environnementales et sociétales, a changé la nature des modèles de fabrication. Nous sommes passés de paradigmes où primait le besoin de réduire la complexité, de hiérarchiser et d'intégrer les différents niveaux de décision, à de nouveaux paradigmes où l'emportent les besoins de résolution de problèmes en temps réel, d'adaptabilité à un environnement changeant, de capacité à coupler des actifs physiques à leur image virtuelle et à faire converger les méthodes de l'intelligence artificielle, de l'automatique, du savoir-faire et de l'expertise des Hommes.

Tels sont les enjeux de la 4^{ème} révolution industrielle. Cette révolution implique des changements majeurs dans nos usines et chaînes logistiques. Ils sont rendus possibles, en particulier, par les avancées technologiques tant de l'information que de la communication et conduisent à l'émergence de nouveaux paradigmes basés sur les objets connectés : les Cyber-Physical-System (CPS) et l'Internet of Things (IoT). Ainsi, les produits, les conteneurs, les moyens matériels (machines, camions...) sans oublier l'Homme, pourront être dotés de nouvelles technologies d'identification et de communication pour capter, saisir des informations, observer, décider et communiquer. Les traditionnels systèmes centralisés de type ERP (Enterprise Resources Planning) et SCM (Supply Chain Management) pourront déléguer une partie des propositions de décisions qu'ils émettent, à ces « objets intelligents » afin d'améliorer *la résilience et l'adaptabilité*¹ face aux différentes exigences des consommateurs et aux aléas qui existeront encore dans l'usine du futur. Concevoir et piloter ces écosystèmes sociotechniques, capables de s'adapter à leur environnement changeant, constitue le grand défi des années à venir. Cela passera, notamment, par l'intégration transversale et multi-domaines au sein de l'usine, par la simulation numérique, par la réalité virtuelle ou augmentée, par l'intelligence artificielle et par le traitement des données massives et hétérogènes.

L'objectif de nos travaux est d'explorer de nouveaux usages de la simulation, en particulier la simulation à événements discrets, associée à d'autres outils de la modélisation géométrique, ou spatio-temporelle et à l'Intelligence Artificielle, afin d'aider à la décision pour la conception et le contrôle de ces nouveaux écosystèmes. La masse de données qui sera disponible grâce aux CPS et le besoin d'adaptabilité à un environnement changeant poussent à repenser les processus classiques d'aide à la décision. Ainsi, il s'agit de proposer de nouvelles approches de développement des modèles adaptables de simulation et de pilotage tirant profit de toutes les intelligences des éléments connectés, incluant l'Homme.

Ce mémoire a pour objectif de présenter une synthèse de mes travaux de recherche dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques et plus spécifiquement au niveau de l'aide à la décision à court et moyen termes par les outils de l'usine numérique : la simulation et la virtualisation.

Le bilan établi ainsi que le projet de recherche proposé sont complétés par la présentation de l'ensemble de mes activités et travaux d'enseignant-chercheur (enseignement, recherche, administration) sous la forme d'un *curriculum vitae* détaillé en annexe 1. L'annexe 2 rassemble, quant à elle, les principales publications se rapportant à mes activités de recherche.

¹ Ces deux concepts seront présentés dans le chapitre II

Chapitre I Introduction générale

*« La recherche a besoin de se spécialiser pour
apprendre et de s'ouvrir pour comprendre... »*

F. Kourilsky

I.1 NOTRE DEMARCHE DE RECHERCHE ...

Nos travaux de recherche s'intéressent à la modélisation, la conception et l'évaluation des systèmes intelligents de pilotage/contrôle. Le champ disciplinaire relatif au concept de pilotage est celui de la cybernétique. Les fondements de cette science transdisciplinaire ont donné naissance à plusieurs nouveaux développements parmi lesquels on trouve, entre autres, l'intelligence artificielle, la science de l'auto-organisation et la systémique. Pour appréhender la complexité des nouveaux systèmes de pilotage, induite par le concept de produit intelligent et plus récemment par l'émergence des CPS, de la ressource intelligente et de l'opérateur augmenté, notre démarche de recherche trouve ses sources dans l'école de la systémique (Le Moigne, 1994). Ainsi, pour chaque étude, nous avons considéré les deux axes selon (Durand, 1992) représentés dans Figure 1 :

- Un axe d'abstraction basé sur un raisonnement par analogie – pour passer d'un système d'intérêt à une classe de problèmes – et un raisonnement inductif afin de généraliser, par exemple, un objet concret du système d'intérêt par un objet abstrait du génie productique, automatique ou informatique. Les systèmes d'intérêt étudiés sont majoritairement des systèmes à événements discrets qui relèvent des domaines applicatifs de l'industrie ou du bâtiment.
- Un axe de concrétisation basé sur un raisonnement déductif afin de particulariser, par exemple, un méta-modèle générique par un modèle particulier du système étudié. Le raisonnement par pragmatisme se place souvent au niveau du savoir-faire et des expertises. Dans cette étape, nous avons utilisé notre savoir-faire de la simulation, de la virtualisation et de l'intelligence artificielle pour répondre aux problèmes posés par les systèmes d'intérêt.

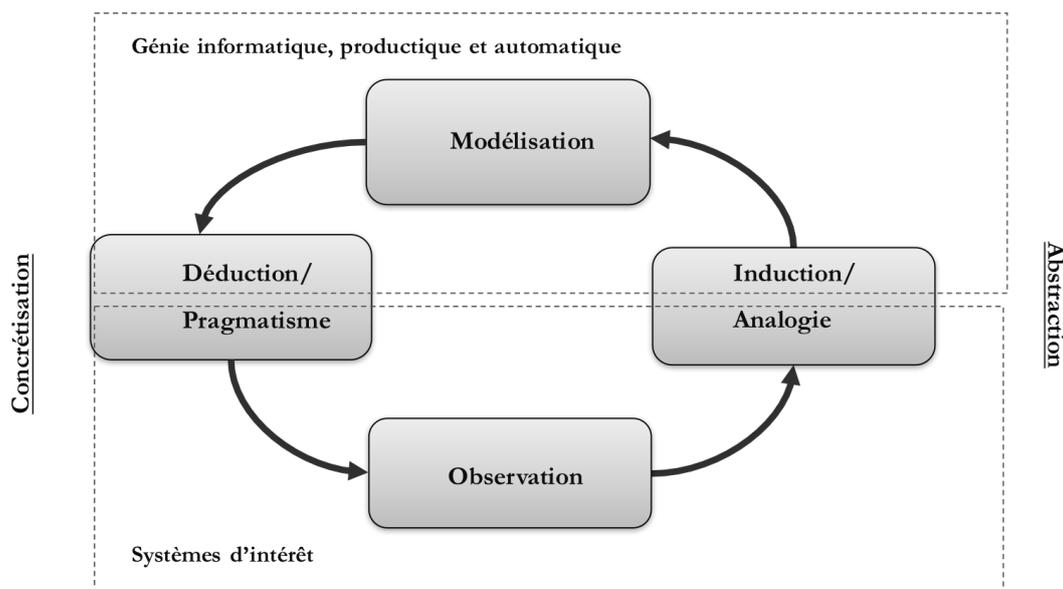


Figure 1 : l'heuristique systémique de recherche adoptée

Par conséquent, nos activités scientifiques correspondent à un compromis entre une recherche finalisée où nous avons cherché à apporter des solutions particulières de recherche et développement aux problématiques des architectures de systèmes intelligents de contrôle et une recherche plus fondamentale où nous avons tiré profit de ces applications pour rationaliser les résultats en proposant et en améliorant des approches de modélisation scientifiques. Pour favoriser la compréhension globale des systèmes d'intérêts, les approches que nous avons considérées sont principalement non analytiques, basées sur la simulation et la modélisation « graphique ».

Les systèmes d'intérêt trouvent leurs origines dans les deux environnements de recherche correspondant aux deux périodes d'activités liées à mon changement de statut, de chercheuse associée en industrie à maître de conférences dont l'enseignement est appliqué à la filière forêt-bois. Même si le cadre général reste le même et qu'il y a une continuité entre ces deux périodes de ma carrière, les lignes directrices et les moyens sont suffisamment différents pour justifier cette séparation.

I.2 ENVIRONNEMENT CRAN-TRANE

Avant de rejoindre l'Université de Lorraine en 2012 en tant que maître de conférences, mon parcours professionnel a commencé à l'entreprise TRANE en 2004 après un diplôme d'ingénieur en informatique de l'ESIAL². Il a été suivi par un poste d'ingénieur-doctorant CIFRE (2005-2008) dans le cadre d'une collaboration entre l'entreprise et le CRAN. Par la suite, je fus responsable du projet « usine numérique » au niveau des 9 sites de production européens et chercheuse associée à temps partiel au CRAN (de 2008-2012). Ainsi, mes premières activités de recherche trouvent leurs origines et leurs inspirations dans ce double contexte.

² ESIAL : Ecole Supérieure d'Informatique et d'Applications de Lorraine, désormais Télécom Nancy
Hind Bril EL HAOUZI

1.2.1 Le contexte industriel

L'entreprise TRANE³ est une entreprise américaine faisant partie du groupe INGERSOLL RAND⁴. Elle fabrique et industrialise une large gamme de produits de climatisation. Dans le cadre de mes missions au sein de l'entreprise, j'ai eu l'opportunité de travailler sur plusieurs sites de production en Europe. Malgré les différences qu'il peut y avoir au niveau de la taille et des marchés visés par ses différents sites, la stratégie de production reste néanmoins invariante. Celle-ci est caractérisée par une forte individualisation des produits avec une production en gros volume.

Nous sommes, donc, dans un contexte de personnalisation de masse où la variété des produits est grande et le cycle de vie est très court. La gestion de cette variabilité de produits et de services par la maîtrise de l'information et de la connaissance tout le long de la chaîne de valeur a été, et reste, un enjeu majeur pour l'entreprise (Figure 2). Ce contexte n'est pas propre à l'entreprise TRANE ou à ce secteur et peut être généralisé à d'autres secteurs comme par exemple celui de l'automobile ou de l'industrie du meuble.

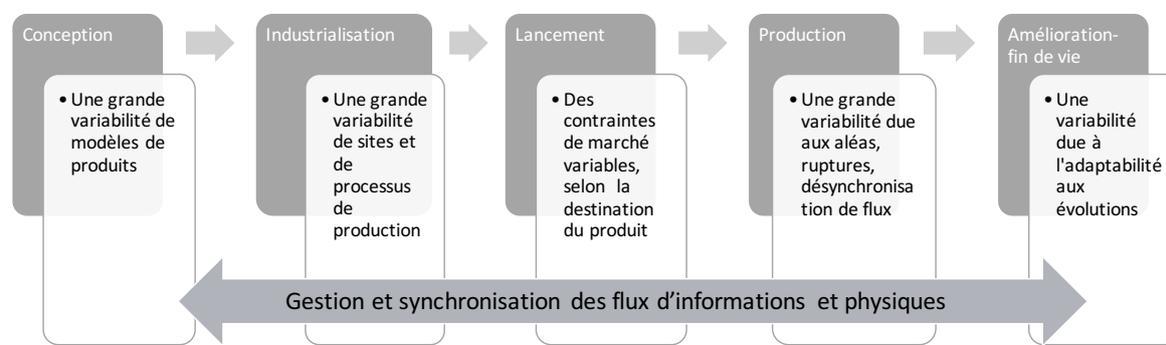


Figure 2 : cycle de vie d'un produit et les problèmes de variabilités

Face à cette variabilité de produits, la personnalisation de masse implique de répondre à des besoins de réduction de coût (stockage, industrialisation, ...). C'est dans cette optique que l'entreprise a adopté la philosophie « Juste à Temps » (JiT) sous plusieurs formes : le Lean manufacturing (Womack and Jones, 2003), le Six-sigma (al et al., 2000) et la Demand Flow Technology (DFT) (Costanza, 1996). Ces méthodes (en particulier la DFT) impliquent une gestion logistique en flux tirés et conduisent à une standardisation stricte des processus de fabrication en lignes d'assemblage avec des lignes d'approvisionnement appelées « feeders ». La conception et le dimensionnement sont vérifiés analytiquement afin d'assurer une adaptabilité au profil de la demande. Néanmoins, ces calculs ne permettent pas de prendre en compte la variabilité « plus dynamique » induite par le caractère naturellement fluctuant des processus de fabrication. En effet, des files d'attente peuvent se créer, d'une part à cause du déséquilibre de charge entre les différents postes et d'autre part à cause des problèmes liés à la synchronisation des flux matières entre une ligne d'assemblage et ses feeders. Forte de l'intégration de systèmes d'information de type ERP/PLM/CAO⁵ et de son expérience en amélioration continue, l'entreprise a acquis la conviction que la transition vers le numérique et l'introduction des nouvelles technologies d'identification permettront de répondre à ses

³ <http://www.trane.com/Index.aspxIngers>

⁴ <http://company.ingersollrand.com/ircorp/en/index.html>

⁵ ERP/PLM/CAO : Entreprise Resource Planning/Product Life-cycle Management/Conception Assistée par Ordinateur
Hind Bril EL HAOUZI

problèmes de gestion d'informations et de synchronisation des flux dans toute sa chaîne logistique. Par conséquent, elle pourra acquérir les capacités de résilience et d'adaptation aux différentes sources de variabilité sur toute la chaîne de valeur présentée dans la Figure 2.

1.2.2 Le contexte de recherche

Au cours de la même période, au début des années 2000, le CRAN et en particulier l'équipe projet Systèmes Contrôlés par le Produit (SCP) dirigée par le Pr Gérard Morel, a fait des systèmes intelligents de production une cible prioritaire (cf. rapport d'activité du CRAN, 2004-2007). Comme prôné par l'initiative Intelligent Manufacturing System (IMS)⁶ et à l'instar des travaux de McFarlane de l'université de Cambridge (McFarlane et al., 2003) ou aux travaux de (Valckenaers, 2001) de l'université de Louvain, le projet SCP postule que le produit porteur de l'information peut être un acteur majeur dans la prise de décision dans les systèmes de production.

Ainsi, ce paradigme, a renversé la pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing) classique du contrôle avec, à son sommet, le niveau de système de pilotage de l'entreprise et, à sa base, capteurs et actionneurs, vers une pyramide où tous les niveaux doivent communiquer entre eux et où le produit est lui-même intelligent (Morel, 2006). Nous sommes passés d'une architecture de pilotage top-down à une architecture pilotée par le produit.

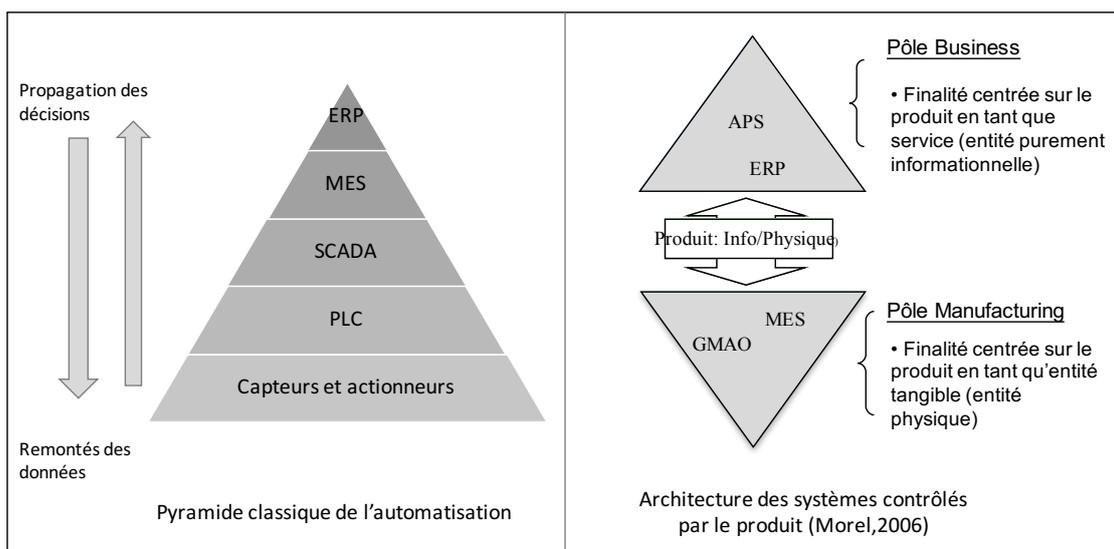


Figure 3 : pyramides de contrôle selon les deux visions CIM et SCP

Autour de ce paradigme, plusieurs thèses du laboratoire ont donné lieu à des interprétations, des modèles et des outils plus au moins différents. Ainsi, la thèse de (Baïna, 2006) et celle de (Tursi, 2007) considèrent le produit instrumenté comme l'acteur principal de l'interopérabilité B2M (Business to Manufacturing) (cf. Figure 3). (Gouyon, 2001) a exploré l'usage des techniques de synthèse pour rendre actif le produit dans la boucle de contrôle bas niveau.

Depuis 2002, les thèses sous la direction du Pr André Thomas ont prôné par conviction (et démonstration) que, dans des applications industrielles, seules des architectures de pilotage couplant des approches centralisées et distribuées (appelées hybrides) étaient crédibles. Ainsi la thèse de (Pannequin, 2007) a étudié la mise en œuvre du concept SCP par des systèmes de pilotage hybride et a proposé un outil de modélisation et d'évaluation de ces systèmes. Les deux

⁶ IMS : <http://www.ims.org/2011/11/hms---phase-i-and-ii-holonic-manufacturing-systems/>
Hind Bril EL HAOUZI

thèses CIFRE (Klein, 2008) (El-Haouzi, 2008) avaient comme objectif principal de démontrer la crédibilité et la validité du concept SCP à l'échelle industrielle. La contribution de la thèse de Klein consiste en l'instrumentation du Kanban, le rendant actif pour assurer l'interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué dans un contexte de production gros volume « batchés » (flow shop). Notre interprétation du SCP nous a conduit à porter une réponse aux problèmes de synchronisation des flux physiques dans un contexte de production unitaire en rendant le produit ou un groupe de produits (kanban) actifs dans un système de pilotage hybride.

Depuis, d'autres thèses du laboratoire ont continué à avoir comme objet d'étude des architectures de pilotage hybride (Herrera, 2011) (Manceaux, 2015)...

Au niveau national, ces architectures restent d'actualité ; la communauté du groupe de travail IMS2 (Intelligent Manufacturing & Services Systems) du GDR MACS a particulièrement travaillé sur cette problématique et a montré toute la difficulté à proposer une généralisation de ces architectures hybrides, en particulier pour la synchronisation entre les décisions prises de manière centralisée et celles prises de manière distribuée (Cardin et al., 2017). Au niveau international, ce sujet reste aussi d'actualité pour le comité technique TC 5.1 de l'IFAC, du groupe de travail WG 5.7⁷ de l'IFIP, ou le comité STC O⁸ du CIRP et à travers des workshops comme SOHOMA⁹, HOLOMAS¹⁰ et IMS¹¹.

1.2.3 Les principales contributions dans ce double contexte

1.2.3.1 Travaux de thèse

L'objectif de ma thèse était de proposer une méthodologie pour l'intégration et le développement de Systèmes Contrôlés par le Produit (SCP). Celle-ci avait pour vocation de permettre d'implémenter une architecture de contrôle par kanbans et/ou produits « actifs » pour résoudre les problèmes de synchronisation de l'entreprise entre les flux physiques de produits d'une part, et entre les flux physiques et les flux d'informations nécessaires au pilotage d'autre part.

La problématique scientifique induite par le problème industriel a conduit à la proposition d'une méthodologie de conception et d'intégration des SCP. Cette méthodologie s'appuie sur l'approche d'ingénierie de projet « six-sigma », en particulier sur la démarche DFSS (Design for Six-Sigma) pour piloter le projet de conception du SCP par des indicateurs issus des besoins des utilisateurs. Ainsi le facteur humain a été pris en compte dès le début de la conception. L'enrichissement de l'approche six-sigma par la simulation événementielle a permis, dans un premier temps, de concevoir l'architecture la plus pertinente au regard des indicateurs de performance retenus et dans un deuxième temps de valider *a priori* l'intégration du SCP ainsi conçu dans son environnement. Dans tous nos travaux de recherche, nous avons eu la volonté de différencier le modèle du système de contrôle (ou pilotage), le modèle du système opérant et le modèle d'informations dans le développement des modèles de simulation. Cette différenciation est motivée à la fois par des besoins pratiques et structurels, mais aussi par le besoin de réutilisation afin de tester différentes stratégies de pilotage sans devoir changer le

⁷ WG 5.7 : Advances in Production Management Systems

⁸ STC O : Production Systems and Organizations

⁹ SOHOMA : Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing

¹⁰ Holomas : Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing

¹¹ IMS : Intelligent Manufacturing Systems – IFAC Workshop

modèle du système physique. Dans l'article (El Haouzi et al., 2009), nous avons proposé une méthodologie basée sur la systémique et la théorie du système général pour le développement de ces modèles de simulation permettant de répondre aux problèmes de modularité et de réutilisabilité.

Depuis 2008, dans le but d'améliorer la productivité, la qualité et de réduire les coûts des 9 sites européens de l'entreprise, mes travaux se sont intéressés à l'usine numérique. Exprimé de manière synthétique, le concept de « Digital Factory » recouvre un ensemble de modèles, méthodes et outils de la simulation et de la 3D pour appuyer la planification d'entreprise et son exploitation (Wenzel et al., 2005) (Chen et al., 2010) (Pach et al., 2014) (Gregor and Medvecky, 2010). En particulier, je me suis intéressée à l'apport de l'usine numérique aux chaînes logistiques dans le contexte de la personnalisation de masse où la flexibilité et l'adaptation dynamique du système de production sont devenues des enjeux majeurs. Ces thématiques intéressent également le département Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques (ISET) du CRAN, en particulier l'équipe Systèmes à Intelligence Ambiante (SIA) mais aussi les groupes thématiques FL et IMS2 du GDR-MACS.

Ainsi, dans ce double contexte CRAN-TRANE, les verrous scientifiques que nous avons étudiés par la suite, sont issus :

- des résultats et des ouvertures offertes par ma thèse ;
- du projet « Digital Factory /usine numérique » que j'ai initié et promu avec mes responsables dans l'entreprise TRANE.

1.2.3.2 Verrous issus des résultats de ma thèse

A travers le retour d'expérience des différentes applications développées dans le cadre de mes travaux de thèse (e-kanban, systèmes de traçabilité et d'information), nous avons fait la démonstration d'un constat fait de très longue date par les pionniers de la gestion de production (Plossl, 1993) que la résolution des problèmes de synchronisation et de contrôle des flux physiques ne peut s'obtenir que via une synchronisation des flux physiques et des flux d'informations. Ceci induit de résoudre le problème de « myopie » inhérent aux modes de pilotage distribués ou réactifs. Ce problème a été largement étudié ces dernières années (Pach et al., 2014). Ainsi, dans le cadre des deux Masters de (Guion et al., 2011) et (Talibi et al., 2013), nous avons montré la pertinence du Kanban instrumenté (e-kanban) pour une adaptation dynamique du nombre de cartes de Kanban en fonction des évolutions de la demande (concept de « kanban dynamique »). Nous avons proposé une approche proactive pour le pilotage d'une cellule de fabrication, en utilisant une plate-forme de simulation constituée d'un modèle d'émulation, un ETL¹² pour l'extraction des données structurelles (postes de travail, gammes ...) et dynamiques (le plan de production et les données de traçabilité des cartes Kanban) ainsi que des règles de pilotage permettant de générer des « extra-cartes » pour pallier la variabilité des demandes clients et des retards de la production (Talibi et al., 2013). Ce problème reste toujours d'actualité et mobilise des chercheurs en France et à l'international (Belisário et al., 2015).

Par ailleurs, notre thèse a permis, d'un point de vue applicatif, de mettre en place un système de traçabilité et de pilotage permettant de synchroniser les lignes d'assemblage avec leurs feeders en cas de perturbations. Il s'agissait d'un outil d'aide à la décision dans lequel l'opérateur, en fonction de l'état d'avancement des produits et avec des règles simples, choisi de changer de poste en allant vers l'amont ou l'aval, ou le cas échéant de changer le

¹² ETL : Extract Transform Load, une technique informatique intergicielle
Hind Bril EL HAOUZI

séquencement de la ligne. C'est pour exploiter un autre levier d'action, appelé «rééquilibrage des lignes d'assemblage» que nous avons lancé, en avril 2012, la thèse d'Antoine Manceaux en collaboration entre l'entreprise TRANE et le CRAN. L'objectif étant de réaffecter dynamiquement et de façon réactive des tâches au poste de travail pour lisser la charge et donc de retrouver un état d'équilibre. La contribution de cette thèse a été la proposition d'une méthode de modélisation, basée sur des réseaux d'automates communicants (Manceaux, 2015). La solution (le nouveau rééquilibrage) est obtenue par une recherche d'atteignabilité sur ce réseau d'automates communicants.

Des travaux en collaboration avec le laboratoire LORIA ¹³ sont toujours en cours pour tester les performances des méthodes de résolution, de type méta-heuristiques ou exactes, pour le rééquilibrage dynamique en fonction des caractéristiques de l'instance du problème (la position du retard, la durée, le nombre de tâches à réaffecter) (Manceaux et al., 2016) (Clavier et al, 2017).

1.2.3.3 Projet « Usine numérique »

Par ailleurs, pour faire face aux enjeux de partage et d'exploitation de l'information dans l'entreprise TRANE, le projet « usine numérique » a été initié en 2010. Le but était de promouvoir la dématérialisation (« 0 » papier), l'usage des outils de simulation et de la maquette numérique 3D appelée BIM (Building Information Modeling) dans le contexte de la construction.

Les premiers travaux dans ce projet, notamment le master Ingénierie des Systèmes Complexes (ISC) d'Antonio Giovannini, concernaient la numérisation et l'automatisation des processus de conception et de transformation du produit, depuis les spécifications client, jusqu'aux modèles 3D et les fichiers de paramétrage et de commande numérique pour la cellule de fabrication de pièces de tôlerie. Suite à ce master, la thèse de (Giovannini, 2015), conduite sous la direction du Pr H. Panetto, s'est intéressée au développement d'un cadre de modélisation de la connaissance pour la conception de familles de produits, basé sur l'école « antilogicisme » ¹⁴. Les travaux sur les systèmes développés à partir des principes de cette école de représentation de la connaissance montrent à travers des applications concrètes dans les domaines de la robotique ou des systèmes multi-agents que les comportements intelligents peuvent être obtenus sans avoir recours à un raisonnement fondé sur la logique classique et de moteurs d'inférence. Ce cadre a permis de développer une variété « rationalisée » de couples produit-processus à partir des exigences clients définies au préalable.

Ainsi, le schéma de la Figure 4 résume l'apport et le positionnement des trois thèses conduites dans le cadre de la collaboration entre l'entreprise TRANE et le CRAN.

¹³ LORIA : Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications

¹⁴ Il est possible de raisonner sur les connaissances au niveau de l'Intelligence Artificielle sans passer par une méthodologie basée sur la logique (classique) ou autres comme la logique floue, logique modale qui seront expliquées dans le chapitre II

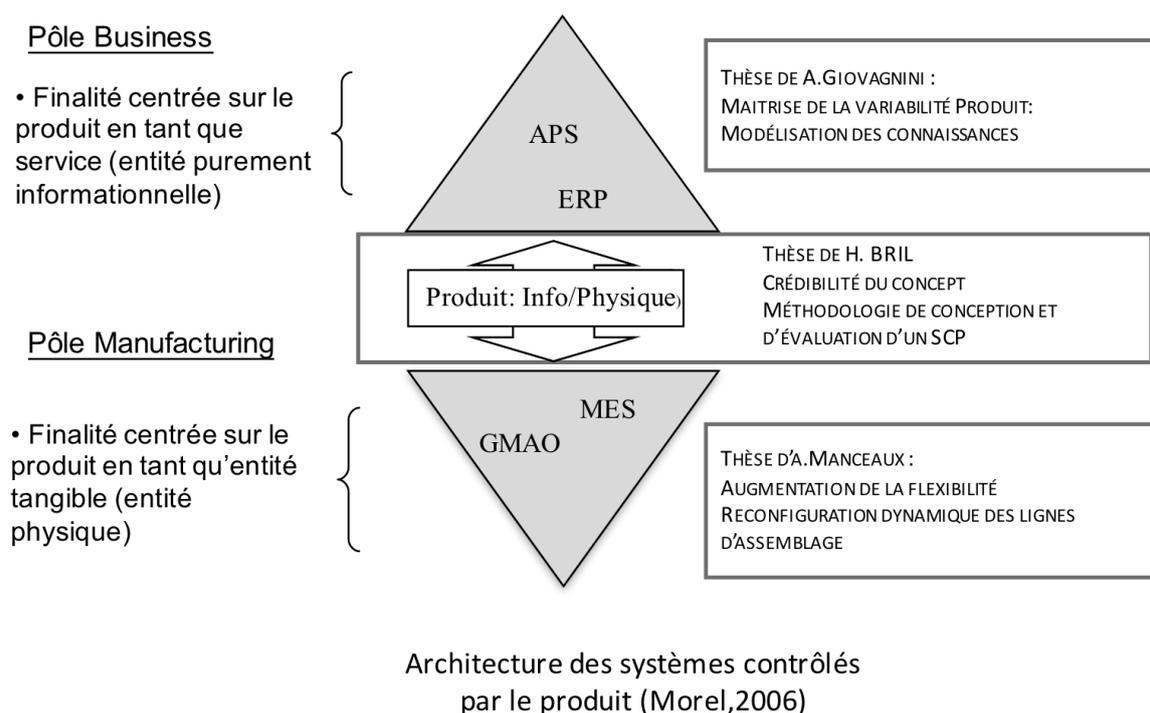


Figure 4 : positionnement des 3 thèses CIFRE (collaboration TRANE-CRAN)

Les trois thèses ont en commun une motivation industrielle principale qui est **la maîtrise de la variabilité** dans tout le cycle de vie du produit. La variabilité est induite :

- lors de la conception des produits par la diversité proposée aux clients ;
- lors de l'industrialisation par la diversité des sites de production ;
- par les évolutions des processus de fabrication induites par l'amélioration continue ou les aléas du terrain ;
- par les évolutions des produits induites par les changements des exigences clients (cf. Figure 2).

Au niveau technologique, les trois thèses ont permis de promouvoir les outils de l'usine numériques : la maquette numérique, la simulation à événements discrets, ou les automates communicants dans le cadre du projet stratégique « l'usine numérique » de l'entreprise TRANE.

Au niveau scientifique, les trois thèses ont pris comme hypothèse que le produit est un élément central et actif dans la boucle de décision et dans le partage de la connaissance et des informations. Les contributions principales de chacune des thèses peuvent être résumées ainsi : les travaux de ma thèse avaient comme objectif principal de montrer la crédibilité industrielle du concept SCP par le développement d'une méthodologie de conception et d'évaluation grâce à l'usage de la simulation. Nous avons proposé de faire inter-opérer, via le produit instrumenté, des systèmes de pilotage à « finalité Business », comme les ERP, avec des applications à « finalité Manufacturing » comme le e-kanban ou le MES. La thèse d'Antoine Manceaux avait comme objectif de répondre à la problématique de flexibilité, d'adaptabilité et de réactivité à court terme, au niveau des lignes d'assemblage. Elle s'était intéressée plutôt aux processus et avait donc une « finalité Manufacturing », alors que la thèse d'Antonio Giovagnini a mis l'accent sur le produit en tant qu'entité informationnelle en proposant un cadre de modélisation des connaissances centrées produit pour réduire la variabilité et accélérer la phase de conception et d'évolution des produits. Cette thèse a permis de montrer un usage plus complet du concept

« usine numérique » en proposant, dans l'esprit du BIM adopté par l'entreprise depuis 2008, une plate-forme basée sur des modèles géométriques 3D enrichis par des informations techniques et logistiques et associés à un modèle d'optimisation par contraintes pour optimiser et évaluer le nombre optimal de variantes de produits en fonction des exigences clients, voir du processus de fabrication.

I.3 INTEGRATION A L'ECOSYSTEME CRAN-ENSTIB

Ma nomination en 2012, à l'Université de Lorraine en tant que maître de conférences a fait évoluer mes centres d'intérêt et aussi les défis scientifiques que je souhaitais explorer. C'est dans le double contexte ENSTIB¹⁵, ma composante d'enseignement, et CRAN, mon laboratoire de rattachement et en particulier le département ISET, que nous avons trouvé nos sources d'inspiration.

I.3.1 Le contexte ISET

Le département "*Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques*" s'intéresse à la modélisation de processus d'évaluation et de prise de décisions nécessaires pour contrôler et piloter des systèmes complexes. Les systèmes étudiés sont majoritairement des Systèmes à Événements Discrets qui relèvent des domaines applicatifs de l'industrie, des réseaux de communication et de l'énergie. En plus des performances classiques recherchées dans ce type de systèmes, le département s'intéresse aussi aux enjeux sociétaux et environnementaux nécessitant de faire interagir et inter-opérer des constituants de natures différentes : (cf. Rapport d'activité 2012-2017).

Les travaux du département se déclinent sur trois projets scientifiques :

- *L'ingénierie globale de la sûreté de fonctionnement du système (équipe projet Sûreté de Fonctionnement Système)*
- *L'ingénierie du pilotage des flux physiques ou d'énergies du système (équipe projet Systèmes à Intelligence Ambiante)*
- *L'ingénierie des réseaux de communication (équipe projet Systèmes de Communications Contraintes)*

Nos travaux s'intègrent dans le deuxième projet. Il se sont intéressés d'une part, à des architectures hybrides de pilotage et à leurs mécanismes de synchronisation (Zimmermann et al., 2017b), (Manceaux, 2015), (Zimmermann et al., 2017c), (Mezgebe et al., 2017) et d'autre part, à l'ingénierie des modèles de simulation adaptables pour tirer profit des masses de données générées par les CPS (Haouzi et al., 2013) et la formalisation de la connaissance dans le cadre de la personnalisation de masse (Giovannini, 2015).

I.3.2 Le contexte ENSTIB

Mon intégration à l'ENSTIB en tant qu'enseignante m'a permis d'explorer d'autres contextes d'application et d'autres problématiques liés à la filière forêt-bois. Le bois est un matériau devenu stratégique par son caractère renouvelable, recyclable et sa contribution à la lutte contre les changements climatiques de par son effet « puits de carbone ». Dans sa stratégie, l'ENSTIB s'est donné comme objectif d'être présente sur tous les maillons de la filière en délivrant des diplômes sur l'ensemble du système européen LMD. Les cadres formés sont

¹⁵ ENSTIB : Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois

destinés à occuper des fonctions en production, en bureaux d'études et architecture, en conduite de travaux, en logistique, en gestion et management, en conseil, en qualité et en recherche et développement. Pour atteindre cet objectif, l'ENSTIB, en s'appuyant sur les laboratoires hébergés, développe une activité en recherche, en innovation et en transfert technologique en s'appuyant sur un campus thématique : le Campus Bois. Il regroupe trois laboratoires de recherche : le LERMAB¹⁶, l'IJL¹⁷ et le CRAN, deux organismes de transfert : le CRITT BOIS¹⁸, le CETELOR¹⁹, un pôle de compétitivité et un campus des métiers et des qualifications (cf. Figure 5).

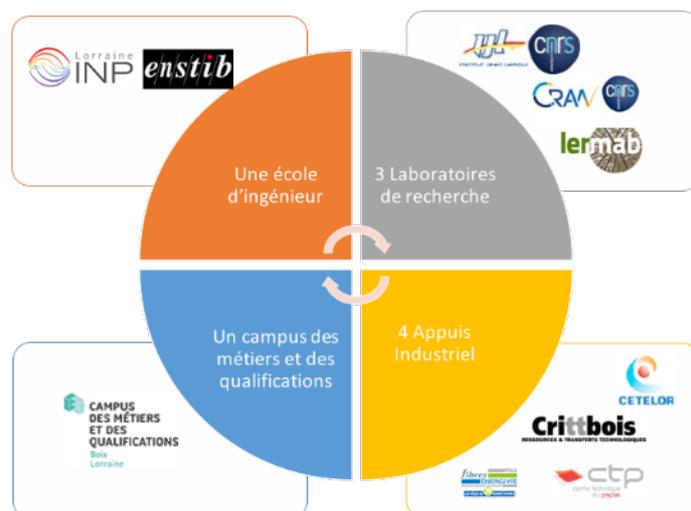


Figure 5 : le Campus Bois

En plus de tous ces partenaires potentiels, l'école a tissé des stratégies d'alliance avec d'autres écoles (Ecole d'Architecture de Nancy, Agro-ParisTech) et un tissu socio-économique riche constitué essentiellement de TPE et de PME. Ainsi, il était pour moi important et opportun d'associer cette nouvelle dimension au cadre de ma réflexion afin d'élargir le champ des possibilités de travail et de développement. Nous avons donc exploré trois nouveaux champs d'actions liés à cet écosystème : la chaîne logistique forêt-bois, les entreprises d'ameublement et les entreprises de la construction.

1.3.2.1 La chaîne logistique forêt-bois

La représentation générale de la chaîne logistique forêt-bois est semblable à celle d'une entreprise d'un autre secteur (approvisionnement, transformation, vente aux clients). Le processus de première transformation mis en œuvre dans les scieries fait toutefois apparaître certaines particularités. La matière première issue de la forêt est, par nature, hétérogène. Elle se caractérise par une diversité en termes de qualité, de section et de longueur. La mesure de la qualité interne de la matière première est par ailleurs très compliquée à mettre en œuvre. La scierie doit alors tenir compte de cette hétérogénéité et utiliser au maximum ce que la forêt produit pour satisfaire les attentes des clients tout en optimisant ses performances. Satisfaire les demandes des clients est difficile car le sciage d'une section particulière entraîne la

¹⁶ LERMAB : Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois

¹⁷ IJL : Institut Jean Lamour

¹⁸ CRITT : Centre de Ressources, d'Innovation et de Transfert de Technologies

¹⁹ CETELOR : Centre d'Essais Textile Lorrain

génération de plusieurs produits en même temps ; c'est un processus divergent associé à de la co-production (cf. Figure 6). La planification de la production et des expéditions dans ce contexte est par conséquent difficile et n'a pu, à ce jour, être résolue que via un système de production sur stock. Les coûts de stockage d'une part et l'aléa des ventes d'autre part, rendent ainsi la planification et la maîtrise des coûts de fonctionnement difficiles.

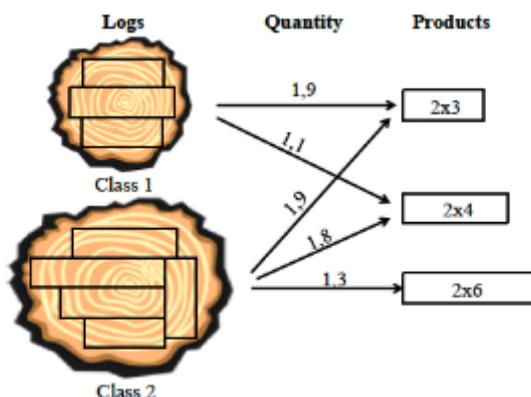


Figure 6 : un exemple de Plan de coupe d'un billon (Wery et al., 2014)

Ainsi la thèse, de Ludwig Dumetz que nous co-encadrons, avec le Pr André Thomas dans le cadre d'une collaboration avec le Pr Jonathan Gaudreault, de l'Université de Laval, a pour objectif de proposer aux décideurs des scieries un outil d'aide à la planification tactique et opérationnelle. Cet outil est basé sur la simulation à événements discrets couplée à des modèles d'optimisation de quelques processus clés (Dumetz et al., 2016), (Dumetz et al., 2017).

Les expériences et les travaux antérieurs du CRAN (Almecija, 2013), (Jover et al., 2013), qui ont permis de proposer de nouvelles approches d'identification et de caractérisation du matériau bois couplées à des outils d'aide à la décision comme le sciage virtuel, nous ont poussé, depuis septembre 2017, à élargir cette collaboration vers de nouvelles problématiques initiées par le co-encadrement d'un master de recherche. L'objectif est de tirer profit des outils de virtualisation et de scan 3D afin d'accélérer le processus d'aide à la décision dans l'allocation des bois aux scieries et aussi de remettre en cause la fabrication sur stock largement utilisée dans la filière bois (Jover et al., 2013). Les premiers travaux de recherche du master (Selma et al., 2017) ont pour objectif de coupler un des simulateurs utilisé par le consortium de recherche FORAC²⁰ (simulateur Optitek) pour l'allocation des bois forêt-scierie avec une application de classification mesurant la ressemblance entre des scans 3D des billons pour prévoir la production associée d'un nouveau billon.

Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche ont été menés pour développer des outils numériques pour la planification du processus de sciage. Une voie qui a été explorée est l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour prédire les caractéristiques des produits résultant du sciage d'un billon par une scierie en se basant sur quelques caractéristiques de ce dernier (Morin et al., 2015). Avec cette méthode, il est alors possible de décider quel billon utiliser et à quel moment en fonction des commandes des clients. Une autre façon de prévoir la production associée à un nouveau billon X, est d'observer à quel autre billon Y, déjà découpé dans le passé, il ressemble le plus. Cela suppose donc qu'il faut pouvoir comparer deux billons X et Y en observant leurs scans 3D et indiquer leur niveau de ressemblance.

²⁰ FORAC est un consortium de recherche en partenariat entre les intervenants de l'industrie des produits forestiers canadiens (Université Laval, entreprises et gouvernements). Il regroupe des compétences en foresterie, génie industriel et mécanique, informatique et génie logiciel, ainsi qu'en administration <http://www.forac.ulaval.ca>

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, tant au niveau recherche qu'au niveau transfert et feront en partie l'objet du projet ANR LABCOM que nous menons avec le CRITT BOIS. Ce projet sera détaillé dans notre projet de transfert au chapitre IV.

1.3.2.2 Les entreprises du secteur de l'ameublement

En France, le marché de l'ameublement est très concurrentiel du fait de la mondialisation et tout particulièrement de la concurrence chinoise basée sur une production à bas coûts. Les PME du secteur souffrent aussi de la présence d'un grand nombre d'acteurs, avec une prédominance de groupes ou centrales multi-enseignes (ex. Salm, Snaidero, Fournier) mais aussi de la montée en puissance des généralistes de l'ameublement sur des segments traditionnellement occupés par les spécialistes (cuisine, literie, etc.). C'est pourquoi les PME du secteur cherchent à se différencier en misant sur le haut de gamme, sur l'innovation à la fois au niveau produit ou service (Internet marchand, conception 3D...) mais aussi sur l'innovation dans leurs processus industriels. C'est dans ce contexte que nous codirigeons une thèse CIFRE avec Philippe Thomas (MdC-HDR au CRAN) dans le cadre d'un partenariat avec ACTA-MOBILIER. L'entreprise ACTA-MOBILIER est une PME de 150 salariés, elle a deux activités stratégiques : la sous-traitance pour des groupes multi-enseignes comme la SALM (connue par l'enseigne cuisines Schmitt) et l'agencement de magasins ou stands pour des constructeurs automobiles par exemple. Son offre se caractérise par des produits avec de fortes exigences techniques et de qualité (laquage de très haut de gamme). Une première thèse (Noyel et al., 2015) dans le cadre de ce partenariat a permis de rationaliser les flux en mettant en place un MES, un système de prédiction de la qualité et en caractérisant et restructurant les flux physiques facilitant ainsi l'identification et le suivi du flux. La thèse d'Emmanuel Zimmermann qui lui succède a pour but de proposer un système de pilotage hybride, basé sur des lots intelligents et des optimiseurs locaux des 6 postes de charge de l'entreprise, pour garantir les performances globales mais aussi la réactivité aux aléas liés aux perturbations des flux par les nombreuses boucles de retours.

1.3.2.3 Les entreprises de la construction.

Une grande partie ²¹ des étudiants de l'ENSTIB sont destinés à travailler dans le secteur de la construction. Ainsi nous avons, par volonté de préparer nos étudiants aux défis de l'industrialisation et de la transformation numérique du secteur, travaillé sur deux nouveaux paradigmes : le « Lean construction » et la « maquette numérique » dont l'autre nom est le Building Information Modeling (BIM). Nous avons ainsi depuis 2013, travaillé sur ces sujets et en particulier encadré et co-encadré plusieurs masters de recherche et projet de fin d'études de l'ENSTIB en lien avec ces deux paradigmes (Castanedo, 2015), (Huin and Beck, 2013), (Albin, 2014), (Claude, 2014). En effet, plusieurs études montrent le retard pris par la construction, en particulier française, dans le domaine de l'efficacité industrielle et l'utilisation de démarche d'amélioration continue (Dupin et al., 2014). Après de nombreuses réflexions sur le parallèle entre l'industrie manufacturière et celle de la construction, la création et l'adaptation de méthodes de production et de gestion ont permis de transposer la philosophie du Lean Manufacturing à la construction. La principale différence entre l'industrie et la construction réside dans les flux et leurs mouvements. Dans le monde de la construction, le produit est, sur le chantier, fixe et complexe, induisant aussi un nombre très important d'intervenants. Ce sont les Hommes et les ressources matérielles qui créent un flux et non les pièces comme dans un

²¹ 60% des diplômés de l'ENSTIB travaillent dans le secteur de la construction d'après l'AIENSTIB (Association des Ingénieurs ENSTIB)

système industriel traditionnel (Koskela, 1992), (Koskela, 2004). Ce sont ces caractéristiques qui modifient intégralement la manière de penser et de gérer un chantier Lean construction. Mais pour autant, elles ne remettent en cause aucun des concepts fondamentaux de la gestion industrielle. Le CRAN s'est intéressé à l'ingénierie numérique pour la construction depuis 2012 par la création d'un projet transversal fédérateur nommé INC bois (Ingénierie Numérique pour la Construction).

Au niveau recherche, nous avons co-encadré deux masters. Le premier projet était celui d'Emilie Claude, avec l'entreprise Bouygues, qui avait pour objectifs l'optimisation de la préfabrication des éléments modulaires et leur installation sur chantier. Une heuristique d'optimisation de planning a été proposée. Pour valider cette heuristique, une plate-forme de simulation BIM 4D a été proposée. Celle-ci est composée d'une maquette BIM couplée à un modèle de planification permettant de simuler l'avancement du chantier pour étudier les contraintes dynamiques liées à la fois au temps et à la géométrie. Le deuxième projet a été mené dans le cadre du master Jérôme Albin avec le CERIB²². Il avait pour objectif de faire la preuve du concept SCP dans le système logistique de construction des bâtiments. La démonstration a été faite en instrumentant des poutres en béton et en mettant en place un système d'information pour des besoins de traçabilité réglementaire (marquage CE) mais aussi de traçabilité opérationnelle pour le suivi et le pilotage de toute la chaîne logistique de ces composants. Ces projets nous ont permis de dresser des verrous scientifiques que nous souhaitons étudier de manière plus poussée en nous appuyant en particulier sur des collaborations dans le cadre de thèses CIFRE. Ces éléments seront détaillés dans notre projet de recherche.

I.4 SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches fait état de mes activités de recherches en tant qu'industriel et maître de conférences en collaboration ou au sein du CRAN. Celles-ci sont les fruits de plusieurs collaborations avec des acteurs socio-économiques et des chercheurs (« mes doctorants » et des collègues universitaires). La Figure 7 montre l'évolution des thématiques de recherche et nos différentes collaborations au fil de l'eau. L'essentiel de ces activités a été conduit en collaboration étroite avec le Pr André Thomas mais également avec d'autres chercheurs comme le Pr Hervé Panetto, M. Philippe Thomas et le Pr Jonathan Gaudreault.

²² CERIB : Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton
Hind Bril EL HAOUZI

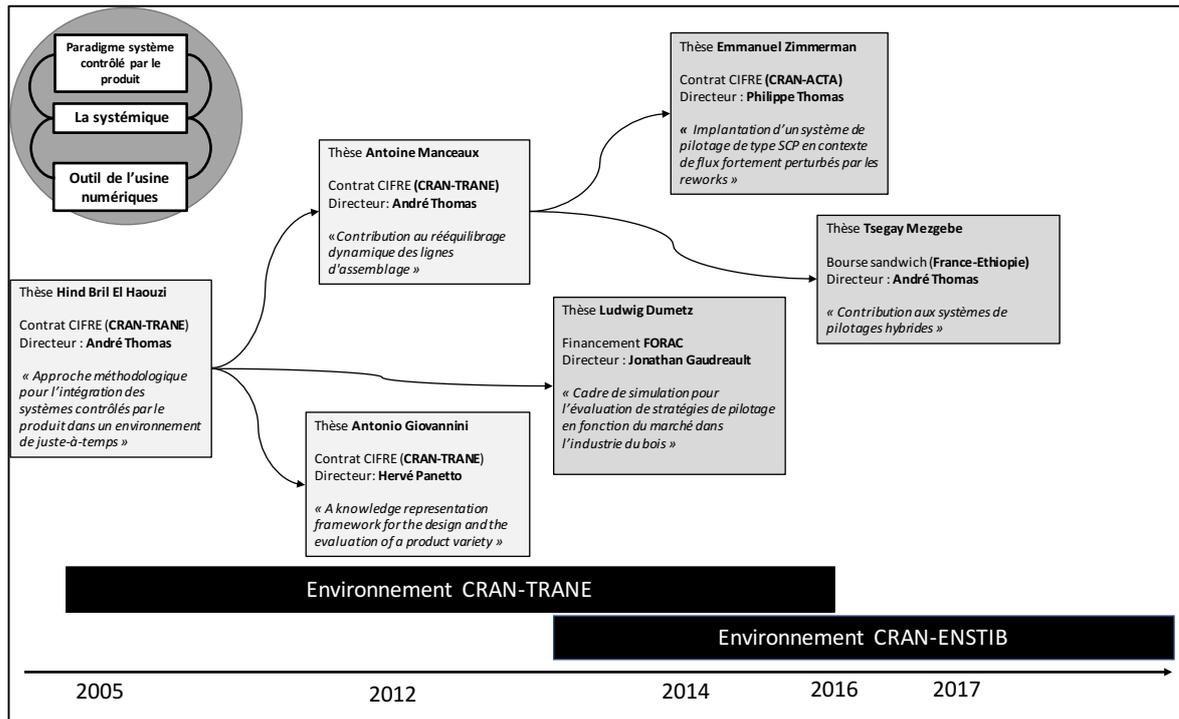


Figure 7 : l'évolution des activités de recherche et collaborations

Le détail de mes principales contributions sera présenté selon la dichotomie suivante : un chapitre sur la modélisation des systèmes de pilotage et un deuxième sur la simulation et l'évaluation desdits systèmes. Ceux-ci seront organisés de manière logique, ce qui ne respecte pas toujours l'ordre chronologique des événements. Nous souhaitons souligner non seulement les résultats de nos activités de recherche, au travers des publications qui les attestent, mais aussi les collaborations avec mes étudiants et chercheurs CRAN ou extérieurs. Pour chaque résultat présenté, nous essayerons de résumer autant que possible l'état de l'art antérieur et notre contribution.

Le dernier chapitre sera consacré au projet de recherche que nous souhaitons conduire et qui concerne l'étude des systèmes de pilotage et d'aide à la décision dans le contexte des systèmes de production durables. Dans ce chapitre, nous développons aussi notre projet d'enseignement, avec la volonté de présenter de nouvelles pratiques pédagogiques, ainsi que notre projet de transfert.

Chapitre

II

Modélisation des systèmes de pilotage adaptables... des paradigmes aux architectures...

« Un paradigme n'explique pas, mais il permet l'explication... il nous permet d'élaborer une théorie non mutilante... mais il ne produit pas automatiquement cette théorie. Au minimum c'est un « pense-bête » ; au maximum c'est un pense intelligent, qui nous aide à concevoir la complexité. »

(Morin, 1990)

“Only variety can destroy variety”

(Ashby, 1956)

II.1 INTRODUCTION

L'histoire de la science nous montre que les forces motrices du savoir sont l'essor de fonctions sociales et sont stimulées par les facilités offertes par la créativité et les avancées technologiques. Ainsi, au cours des dernières décennies, l'évolution des attentes clients de la simple disponibilité des produits vers des produits de plus en plus complexes prenant en compte des considérations environnementales et sociétales, ont changé la nature des paradigmes de fabrication (voir la Figure 8) (commission européenne 2003). La montée en puissance de la fabrication de produits complexes et personnalisés, représente un énorme défi technologique et scientifique : d'une part, le nombre de types et de variantes d'un produit qui doit être fabriqué par le processus de production est toujours en hausse et nécessite **une gestion efficace de l'information et de la connaissance**; et d'autre part, l'arrivée de nouveaux produits et la mise en œuvre des processus d'amélioration continue induisent une nécessité de mettre à jour et **reconfigurer** régulièrement les processus et l'outil de production.

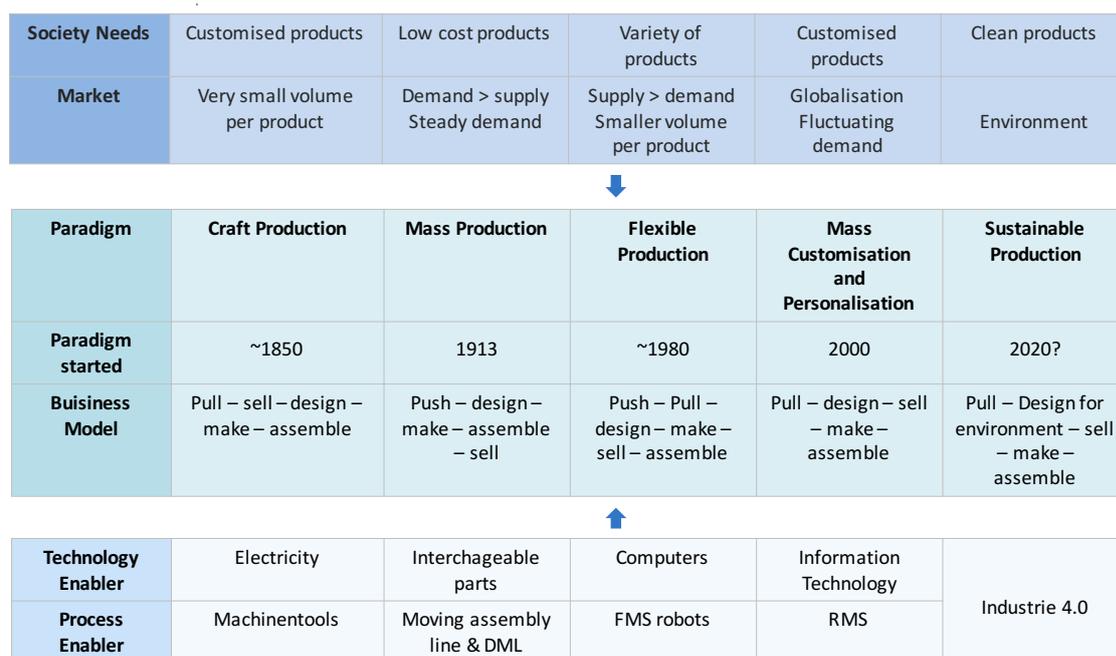


Figure 8 : évolution des besoins et des paradigmes de production ²³

Avec les nouvelles avancées technologiques, tant de l'information que de la communication, nous sommes passés de paradigmes qui prônaient la massification des volumes de production et l'intégration des différents flux (physiques, décisionnels et informationnels) à des paradigmes où priment la personnalisation et le « *one-piece-flow* » (ou la fabrication à la pièce) (Sekine, 2005), (Coletta, 2012). Ainsi, nous avons vu apparaître au fil du temps des concepts comme l'**agilité** ou l'**adaptabilité**, liés à la capacité du système de production et de service à répondre ou/et à s'adapter aux différents changements le touchant (marché, besoin clients, technologie...).

Le terme « *système manufacturier agile* » a été introduit pour la première fois dans le cadre d'un projet de recherche financé par le gouvernement américain regroupant Lehigh University et le MIT (Nagel and Dove, 1991). Depuis, plusieurs travaux ont traité de l'agilité et ont donné naissance à plusieurs définitions (Kidd, 1994), (Katayama and Bennett, 1999), (Gunasekaran, 1999). Par exemple, (Gunasekaran, 1999) définit l'agilité comme suit: "*agility can be defined as the capability of surviving and prospering in a competitive environment of continuous and unpredictable change by reacting quickly and effectively to changing markets, driven by customer- designed products and services*". L'agilité se traduit donc par l'aptitude du système à être réactif, résilient face aux perturbations et à évoluer dans le temps, le tout efficacement et rapidement. Cette définition fait référence à d'autres aptitudes du système que sont la **résilience** et l'**adaptabilité**. (Holling, 1973) définit la résilience comme suit : "*Resilience [...] is a measure of the persistence of systems and of their ability to absorb change and disturbance and still maintain the same relationships between populations or state variables*." La résilience mesure donc la capacité du système à absorber une perturbation, à se réorganiser et à continuer de fonctionner de la même manière qu'avant.

Les propriétés d'agilité et d'adaptabilité sont souvent utilisées dans le langage d'entreprise et par certains auteurs comme des synonymes, d'autres les différencient clairement (Katayama

²³ Adaptée de la commission européenne 2003
Hind Brill EL HAOUZI

and Bennett, 1999), (McCullen et al., 2006) : *“Agility relates to the interface between the company and the market. Essentially, it is a set of abilities for meeting widely varied customer requirements in terms of price, specification, quality, quantity and delivery. Adaptability is a feature of the company's production system. It is the inherent ability to adjust or modify its cost performance according to demand.”* (Katayama and Bennett, 1999). Dans (Belisário, 2015), l'auteur a fait référence à d'autres comparaisons de la littérature (entre la résilience et l'agilité) (adaptabilité et flexibilité). Il a par ailleurs présenté un modèle conceptuel des systèmes de production adaptables. Au vu de ces définitions, il apparaît que l'agilité est plutôt « englobante » par rapport aux autres propriétés²⁴.

Par ailleurs, les besoins de la société en « produits propres » et la prise de conscience par les industriels des enjeux environnementaux dans les années 90 avec la conférence National Academy of Sciences (Frosch, 1992), ont participé à la naissance du concept de l'écologie industrielle induisant une analyse systémique des flux de matières et d'énergies, en s'inspirant du vivant et conduisant ainsi à la conceptualisation du « métabolisme industriel » (Erkman, 1998). Par ailleurs, l'écologie industrielle est aussi vue comme une application du concept plus général qu'est le développement durable : un champ multidisciplinaire impliquant les sciences naturelles, les sciences sociales et les sciences de l'Homme. Selon la norme NF ISO 26000 « [...] *Le développement durable peut être considéré comme une façon d'exprimer les attentes plus larges de la société en général* ».

Derrière ces changements de paradigmes, il y a l'évolution des besoins de la société mais aussi les avancées technologiques et organisationnelles au niveau des systèmes de production. De façon très schématique et en transposant le cadre conceptuel de la théorie du système général, un système de production peut être vu comme un ensemble constitué de :

- a) un système de décision ;
- b) un système d'information/mémorisation ;
- c) un système opérant (Le Moigne, 1994).

Ainsi, le besoin de changement et d'adaptation du système de production se traduit au niveau du système opérant, par l'apparition, vers les années 80, des systèmes flexibles de production (FMS) (Toni and Tonchia, 1998). L'objectif de ces systèmes est de fabriquer de manière optimisée une grande variété de produits (qui peuvent changer avec le temps) d'une famille prédéfinie en utilisant le même système de fabrication avec le volume et à la qualité requis (ElMaraghy, 2005). Dans les années 2000, nous sommes ainsi passés des FMS aux systèmes reconfigurables (RMS) (Koren et al., 1999). L'idée principale est que le système opérant, en réponse aux changements et nouvelles exigences du marché, puisse être modifié (reconfiguré) rapidement et à moindre coût afin d'ajuster les fonctions et la capacité de production. L'objectif est alors de fournir exactement les fonctionnalités et la capacité nécessaires pour produire, lorsque cela est nécessaire (ElMaraghy, 2005). De façon plus générale, l'aptitude des systèmes de production à changer (changeability) ou à s'adapter a fait l'objet de discussions et d'analyses au sein de la communauté CIRP depuis plusieurs années. Ces travaux ont dégagé 5 niveaux d'adaptation (changeability levels) et ont fait émerger une hiérarchisation de ces changements selon deux axes : « produit » et « structure de production » (Wiendahl and Lutz, 2002), (Wiendahl et al., 2007), (cf. Figure 9).

²⁴ Nous présenterons dans notre projet de recherche une définition formelle de la propriété d'adaptation (cf. Chap IV).
Hind Bril EL HAOUZI

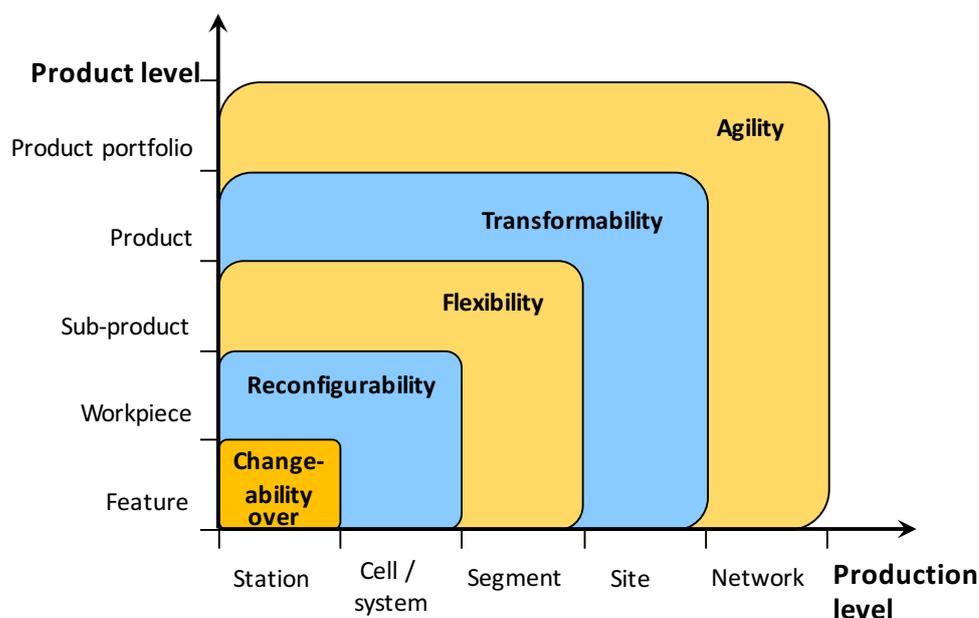


Figure 9 : la classification de « changeability » selon (Wiendahl et al., 2007)

Aujourd'hui, la vision Industrie 4.0 amène une nouvelle vague de systèmes opérants combinant des actifs physiques et virtuels, en particulier les CPS. On parle alors, des systèmes de type « plug-in and produce » (Arai et al., 2001), (Horbach et al., 2011).

Au niveau des systèmes de décision (que nous appellerons « systèmes de pilotage »²⁵ dans ce document), l'évolution suit celle du contexte industriel présentée dans la Figure 8. Les premiers modèles développés dans les années 70-80 s'appuient globalement sur la vision « CIM ». L'objectif le plus communément admis est que la maîtrise de la production passe par l'établissement de plans viables sur plusieurs horizons. Le système de pilotage s'attache alors à planifier d'une manière optimale l'horizon de gestion, d'une part et d'autre part à vérifier, à l'usage, que ce qui a été réalisé correspond bien à ce qui a été prévu (rétroaction) (Plossl, 1993). La mise en place de ces plans diffère d'une entreprise à une autre. En effet, si un tableau géré manuellement permet d'établir des plans viables dans une très petite structure, un système informatique implémentant la méthode MRP II (Manufacturing Resources Planning) sera nécessaire dans une grande société (Thomas et al., 1993). Cette méthode reste toujours d'actualité dans la plupart des entreprises même si elle souffre de rigidité (une structure hiérarchique) et d'inertie (liée à la différence entre les horizons de décision). Parallèlement à cette approche centralisée, nous avons vu se développer des applications des concepts du juste à temps (ex : Kanban), en particulier, dans des groupes comme Toyota (Ōno and Mito, 1988). Ces systèmes de management visuel (et souvent manuel), en plus de leurs objectifs de flexibilité et de réduction des délais, impliquent un management participatif des opérateurs, une réduction des niveaux hiérarchiques et le progrès permanent (Kaizen). Cependant, leurs implémentations induisent certains risques comme la myopie, voire la dégradation des performances globales.

Depuis les années 90, poussées par les importantes avancées des technologies de l'information et de la communication, des initiatives que nous pouvons englober dans les

²⁵ Nous utiliserons ce terme même si il est utilisé essentiellement dans la communauté francophone. Son equivalent en anglais est « manufacturing control »

systèmes intelligents de pilotage, sont apparues remettant en cause l'approche CIM pour plus d'autonomie et d'adaptation (Tharumarajah, 1996). Ces systèmes ont pour objectifs de combiner les performances et la robustesse des systèmes de pilotage centralisés avec les systèmes distribués pour plus **d'agilité** grâce à leur **adaptabilité**.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux systèmes de pilotage et plus particulièrement à leur aptitude à s'adapter et à durer dans le temps. Nous donnerons quelques définitions de base afin de comprendre la nature du système de pilotage de production et nous précisons les différentes propriétés permettant l'adaptation et la durabilité de ces derniers. L'objectif n'est pas de détailler des concepts déjà largement développés dans la littérature mais d'en présenter les bases pour faciliter la compréhension de nos contributions et présenter les briques qui construisent notre projet de recherche. Ainsi, nos contributions issues de l'encadrement des thèses ou de collaborations extérieures seront expliquées dans des encadrés. Ces derniers peuvent être vus comme des aperçus illustrant les concepts et les méthodes en lien avec le pilotage. Cette démarche englobante permettra de mieux nous positionner par rapport aux différentes contributions existantes et introduire des éléments clés servant à définir mon projet que je présenterai au chapitre IV.

II.2 DEFINITIONS DE BASE

Pour comprendre les notions et les concepts relatifs aux systèmes de pilotage adaptables, nous utiliserons l'approche de caractérisation prônée par (Le Moigne, 1994). La définition d'un objet se fait selon trois pôles (ontologique, fonctionnel et génétique). Le Moigne a résumé cette représentation par la phrase « *la trialectique de l'Être, du Faire, du Devenir, est sans doute le sésame de la représentation, sinon de la connaissance de l'objet* ». Ainsi, un objet « système » est caractérisé par sa nature (Quel est-il ? Quels sont son identité, sa finalité et son environnement ?), son action (Que fait-on avec ? Quels sont son fonctionnement et sa structure ?) et son évolution (Que devient l'objet dans le temps ?). Par ailleurs et comme dans les travaux de (Trentesaux, 2002), nous utiliserons également les deux vues systémiques interne et externe pour compléter notre grille de caractérisation des systèmes de pilotage adaptables.

II.3 VUE EXTERNE

II.3.1 Finalité du système de pilotage

Le concept de finalité fait état de plusieurs définitions (philosophique, théologique...). La finalité est parfois confondue avec l'objectif ou le but. Une façon simple de voir cette notion peut se résumer par « la raison d'être » de l'objet ou du système étudié. Elle peut être matérialisée par les projets, les missions ou les services rendus par le système. Ainsi, la finalité du système de pilotage peut être décrite par les fonctionnalités ou les services qu'il offre. Selon (APICS²⁶, 12e Edition), le système de pilotage/contrôle est défini comme suit : *“Control System: a system that has its primary function the collection and analysis of feedback from a given set of functions for purpose of controlling the functions. Control may be implemented by monitoring or systematically modifying parameters or policies used in those functions, or by preparing control reports that initiate useful action with respect to **significant deviations** and exceptions”*. Dans cette définition, nous relevons les fonctions de surveillance, de boucles de retours sur les

²⁶ APICS : American Production and Inventory Control Society

actions réalisées pour répondre aux différentes « perturbations ou déviations » et les exigences d'entrée.

(Trentesaux, 2002) propose : « le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à perturbations pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances ».

Ces définitions sont semblables à plusieurs égards. De celles-ci, nous gardons trois concepts importants dans notre objectif de caractérisation du système de pilotage : la notion de **maîtrise de performances**, la notion de **perturbation** et la notion de **boucles de retours** (« équilibrage » pour prendre une expression de Le Moigne). Nous traiterons, dans ce paragraphe, de la notion de performance (les deux aspects *perturbation* et *équilibrage* seront traités dans la vue interne du système de pilotage).

L'approche classique de la performance peut être résumée selon le triangle de la Figure 10. La plupart des auteurs font la distinction entre trois familles d'indicateurs de performance selon 3 axes : i) adéquation des objectifs aux résultats (efficacité) ii) le rapport moyens/résultats (efficacité) et iii) le rapport objectif/Moyens (pertinence).

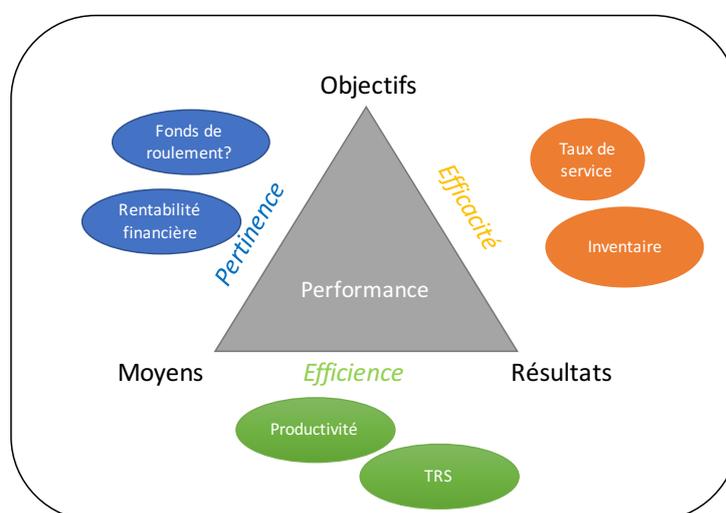


Figure 10 : l'approche classique de la performance selon le modèle de (Gibert, 1980)

Cette façon de voir la performance est régie par une dimension purement économique et reste largement utilisée dans les entreprises et dans nos programmes d'enseignement. Elle permet de mesurer des indicateurs de résultats et de processus sans prendre en compte le contexte d'obtention de cette performance (Greif, 1989) (l'environnement global, si important dans les études des systèmes complexes n'est pas pris en compte).

Par ailleurs, les systèmes adaptables imposent d'aller vers une approche plurielle de la performance, permettant en quelque sorte de les qualifier de « durable ». La littérature dans le domaine de la gestion reconnaît le rôle du capital humain dans l'avantage concurrentiel des entreprises et leur pérennité (Hamel and Prahalad, 1994). A titre d'exemple, les approches de type Lean et Six-sigma, ont fait de l'implication de l'humain la base de toute l'organisation industrielle. Par conséquent, plusieurs modèles de performance insistent aujourd'hui sur la prise en compte de l'humain. Des auteurs comme (Morin et al., 1994), (Savoie and Morin, 2000) ont proposé un autre modèle de performance multidimensionnelle. Ces auteurs expliquent que l'efficacité organisationnelle est le produit de quatre dimensions inter-reliées que l'on peut faire converger dans une « arène politique » comme le montre le schéma de la Figure 11.

Un premier axe s'intéresse à l'efficacité économique. Nous retrouvons par exemple les indicateurs de performance comme le taux d'utilisation des machines et la productivité. Le deuxième axe concerne la pérennité de l'organisation (ex : la qualité des produits, la rentabilité financière). Le troisième axe s'intéresse à la valeur des ressources humaines (ex : taux de formation du personnel, nombre de propositions d'amélioration). Le quatrième axe concerne la légitimité de l'organisation auprès des groupes externes (satisfaction des organismes régulateurs : le respect de la réglementation, satisfaction de la communauté : responsabilité sociale²⁷, responsabilité environnementale...).

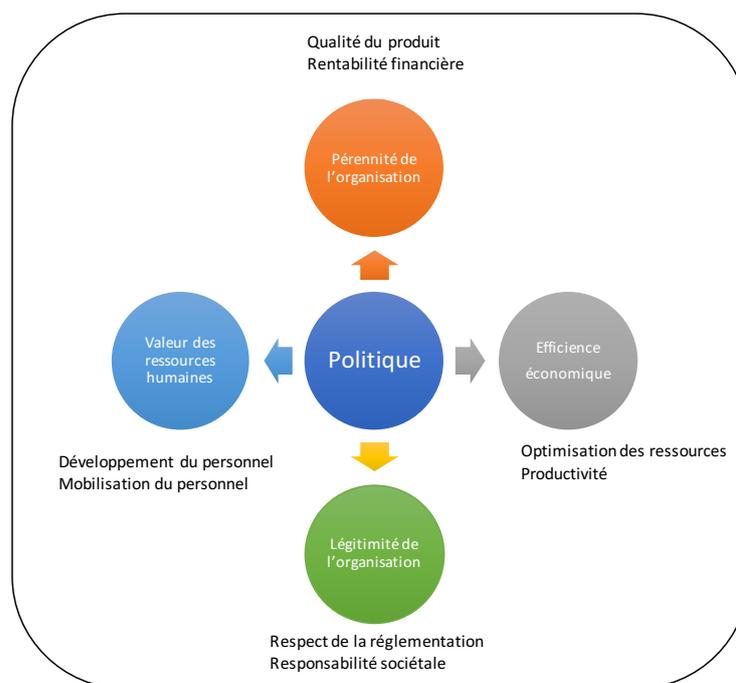


Figure 11 : une approche plurielle de la performance²⁸

La cinquième dimension, centrale sur la Figure 11 a été ajoutée pour tenir compte de la complexité de l'évaluation de l'efficacité (selon ce modèle). Pour les auteurs, c'est un processus politique qui conduit à prendre en compte certains éléments plus que d'autres ou à privilégier une approche au détriment d'une autre. La politique prend en compte quatre éléments pour la mise en place d'un système de la performance en s'appuyant ou en s'enrichissant d'informations contextuelles issues de l'environnement. **La notion de politique** est donc importante pour **faire basculer/infléchir** le système de pilotage d'une orientation à une autre. Elle nous permet ainsi, de différencier ou de définir des classes de finalités : une finalité « **business** » (résultats), une finalité « **processus** » (recherche d'efficacité économique) et une finalité « **développement durable** » (prenant en compte l'Homme et l'environnement).

Par ailleurs, même-si ce modèle semble complet, il reste difficile à mettre en œuvre et nécessite une mise à jour permanente et un dialogue social. En particulier, la dimension « valeur des ressources humaines » et la responsabilité sociale (ISO26000) restent complexes malgré

²⁷ Dans le cadre de la norme ISO 26000 : « la responsabilité sociale est définie comme la responsabilité d'une organisation vis-à-vis des impacts de ses décisions et de ses activités sur la société et sur l'environnement, se traduisant par un comportement transparent et éthique qui contribue au développement durable y compris à la santé et au bien-être de la société, prend en compte les attentes des parties prenantes, »

²⁸ adapté du modèle Morin et Savoie (Morin et al., 1994)(Savoie and Morin, 2000)

les nombreux travaux de la littérature dans le domaine de la gestion industrielle et en particulier dans la mise en œuvre de l'approche S-LCA (Social Life Cycle Assesement), (Carmo et al., 2017), (Peruzzini et al., 2017), (Benoît and Mazijn, 2009), (Jørgensen, 2013).

II.3.2 Environnement du système de pilotage

Comme expliqué précédemment, le concept de pilotage concerne la définition et l'organisation des interrelations entre deux systèmes : le système opérant et le système de pilotage, conduisant à la mise en œuvre d'une boucle de rétroaction (Le Moigne, 1994). Il existe plusieurs modèles représentant le système de pilotage dans son environnement. Ces représentations s'apparentent au modèle cybernétique classique de l'automatique, lequel est contrôlé par une boucle de retour et par la mise en œuvre d'un correcteur. D'autres représentations font appel à la notion de synchronisation de deux flux (flux de matières premières et flux d'informations) (cf. Figure 12).

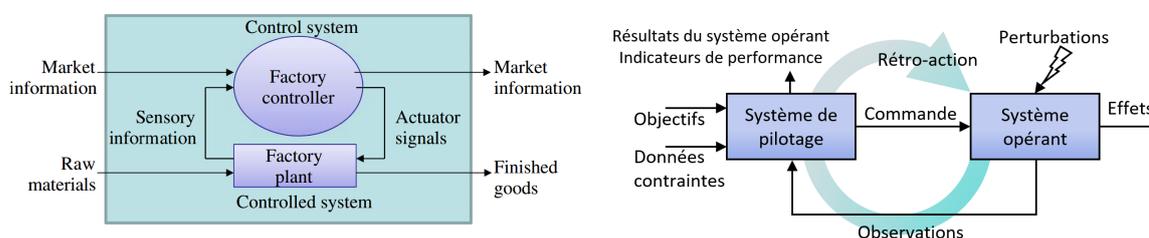


Figure 12 : modèles d'environnement du système de pilotage extraits (Trentesaux, 2002)

Ces formes de représentation du système de pilotage selon la boucle cybernétique classique permettent de présenter deux notions importantes : la **performance** et la **perturbation**. Mais elles ne montrent pas l'adaptabilité vis à vis de l'environnement global du système, ni la notion de politique à mener car elles ne se situent qu'à un niveau opérationnel.

Dans la lignée des travaux sur la cybernétique de Norbert Wiener, Warren McCulloch et Ross Ashby, les travaux de recherche de Stafford (Beer, 1959, 1971, 1981, 1984) ont permis de proposer un modèle d'organisation développé à partir de la recherche d'invariants dans les systèmes biologiques. L'objectif principal du modèle a été de montrer et d'expliquer comment quelques systèmes réussissent à être viables, au sens « qui est susceptible de durer, de se développer... ».

Le modèle cybernétique proposé par Beer est basé sur trois composantes principales : l'environnement (global /local), un méta-système contrôlant et le système opérant (appelé implémentation dans certains travaux) (cf. Figure 13).

D'autres typologies de pilotage peuvent se présenter. Ainsi face à des événements imprévus, selon (Hollnagel, 2006), l'organisation peut être **proactive**, **réactive** ou **interactive**. Ces trois organisations sont les composantes de la résilience telle que présentée dans la Figure 14.

- La notion de proactivité est souvent attachée à la gestion des perturbations. Il s'agit de détecter de manière précoce les conditions de dégradation et d'empêcher leur apparition. Ensuite, le processus s'affaire à capitaliser cette expérience pour mieux «anticiper» et donc «agir». L'utilisation de la simulation on-line est un bon exemple de méthodes permettant de se projeter dans le futur pour anticiper les aléas (Cardin, 2007), (Talibi et al., 2013) et proposer des corrections. L'association de la simulation et d'un outil d'apprentissage comme cela a été mis en œuvre dans les travaux de (Noyel, 2015) ou (Belisário, 2015) permettrait de rendre un processus de décision proactif (avec la boucle « anticiper, agir, capitaliser »).

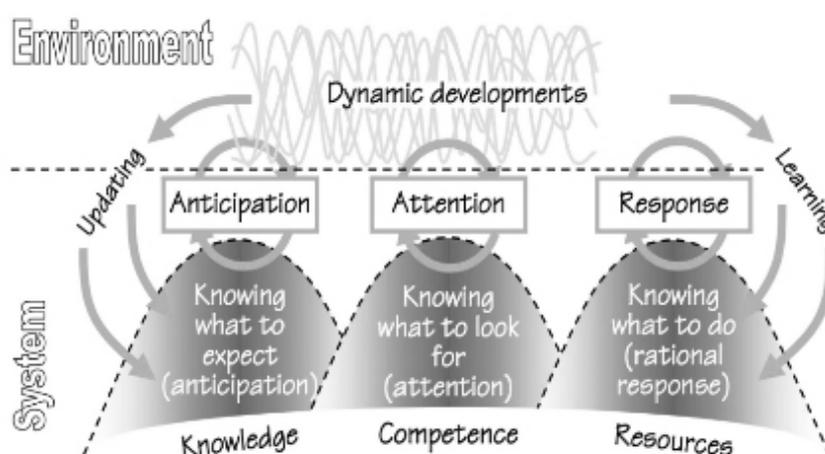


Figure 14 : les composants de la résilience selon (Hollnagel, 2006)

- La notion d'interactivité est souvent associée aux technologies permettant des échanges Homme-Machine. Dans le cas du pilotage des systèmes de production, l'Homme est capable d'identifier une situation et d'agir en conséquence en appliquant des procédures qu'il connaît (comportement basé sur des règles) ou qu'il invente (comportement basé sur des compétences). Ainsi, mettre l'Homme dans la boucle de pilotage grâce à des systèmes d'assistance interactifs permettra de tirer profit de ses aptitudes humaines difficilement programmables par informatique. (Grandgirard, 2009), (Trentesaux and Millot, 2016).

II.4.2 Vue organique

Dans la vue organique²⁹, nous nous intéressons à l'organisation des objets/entités du système. (Trentesaux, 2002) définit une organisation mettant en relation (intégration) des entités relatives aux processus externes, d'une part, avec un ensemble de modes d'interactions entre ces entités, d'autre part. Pour caractériser la vue organique du système de pilotage, il propose plusieurs classes (Classe 0 : agencement centralisé ; Classe I : purement hiérarchique ; Classe II : hiérarchique/ hétéarchique ; Classe III : hétéarchique).

²⁹ Il s'agit d'une vision statique
Hind Bril EL HAOUZI

II.4.3 Vue évolutionniste

Pour la vue évolutionniste nous utiliserons le référentiel de l'équilibrage du système général expliqué dans (Le Moigne, 1994). Ce référentiel dresse quatre phases représentées dans la Figure 15 qui sont la phase régulation, adaptation fonctionnelle, adaptation structurelle et évolution structurelle.

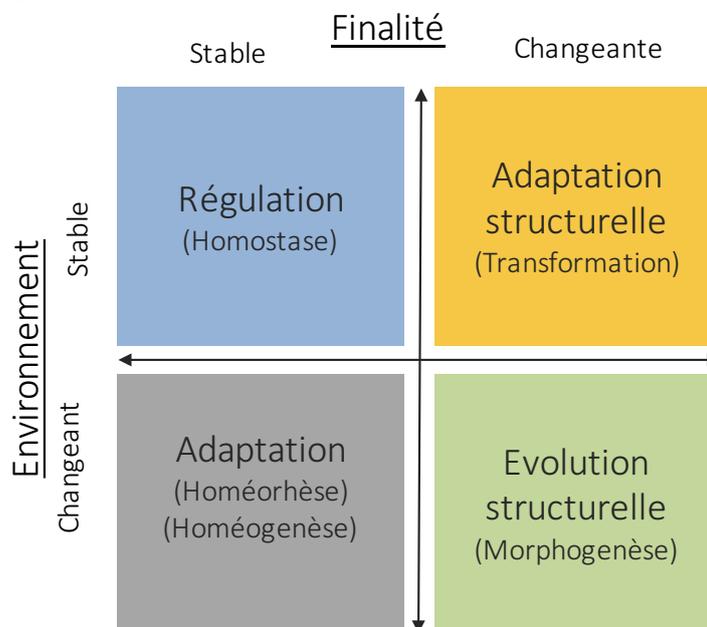


Figure 15 : le référentiel de l'équilibrage adapté de (Le Moigne, 1994)

II.4.3.1 Phase 1 : régulation :

Pour retrouver l'équilibre perdu lors d'une perturbation survenue sur le système opérant sans changement de finalité (missions) ni d'environnement, le système de pilotage cherchera à modifier par des décisions de commande les paramètres du système interne de pilotage. L'organisation de l'objet n'est donc pas impactée : sa structure et ses programmes sont tenus pour invariants dans l'horizon considéré. Pour maintenir cette régularité Le Moigne présente trois types ou trois dispositifs programmables de régulation (selon la vision O. Lang) : élimination des perturbations, égalisation des déviations et compensation des perturbations.

Pour la première forme de régulation, il explique dans son livre (Le Moigne, 1994) : « ... le plus aisé et le plus simple utilise l'élimination des perturbations par des absorbeurs de chocs, des tampons, des boucliers, des isolateurs... ».

La notion de point de découplage en gestion de production est un bon exemple pour illustrer ce mode de régulation. Elle est définie comme suit (APICS 12e Edition) : emplacement dans la nomenclature ou un réseau de distribution où l'on place un stock afin de créer une indépendance entre les processus ou entités. Pour comprendre cette notion, il convient de se placer du point de vue des flux de matières. Dans la Figure 16, le point de découplage (stock) permet de mettre en action de façon synchronisée deux boucles logistiques de fréquences de rotation différentes (ex : v1 une pièce à l'heure et v2 x pièces à l'heure). Le stock agit comme « un réducteur de vitesse » et découpe une boucle logistique unique modélisant la réponse du système industriel à la sollicitation client, en deux boucles de fréquences de rotation adaptées aux contraintes du système en question.

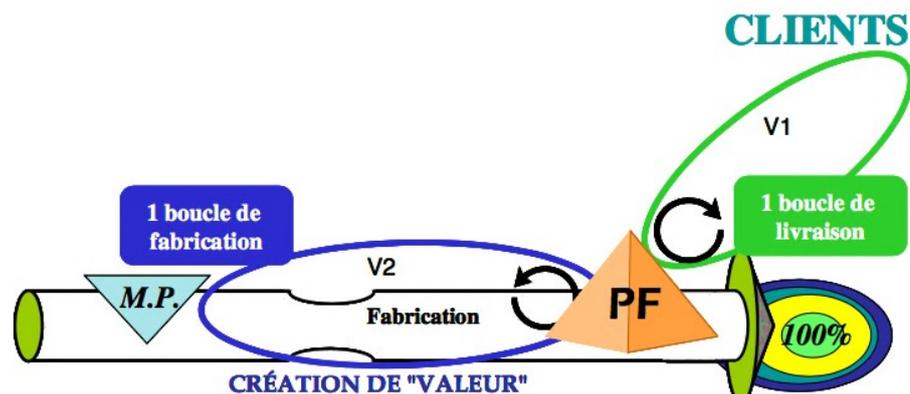


Figure 16 : un exemple de point de découplage tiré de (Thomas, 2004)

La deuxième forme de régulation est la régulation par « égalisation des déviations » qui correspond à la régulation par recyclage en boucle fermée. Le kanban et, en particulier le CONWIP, est un outil de gestion des flux physiques et informationnels qui illustre bien le fait d'égaliser les déviations (de vitesse et de volume du flux) par le « forçage » de volume fixe d'encours (cf. Figure 17).

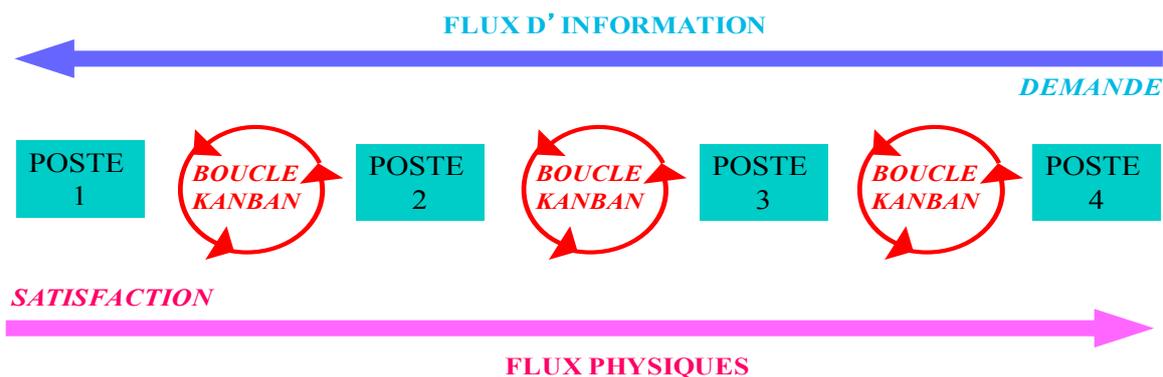


Figure 17 : des boucles de régulation par Kanban

La troisième forme est la régulation par « compensation des perturbations » : il s'agit d'une régulation par boucle ouverte : il faut introduire un processeur décisionnel dans la boucle, capable de déterminer une décision de compensation par traitement des informations. Ce type de régulation correspond à un système de pilotage MRPII implémenté dans les systèmes d'information de type ERP pour lequel il n'y aurait pas de système temps réel de remontée des informations de l'atelier (cf. Figure 18).

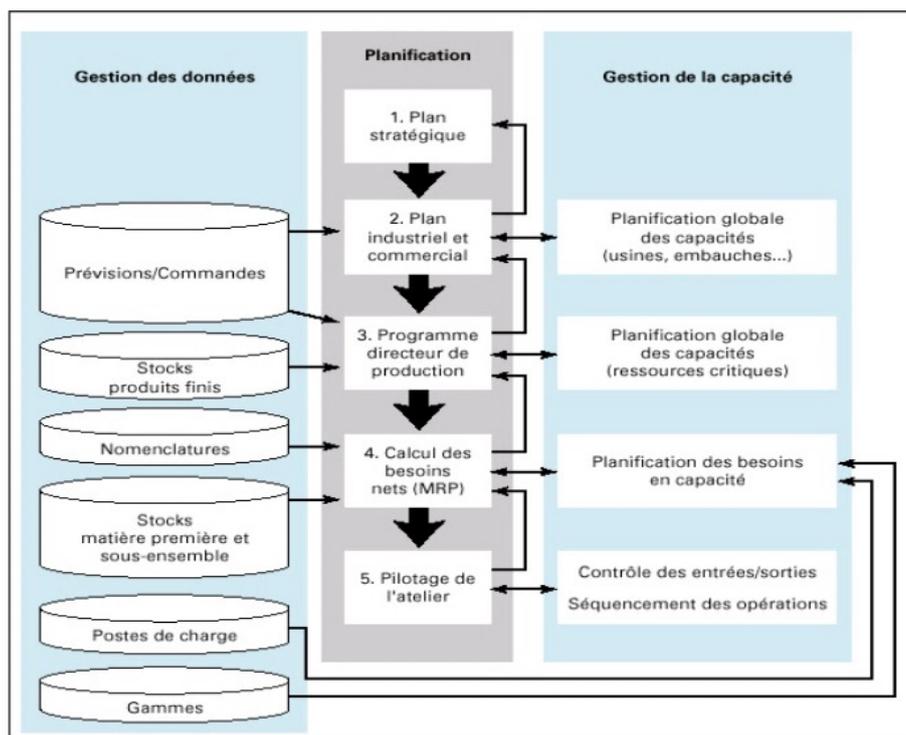


Figure 18 : la structure MRPII tiré de (Thomas, 2004)

II.4.3.2 Phase 2 : adaptation fonctionnelle

Dans cette phase, les changements au niveau de l'environnement conduisent à une déstabilisation du système par rapport à ses objectifs. Deux approches peuvent être utilisées pour assurer cette adaptation : adaptation par programme et adaptation par découplage.

Adaptation par programme : illustration du domaine de l'IA :

L'idée ici est de se doter de nouveaux programmes sans affecter la structure « en sélectionnant de nouveaux points de paramétrage, ou en agençant de nouvelles connexions entre les processeurs préexistants » (vue interne). Les mécanismes ou méthodes issus de l'intelligence artificielle (IA) sont des bons exemples pour permettre cette adaptation fonctionnelle.

L'intelligence artificielle est une science qui date de plus d'un demi-siècle. D'après (Laurière, 86) : « son objet est de reconstituer à l'aide de moyens artificiels - presque toujours des ordinateurs - des raisonnements et des actions intelligentes ». (Cornuéjols et al., 2010) en décrivent la fonction majeure : « programmer des machines capables d'effectuer des tâches qui requièrent de l'intelligence ». Mais qu'est-ce que l'intelligence ? Un consensus sur la définition de l'intelligence semble encore impossible (Gallou and Meunier, 1992). Cependant, les principaux sujets d'étude de l'IA semblent être l'acquisition et la représentation de la connaissance pour « apprendre », « raisonner » et « décider ». Dans le cas des systèmes experts, sans doute le système d'IA le plus répandu, le raisonnement est réalisé par l'intermédiaire d'un moteur d'inférence, agissant sur une base de connaissance représentée sous forme de règles dites de production. Dans le cadre de la thèse d'Antonio Giovannini, nous avons utilisé un système expert basé sur les ontologies pour adapter le système de production aux changements

des besoins clients et prendre en compte des alternatives utilisant par exemple des « matériaux propres ».

Contexte : l'entreprise TRANE a adopté la stratégie de personnalisation de masse permettant de couvrir un large panel de besoins clients. La question que nous avons étudiée ici est : comment prendre en compte les changements des besoins clients en intégrant les répercussions sur l'environnement ? Ainsi, la mise en œuvre de la personnalisation de masse dépasse la simple évaluation des aspects économiques pour favoriser une approche durable.

Contribution : une ontologie « centrée produit » permettant de modéliser les relations entre celui-ci, les processus et les ressources (PPR) sous forme de fonctions a été proposée. Cette ontologie a été enrichie par des connaissances sur la durabilité (ex : matériaux propres). La durabilité est évaluée selon les opportunités de changements sur la situation initiale, en fonction des relations du modèle PPR. Ainsi, grâce au modèle de connaissances (PPR) et les règles associées, exprimées en SWRL (A Semantic Web Rule Language) (Horrocks et al., 2004) et SQWRL (Semantic Query-enhanced Web Rule Language)(O'Connor and Das, 2010) , le moteur d'inférence propose des solutions alternatives prenant en compte l'aspect « respect de l'environnement ».

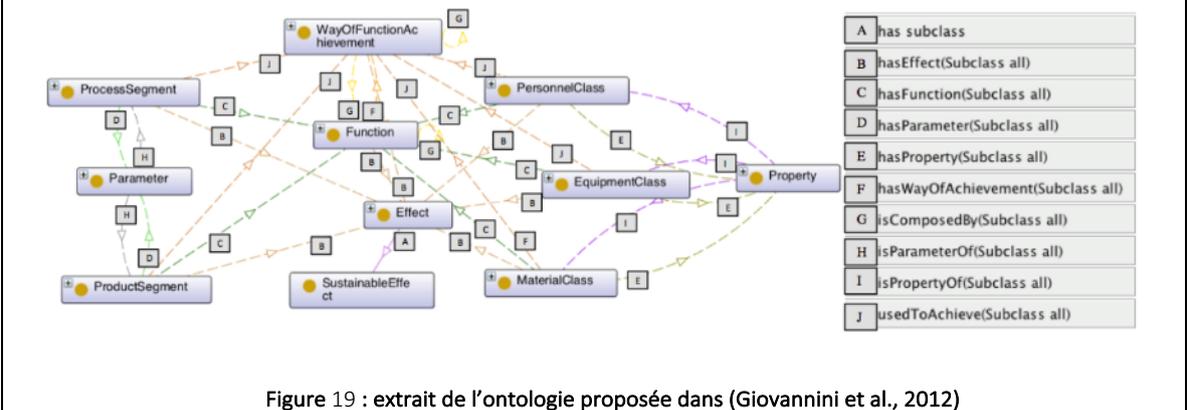


Figure 19 : extrait de l'ontologie proposée dans (Giovannini et al., 2012)

Ce raisonnement est généralement fondé sur la *logique* classique. Les chercheurs qui ont travaillé dans le domaine des logiques classiques ont mis en évidence l'inaptitude de ce formalisme à modéliser et à résoudre un certain nombre de problèmes (Gallou and Meunier, 1992). Ainsi, lorsque la possibilité d'un fait énoncé ou sa nécessité est prise en compte, on parle alors d'une logique modale. Lorsqu'une évolution dans le temps est à prendre en considération, la logique est temporelle. On parle de « logique floue » lorsque les faits sont décrits de manière imprécise.

Notre collaboration avec Li Ming (Li et al., 2015) nous a permis d'utiliser la logique floue dans le cadre des systèmes contrôlés par le produit pour décider quand le produit doit prendre la décision localement, faire appel au système de pilotage centralisé ou ne rien faire.

Contexte : comme expliqué dans (Cardin et al., 2017), la question de basculer d'un mode de pilotage à un autre reste une question à laquelle il est difficile de répondre. Le basculement sur un seuil donné par un certain indicateur peut s'avérer inefficace car cela ne prend pas en compte les interactions entre indicateurs et peut de plus créer de la nervosité³⁰. C'est pour cette raison que nous avons exploré l'usage de la logique floue pour adapter le système de pilotage dynamiquement en basculant entre deux modes de pilotage centralisé et distribué. Nous avons utilisé le cas d'étude présenté (cf. Figure 19), constitué de quatre cellules (*SF* : cellule de production des sous-ensembles et *FA*, *FB*, *FC* cellules d'assemblage des produits et trois points de découplage : matières premières, sous-ensembles et produits).

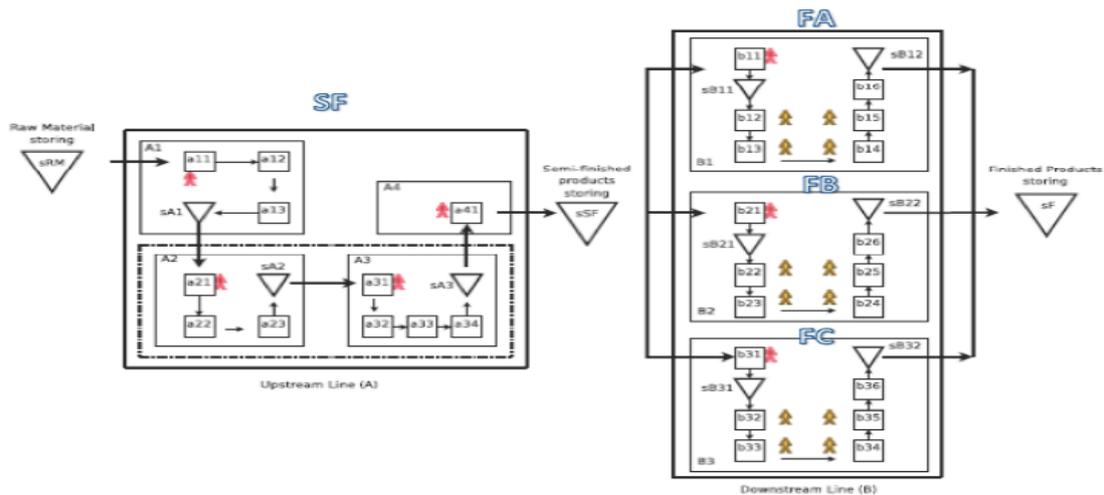


Figure 20 : le cas d'étude utilisé

Contribution : pour faire face à l'incertitude liée à des aléas terrain, trois paramètres, α , β et γ sont créés pour en évaluer l'impact. En outre, une règle floue basée sur une fonction d'appartenance est conçue pour choisir entre des décisions centralisées et distribuées pour la réorganisation des lots de fabrication restant sur une des lignes (*FA*, *FB*, *FC*). Les résultats de la simulation montrent que des décisions appropriées pourraient être prises par cette méthode.

$$\alpha = \frac{L}{RC_T} \quad \gamma = \frac{RL_B}{RC_B} \quad \beta = \frac{L}{RC_B}$$

L présente la durée estimée de l'évènement perturbateur.

RC_T représente la capacité restante sur les autres postes de charges.

RC_B représente la capacité restante de la ligne où s'est produit l'évènement perturbateur.

RL_B représente le temps de production des produits restant du lot impacté.

Il est aussi possible d'exploiter des connaissances sans passer par un raisonnement basé sur la logique. C'est le cas d'induction bayésienne (où une caractérisation probabiliste des connaissances est disponible). C'est aussi le cas quand le modèle est basé sur des connaissances mesurables que nous pouvons écrire sous forme $y=f(x)$ (obtenues par expérimentations ou par hypothèses mathématiques). Cette dernière forme de modélisation a été utilisée dans le cadre

³⁰ Dans cet exemple, la nervosité dans un planning de production est relative aux différences de quantités de production à chaque recalcul.

de la thèse d'Antonio Giovannini pour offrir un modèle produit/processus permettant de s'adapter à plusieurs sources de variabilités.

Contexte : pour s'adapter aux sources de variabilité présentées sur la Figure 21, l'objectif industriel de la thèse a été de proposer un nouveau modèle de configuration produit permettant de :

- rationaliser le nombre de variantes proposées aux clients (s'assurer qu'un besoin client a la même réponse quel que soit le vendeur) ;
- accélérer l'introduction d'un nouveau produit ;
- permettre la fabrication sur plusieurs sites de production en optimisation conjointe produit – processus.

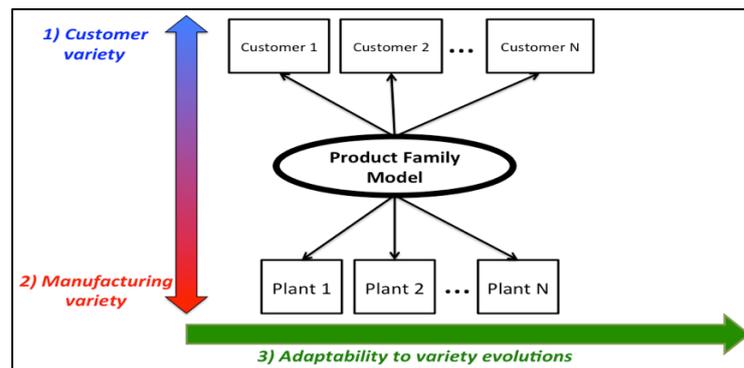


Figure 21 : les différentes sources de variabilité (Giovannini, 2015)

Contribution : la contribution principale de cette thèse réside en son « universalité » (c'est-à-dire que les modèles peuvent être utilisés même si l'utilisateur n'est pas du même domaine d'expertise que le modélisateur) pour la conception d'une famille de produits et la gestion de son évolution dans le temps. Le modèle de la représentation de la connaissance formalisée (Giovannini et al., 2015) permet de lier les caractéristiques (fonctionnelles et géométriques) des produits et leurs composants avec les performances exigées par des clients. Les caractéristiques géométriques des composants ont été liées au modèle mathématique qui décrit les impacts de leurs valeurs sur les performances à travers un logiciel de CAO (CATIA) (cf. Figure 22).

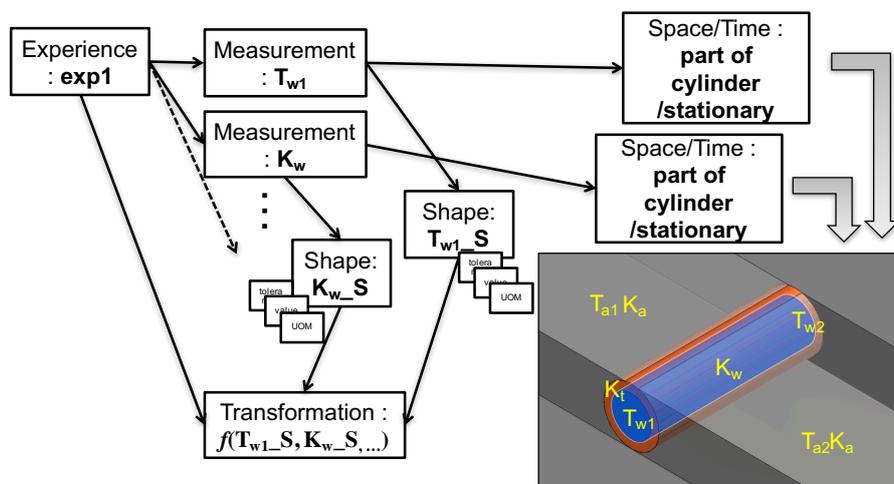


Figure 22 : association des caractéristiques fonctionnelles et géométriques (Giovannini et al., 2015)

L'intelligence artificielle fait appel à d'autres approches pour permettre l'adaptabilité fonctionnelle, par exemple, l'approche connexionniste. Les tâches intelligentes sont décrites grâce au passage de valeurs d'activation à travers un grand nombre de processeurs fonctionnant en parallèle, c'est le cas des réseaux de neurones artificiels³¹ pouvant être construits par apprentissage supervisé ou non-supervisé. L'apprentissage non-supervisé peut être mis en œuvre également par des approches de partitionnement de données comme le K-means. Dans le cadre des premiers travaux de la thèse d'Emmanuel Zimmerman (Zimmermann et al., 2016), nous avons utilisé la méthode K-means pour choisir dynamiquement les règles de pilotage en fonction de l'état de saturation d'une ligne de production.

Contexte : L'entreprise Acta-mobilier souffre d'un taux de reprises important (cf. Figure 22). Les boucles de reprise impactent fortement le planning de production. Ainsi des travaux dans la cadre de la thèse de (Noyel et al., 2015) ont permis d'identifier quelques indicateurs clés et leurs interactions (ex : l'interaction entre nombre de défauts, d'une part, et le nombre d'encours, d'autre part, appelée saturation).

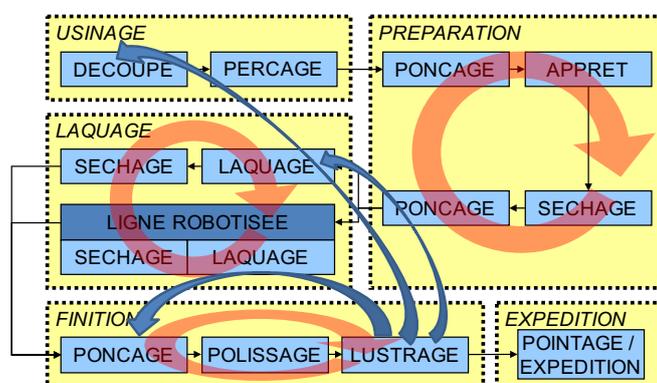


Figure 23 : principe de reprise d'un produit (Noyel et al., 2015)

Contribution : L'approche proposée repose sur deux sous-programmes : d'abord, l'algorithme de clustering basé sur la méthode K-means sert à définir automatiquement les limites des zones de saturation en fonction des indicateurs de performance (zone de 1 à 4 dans la Figure 24). Un modèle de simulation est utilisé pour conduire, d'une manière expérimentale, un plan Taguchi afin de déterminer la meilleure règle d'ordonnancement de flux (EDD : Date de livraison la plus proche, SPT : délai de fabrication le plus court) à appliquer pour chaque cluster (ou région) ainsi que les recommandations proposées aux opérateurs de la ligne (cf. Figure 24).

³¹ Cette approche a été utilisée dans le cadre de notre collaboration avec P. Thomas (article soumis).

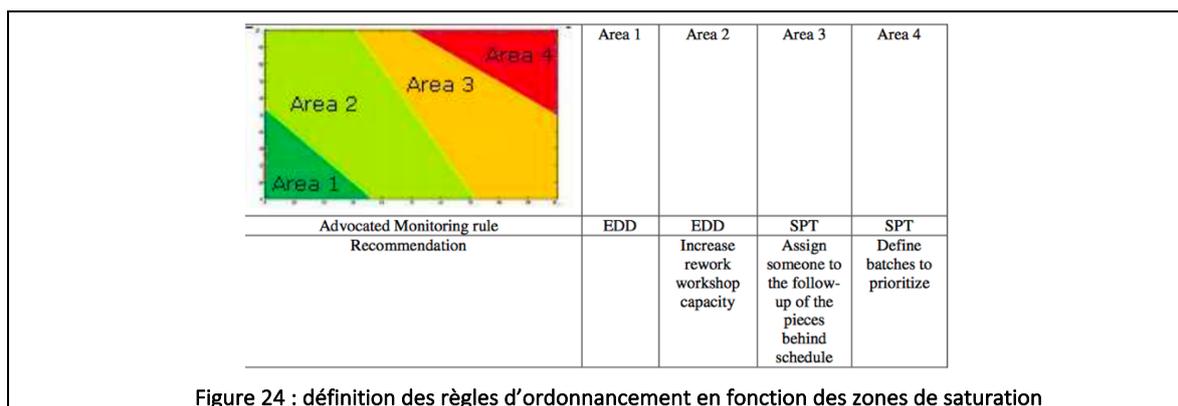


Figure 24 : définition des règles d'ordonnement en fonction des zones de saturation

Adaptation par découplage (auto-organisation) :

Après l'adaptation par programme, la deuxième approche est l'adaptation par découplage. L'idée maîtresse est semblable à celle de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). La modularité (découplage) permettra plus d'autonomie et une meilleure adaptation face aux changements de l'environnement. Cette adaptation peut être assurée par des mécanismes auto-X comme : auto-organisation, auto-adaptation, auto-optimisation, etc. Le paradigme IAD est basé sur la science des organisations artificielles, appelée kénétique par (Ferber, 1994). L'idée fondamentale sous-jacente à cette science est que toutes les contraintes de conception ne sont pas envisagées par les concepteurs mais qu'elles sont introduites par la solution. (Simon, 1996) a dit « The resulting systems exhibits an emergent behavior that was never explicitly planned or conceived by these designers simply because its complexity exceeds their mental capabilities ». Ainsi, les activités simples ou complexes, telles que la résolution de problèmes et la coordination d'actions sont le fruit d'une interaction entre entités relativement autonomes et indépendantes, appelées agents (ou holons). Ces-derniers, travaillent au sein d'une communauté selon des modes parfois complexes de coopération, de conflit et de concurrence, pour survivre et se perpétuer (Ferber and Perrot, 1995).

Plusieurs mécanismes peuvent, alors, être utilisés pour « orchestrer » ou faire « coordonner », « coopérer » et « émerger un comportement global ». Dans le domaine des systèmes de pilotage intelligents, les mécanismes bio-inspirés ont une place importante. Ainsi, quelques travaux ont mis en place le principe des colonies de fourmis pour chercher le chemin optimal dans un réseau de ressources de transformation et de transport (Valckenaers et al., 2006), (Hadeli et al., 2004). Différents types de fourmis ont été utilisés : les fourmis de faisabilité permettent de trouver les routages valides, les fourmis d'exploration se déplacent dans le réseau virtuel des ressources pour estimer la performance de chaque routage et enfin les fourmis d'intention permettent de réserver les ressources. Les travaux de (Pannequin and Thomas, 2012) ont proposé une autre interprétation de la stigmergie basée sur les échanges entre les produits et le système à travers le principe de l'annotation (enrichissement de la partie informationnelle du « Holon Produit »). L'œuvre collectivement élaborée par les divers acteurs (systèmes de décision, ressources...) est le flux de produits. D'autres approches sont inspirées des lois physiques. Par exemple, des champs potentiels sont utilisés dans les travaux de (Leitão et al., 2012), (Pach et al., 2012) : chaque ressource émet des champs attractifs selon sa disponibilité et les services offerts. L'intensité de ces champs dépend de la distance ou du temps de transport. Ainsi le produit décide dynamiquement de son affectation à la ressource qui émet le plus grand champ potentiel. Dans le cadre des premiers travaux de thèse de Tsegay Mezgebe (Mezgebe et al., 2017) , nous avons testé quelques protocoles simples de négociation :

un mécanisme d'inspiration sociale qui repose sur des échanges de messages explicites entre des agents produits et agents ressources.

Contexte : le scénario choisi, est que, face à une perturbation sur une ressource, le re-séquencement émerge d'une négociation entre les produits, en prenant en compte l'information fournie par la ressource qui a une vision plus fine de sa file d'attente et de son taux d'utilisation (cf. la Figure 25).

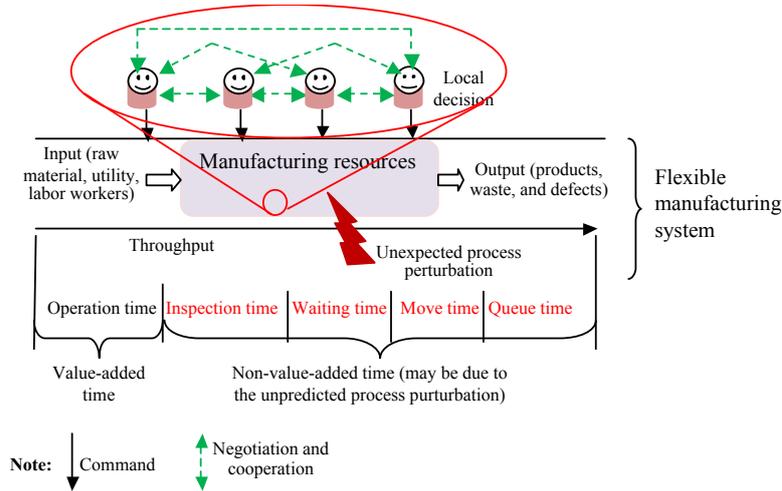


Figure 25 : scénario d'étude

Contribution : chaque « agent produit » déclare ses intentions selon la gamme de production initialement choisie ou mise à jour pendant son parcours. Une intention est formalisée selon le vecteur :

$$v_{im} = [a_i \ r_i \ f_i]$$

Avec i le numéro du produit, m la ressource concernée, a_i la date de démarrage estimée et r_i et f_i , respectivement le temps de l'exécution sur la ressource et le temps de fin souhaitée. La négociation est basée sur deux critères de performance qui sont :

Taux d'utilisation = temps de travail/capacité de travail (1)

Ratio Critique = $\frac{\text{somme des temps des opérations de transformation restant à effectuer}}{\text{temps restant jusqu'à la livraison.}}$ (2)

Les tests ont été réalisés avec un scénario issu de la plate-forme TRACILOGIS du laboratoire CRAN³². Des comparaisons entre cette approche avec négociation et une approche purement réactive (le produit réagit à la perturbation de façon myope) ont montrés un apport significatif en termes de taux de service et de *makespan*. Ces résultats ne peuvent pas être généralisés car ils dépendent fortement du contexte d'étude. Toutefois, ils dressent des perspectives intéressantes pour la thèse de Tsegay Mezgebe. En particulier, nous projetons d'explorer la théorie du consensus pour proposer un re-séquencement dynamique.

³² Cette plate-forme sera présentée en de chapitre.

II.4.3.3 Phase 3 : adaptation structurelle

L'adaptation structurelle (ou transformation), concerne les systèmes de pilotage pour lesquels l'environnement est stable mais dont les projets ou missions ont changé. Cela peut être assimilé à la notion de reconfiguration qui permet d'affecter et de répartir les fonctionnalités aux objets du système en fonction des nouvelles missions. Dans le cadre de la thèse d'Antoine Manceaux, nous nous sommes intéressés au ré-équilibrage /reconfiguration dynamique des lignes d'assemblage (Manceaux, 2015).

Contexte : L'équilibrage de lignes d'assemblage Assembly Line Balancing (ALB) est un problème largement étudié dans la littérature. Plusieurs revues de la littérature ont été suggérées par la communauté de la recherche opérationnelle telles que (Buxey, 1973)(Ghosh and Gagnon, 1989) et (Scholl and Becker, 2006). Plus récemment, une classification des problèmes de type ALB a été proposée par (Battaïa and Dolgui, 2013). Ces études révèlent le fossé existant entre les problèmes considérés dans le monde académique et ceux qui se posent dans la réalité industrielle, ces derniers étant impactés par le facteur d'échelle, entre autres. Par ailleurs, les divers travaux de la littérature visent à résoudre des problèmes hors-ligne, c'est-à-dire sans prendre en compte les événements liés au fonctionnement du système en temps réel (Grangeon et al., 2011). Une des pistes qui nous semblait prometteuse a été, dans un premier temps, d'intégrer les informations portées par le produit dans des approches classiques d'équilibrage pour déterminer le meilleur rééquilibrage de ligne face à des aléas et, par la suite, d'étudier la pertinence d'une architecture hybride combinant :

- une approche centralisée et prédictive donnant lieu (en fonction des nombres d'opérateurs, des demandes clients, etc.) à un portefeuille d'équilibrages possibles (appelés Taktplaybook).
- une approche réactive permettant au produit de changer sa gamme logique lors d'un évènement perturbateur pour réduire l'impact sur l'équilibre de la ligne (cf. Figure 26).

Contribution : Chaque produit possède une gamme logique affectant un ensemble de tâches i de I à un poste de travail j de J . Cette gamme logique suit l'équilibrage initial. A l'arrivée d'un évènement perturbateur, l'approche réactive s'attache à retrouver un nouvel équilibre (respectant la cadence visée appelée Takt-time) en affectant le reste des tâches appartenant à I^* aux postes de travail J^*

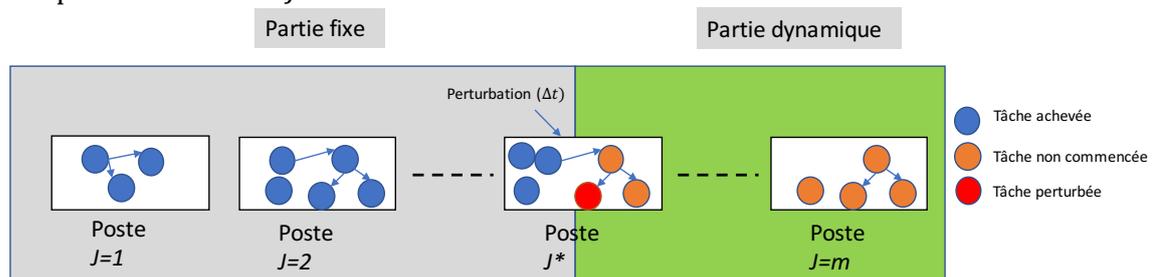


Figure 26 : le film de production d'un produit (gamme logique)

- I^* : un ensemble de tâches que nous pouvons réaffecter pour rééquilibrer dynamiquement la ligne $I^* \subseteq I$. A noter que la tâche impactée par la perturbation à t_0 (notée i_0) est un élément de I^* .
- J^* : un ensemble de postes de travail auquel une tâche de I^* peut-être réaffectée : $J^* \subseteq J$. Avec j_0 le poste de travail impacté par l'évènement perturbateur à t_0 ($j_0 \in J^*$).

Une formalisation de ce problème a été réalisée sous forme de modèle Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) dans (Manceaux et al., 2016). Des résolutions sur des instances de l'entreprise TRANE et de la littérature ont été réalisées (Manceaux, 2015)(Clavier, 2017). Des comparaisons entre une méthode exacte et des méthodes approchées comme ILS, Tabou Search ont été réalisées (Clavier, 2017). Selon les tailles des instances et la position du retard, la plupart de ces méthodes permettent de donner des solutions satisfaisantes et respectent la contrainte de réactivité (temps de résolution court) mais ne permettent pas de résoudre des instances différentes (des caractéristiques différentes de lignes d'assemblages avec des leviers d'actions différents). C'est pour rechercher plus de modularité et pour la possibilité de choisir un levier d'action différent en fonction des caractéristiques de la ligne que nous nous sommes intéressés à des formalismes comme les automates communicants (Manceaux, 2015). Une méthodologie a été proposée pour définir des classes de problèmes de rééquilibrage et une heuristique d'instanciation de modules élémentaires (patterns)

- module « action » : déplacer/paralléliser ;
- module « vérification » : contraintes de précédences/parallélisations /champs d'action ;
- module « maitre » permettant d'orchestrer ces modules en fonction des problèmes spécifiques à résoudre et du levier d'action choisi.

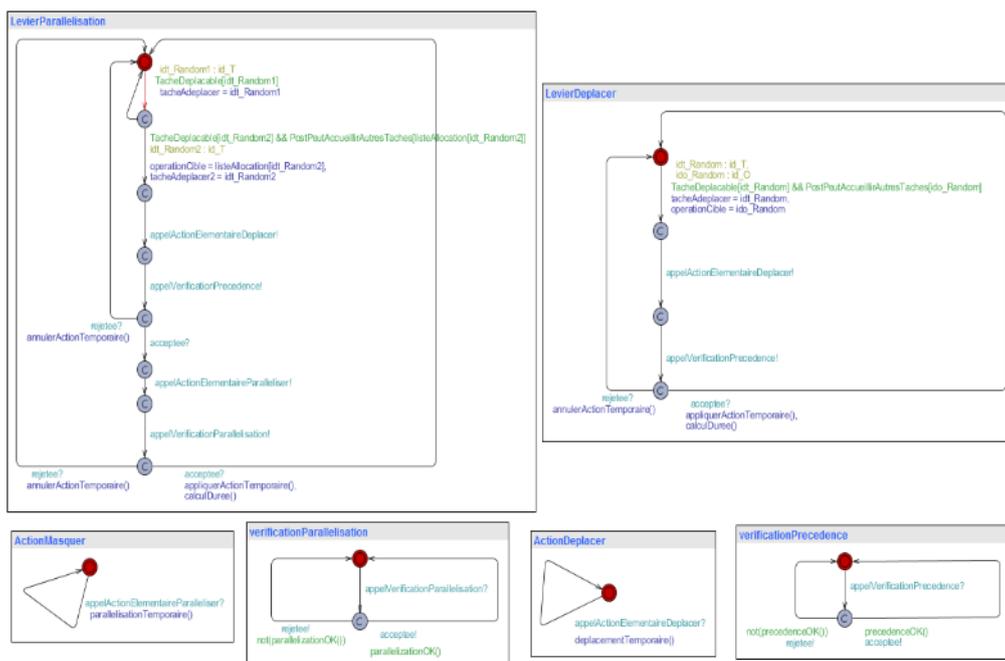


Figure 28 : l'instanciation des modules élémentaires dans Uppal pour le levier parallélisation

La résolution est obtenue en utilisant la vérification formelle de modèles de systèmes à évènements discrets) SED, appelée model-checking (l'outil choisi est Uppal). Il s'agit d'une technique formelle qui explore l'espace d'états d'un modèle SED pour identifier si la valeur de certaines propriétés sur l'ensemble ou une partie de l'espace d'état est vérifiée. Ces propriétés sont exprimées en utilisant une logique temporelle pour de la recherche d'atteignabilité. Dans notre cas la propriété recherchée est : existe-il un cas où toutes les tâches sont allouées et que l'objectif de Takt est respecté ?

II.4.3.1 Phase 4 : évolution structurelle

La phase évolution concerne les systèmes dont les projets (finalités) sont changeants dans un environnement changeant. Dans ce cas, les compensations synchroniques du système de pilotage ne sont plus suffisantes et une évolution de la structure du système devient inévitable. On parle alors de la fonction d'état qui exprime le comportement du système qui change sa structure pour maintenir son identité (les nouvelles relations finalités/environnement). Deux mesures duales existent : l'entropie et la variété. L'entropie sert à évaluer le nombre de complexions du système et la variété le nombre d'états de celui-ci. Un exemple d'évolution structurelle peut être trouvé dans les algorithmes évolutionnistes, en particulier les algorithmes génétiques, qui utilisent des structures de longueur variable.

Notre hypothèse, est qu'un système de pilotage adaptable (nous pourrions même parler de « durable », au sens capable d'évoluer de façon autonome et auto-finalisé³³) est celui qui peut opérer les 4 types de changement : phase 1 (régulation), phase 2 (adaptation fonctionnelle), phase 3 (adaptation structurelle) et phase 4 (évolution).

Notre interprétation du modèle VSM nous conduit à dire que, par construction, le modèle permet ces quatre phases de « recherche d'équilibre ». Ainsi, comme le montre la Figure 27, le modèle VSM repose sur 5 sous-systèmes. Pour retrouver l'équilibre un système de pilotage cherchera à réduire la variété (variations) provenant de l'environnement et à amplifier la variété (variantes) de sa fonction de contrôle. En passant d'abord par le sous-système de coordination (2) et le sous-système de surveillance (3*) (régulation). Dans sa quête d'équilibre, le système de pilotage fera appel aussi à deux autres sous-systèmes (intelligence (4) et politique (5)). L'intelligence est responsable de l'**adaptabilité** du système en faisant le lien entre les activités primaires (implémentées dans le système opérant (1) qui est composé de façon récursive des autres systèmes) et l'environnement. Pour réussir cette adaptation, le sous-système « intelligence » doit être capable de traiter l'information qui vient de l'environnement avec l'objectif d'anticiper les aléas/changements. Il est donc aussi responsable de la cohérence entre les objectifs locaux et globaux. La politique permet de fixer les objectifs globaux du système et sa finalité. Elle reflète la stratégie de l'entreprise, sa culture, son code de conduite (éthique), etc. Ainsi, comme expliqué précédemment, une culture classique du résultat (finalité résultat) privilégiera une dimension purement économique. Une entreprise qui a une culture humaine forte ou qui vise par exemple le classement « great place to work » mettra en place une organisation avec une finalité de type développement durable.

³³ Le système est capable de définir et de modifier ses propres finalités (selon (Le Moigne, 1994))

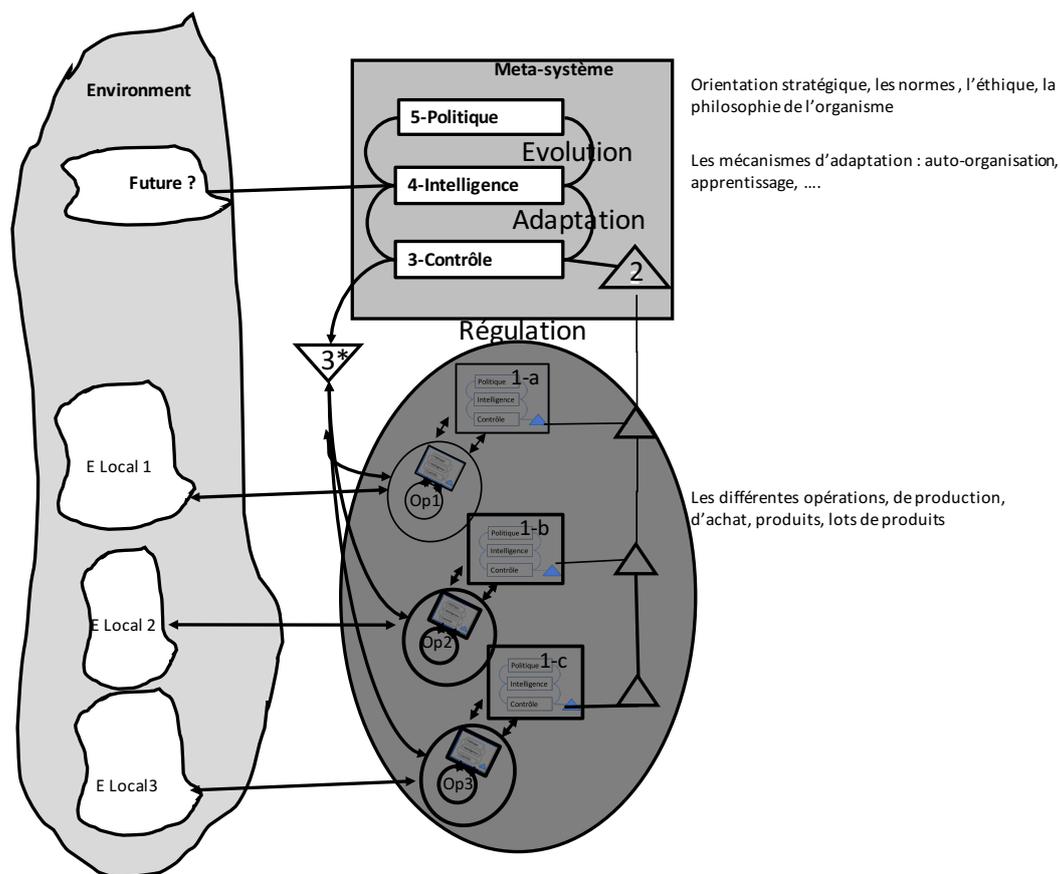


Figure 27 : modèle de pilotage viable est ses différentes phases d'équilibration

II.5 PARADIGMES DE MODELISATION DES SYSTEMES COMPLEXES-ADAPTABLES

II.5.1 Modèles des systèmes complexes-adaptables

C'est le besoin d'adaptation qui a conduit, au début des années quatre-vingt-dix, à une série d'initiatives conjointes entre centres de recherche, universités et entreprises dont l'objectif commun fût de concevoir et développer les systèmes de production de l'avenir. Dans ce cadre, une des plus importantes initiatives a été l' « Intelligent Manufacturing Systems » (IMS project) qui fédère des travaux, depuis 1989, en Automatique, Informatique et Mécanique (Yoshikawa, 1995). Les idées de base d'IMS sont la conception et l'implémentation de systèmes agiles afin de répondre rapidement aux perturbations dans les systèmes de production. Dans cette vision les systèmes de production sont considérés comme des systèmes complexes. Ils sont constitués de nombreuses unités autonomes avec diverses capacités d'adaptation et ils peuvent faire apparaître des phénomènes émergents importants qui ne peuvent être dérivés, de manière simple, à partir de la connaissance de leurs composants. Ainsi dans leur livre (Valckenaers and Van Brussel, 2016) expliquent « *While a complex system consists of a large number of components (often called "agents") that interact, the term complex-adaptive system (CAS) refers to a complex system in which the components (called "holons" in this book) not only interact but also adapt and/or learn. Self-similarity is often observed in a CAS. Adaptivity gives a complex system robustness (resilience) against disturbances and autonomic behavior (homeostasis)* ».

C'est dans ce même mode de pensée que l'on a vu apparaître le concept de produit intelligent et les SCP. Les produits sont dotés d'une mémoire sur laquelle les données et les exigences opérationnelles peuvent être stockées et des capacités cognitives leur permettront de prendre des décisions (cf. la proposition de (Herrera, 2011) dans Figure 28). De cette façon, le produit lui-même demande les ressources requises et organise les processus de production pour ses différentes transformations (Herrera, 2011; Pannequin and Thomas, 2012)(Sallez, 2012).

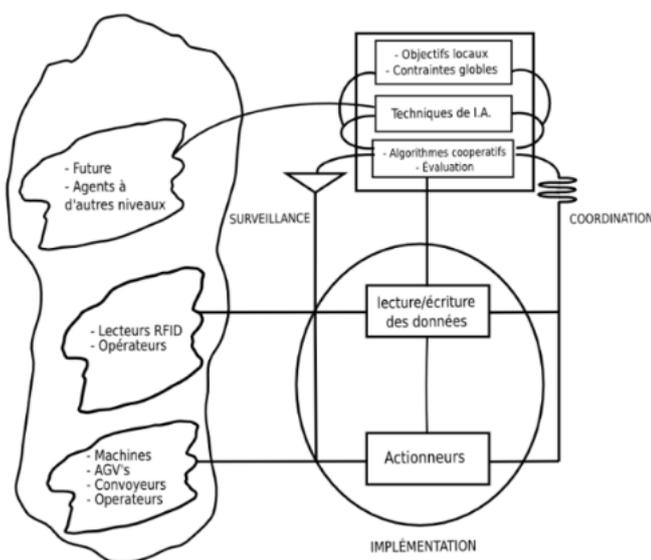


Figure 28 : la structure du « produit » intelligent selon le modèle VSM (Herrera, 2011)

La conception et la mise en œuvre de systèmes complexes-adaptables repose majoritairement sur le paradigme d'IAD (présenté précédemment) et la programmation orientée-objets. Les principaux paradigmes de modélisation issues de l'IAD et qui peuvent contribuer à cette formalisation sont :

- les BMS (Biologic Manufacturing Systems) utilisent des approches basées sur l'observation des systèmes biologiques et qui implémentent des propriétés permettant l'adaptabilité face aux changements de l'environnement (auto-reconnaissance, auto-croissance, auto-rétablissement, etc) (Ueda, 1992).
- les HMS (Holonc Manufacturing Systems) sont basés sur le concept de Holon. Le terme Holon est un néologisme combinant le mot grec holos (le tout) et le suffixe –on- qui suggère une entité pouvant être contenue dans d'autres Holon (Koestler, 1968) formant ainsi une Holarchie. Celle-ci est dotée d'une capacité d'auto-organisation et de communication (Valckenaers et al., 1994).
- Les FrMS (Fractal Manufacturing Systems) reposent sur la théorie mathématique des fractals proposée par (Mandelbrot, 1975). Chaque fractal peut être décrit par des caractéristiques internes (auto-organisation, auto-similitude, auto-optimisation et évolution). Les fractals peuvent s'adapter aux influences de l'environnement sans structure organisationnelle formelle, les objectifs sont au niveau de chaque unité (Warnecke & Hüser, 1993) (Tharumarajah, 1996).

Dans (Tharumarajah, 1996) une comparaison de ces trois paradigmes de modélisation a été faite en montrant que la principale différence réside dans la facilité de mise en œuvre (il a

surtout souligné la difficulté de mise en œuvre des FMS). Une comparaison plus récente a été réalisée des points de vue fonctionnel et structurel dans (Ryu & Jung, 2003). Ainsi, d'un point de vue structurel, la reconfiguration du fractal se fait en construisant de nouveaux fractals ou en réassignant de nouvelles fonctions (**adaptation structurelle/reconfiguration et évolution**). Au niveau des BMS, l'adaptation se fait en réarrangeant des lignes de flux entre cellule vivantes disponibles (**adaptation fonctionnelle**). Pour les HMS, l'adaptation se fait par la réaffectation de ressources à des holons **reconfiguration**.

Nous constatons aujourd'hui que les implémentations réelles sont insuffisantes, particulièrement pour les FrMS et les BMS, en raison de l'inertie inhérente à tout changement de paradigmes dans les entreprises. En effet, passer de systèmes hiérarchiques comme ceux implémentés dans des systèmes ERP ou SCM aux systèmes complexes-adaptables et auto-organisés nécessite des changements en profondeur dans l'organisation du travail, dans la culture de l'entreprise mais aussi dans toute l'infrastructure technique pour implémenter ces systèmes complexes. Ainsi et par pragmatisme, la recherche dans ce domaine s'est orientée vers des pistes de pilotage hybride. Au sein du projet scientifique SIA du département ISET du CRAN, un cadre générique de modélisation (méta-modèle) a été développé en s'appuyant sur le modèle de système viable (VSM) (Beer, 1984) et en l'associant au concept de système contrôlé par le produit pour modéliser un système de planification et de pilotage de la production MRPII.

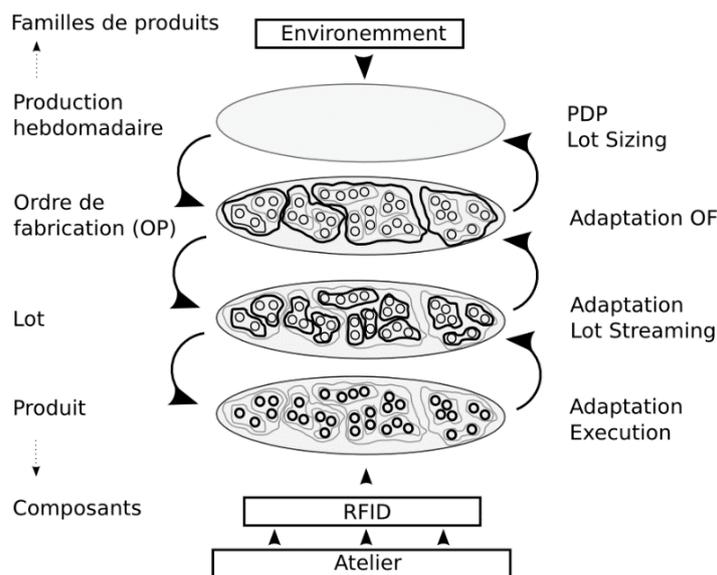


Figure 29 : les communautés d'agents pour la planification et le contrôle (Herrera, 2011)

Dans ce modèle, les produits intelligents sont capables d'effectuer des actions par rapport aux événements de leur environnement local. Au niveau supérieur, le lot de produits est lui-même modélisé sous forme de modèle viable et ainsi de suite. Ce modèle a été particularisé dans la thèse de E. Zimmermann qui est en cours (Zimmermann et al., 2017b) pour modéliser un système de pilotage hybride basé sur des lots élémentaires intelligents. Plusieurs verrous sont à soulever au niveau scientifique (ex : comment faire la coordination (horizontale et verticale), quels indicateurs mettre en place ?) et au niveau technologique (comment mettre en œuvre cette récursivité avec les systèmes multi-agents qui n'implémentent pas nativement cette notion ? (Valckenaers and Van Brussel, 2016)).

II.5.2 Vers une approche anthropocentrée

Ces différents modèles des systèmes complexes-adaptables que nous avons présentés sont technico-centrés. L'Homme est mis dans la boucle du contrôle, *a posteriori*, quand la situation se dégrade ou face à un élément imprévu (Le Moigne, 1994). On parle alors de « Magic Human » ; dans (Trentesaux and Millot, 2016) on peut lire : « *l'homme qui, par sa capacité de perception, de compréhension et de projection vers le futur (Awareness) peut prendre la bonne décision* ». Les auteurs présentent aussi les différentes « facettes » de l'Homme dans l'entreprise (magique, source d'erreurs, d'accidents ...). Ainsi, dans une approche technico-centrée, l'accent est mis sur la résolution des problèmes techniques sans prendre les aspects humains (Boy, 2012).

La vision classique prônée depuis plusieurs décennies est que l'automatisation maximale permettrait de réduire les risques d'erreurs, les tâches à non-valeur ajoutée et les risques d'accidents (d'après le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et la Direction générale de la prévention, 60% des accidents sont liés à l'Homme). Néanmoins, des approches industrielles de type «Lean» considèrent que ces erreurs humaines sont une source de compréhension du système et donc de son amélioration. Ainsi Shingo disait « *Ne demandez pas à votre personnel de vous apporter des solutions, demandez-lui de vous apporter des problèmes* ». Tout l'enjeu est de trouver le juste équilibre entre risques d'erreurs et opportunités d'amélioration.

La conception centrée Homme a été définie dans ISO 9241-210:2010 comme "*Human-centered design is an approach to interactive systems development that aims to make systems usable and useful by focusing on the users, their needs and requirements, and by applying human factors/ergonomics, usability knowledge, and techniques. This approach enhances effectiveness and efficiency, improves human well-being, user satisfaction, accessibility and sustainability; and counteracts possible adverse effects of use on human health, safety and performance*". Ainsi l'approche de conception peut être vue comme holistique intégrant la technologie et les facteurs humains de façon interactive.

Même si la littérature est riche dans la prise en compte de l'aspect humain en particulier en ergonomie et de plus en plus dans la sûreté de fonctionnement, dans le domaine des IMS, très peu de travaux existent et les questions majoritairement abordées sont l'adaptation des degrés d'automatisation au facteur humain. Dans le livre (Valckenaers and Van Brussel, 2016), les auteurs proposent un nouveau modèle pour concevoir les systèmes complexes-adaptables, qu'ils ont appelé « *Design for the Unexpected* ». Ils montrent l'importance de l'Homme dans l'agilité des futurs systèmes de production et le virage que doit prendre ces-derniers pour passer de systèmes holoniques de production vers une société mécatronique plus humaine. D'un point de vue plus pratique, les auteurs proposent d'enrichir leur architecture de modélisation des systèmes holoniques ARTI³⁴ (Valckenaers and Van Brussel, 2016), par un nouveau Holon appelé e-Person. Ce nouveau Holon est un agrégat des rôles qui peuvent être joués par l'Homme dans son environnement. Il peut être vu comme une ressource, un décideur d'activité, une partie d'une activité, un décideur pour d'autres ressources, etc. Dans (Trentesaux and Millot, 2016) les auteurs montrent le manque d'attention accordée à l'intégration de l'aspect humain dans les IMS et fournissent des solutions basées sur les principes de la coopération Homme-machine pour garder l'Homme dans la boucle de contrôle des processus avec différents niveaux d'implication identifiés par les niveaux d'automatisation (stratégique, tactique et opérationnel). L'objectif de ces principes est de proposer une approche axée sur

³⁴ Activity- Resource-Type-Instance (ARTI)

l'Homme pour concevoir et évaluer des systèmes, des processus et leurs interactions avec les humains.

Ce paragraphe n'a pas pour vocation de traiter de manière exhaustive la question des aspects humain dans le pilotage des systèmes intelligents mais plutôt de monter l'intérêt grandissant de ces nouvelles approches de modélisation et de poser des questions et des hypothèses qui nécessitent d'être raffinées, voir corrigées, dans nos futures activités de recherche.

Notre conviction est qu'un système complexe-adaptable *centré Homme* peut être modélisé sous la forme d'un modèle VSM représentant les différents niveaux hiérarchiques et deux niveaux de coordination : Horizontale entre Homme-Ressource-Produit et verticale entre les différentes agrégations de ces derniers (cf. Figure 30). Pour permettre la proactivité du système, le système sera supporté par des modèles de simulation/émulation imitant le système réel. Cette façon de voir les nouveaux systèmes de pilotage sera notre ligne directrice. Nos travaux de recherche futurs s'attarderont dans un premier temps, à explorer et à prioriser les directions à prendre dans ce domaine, relativement nouveau, et dans un deuxième temps, de mettre en œuvre des solutions reposant sur le méta-modèle présenté dans la Figure 30.

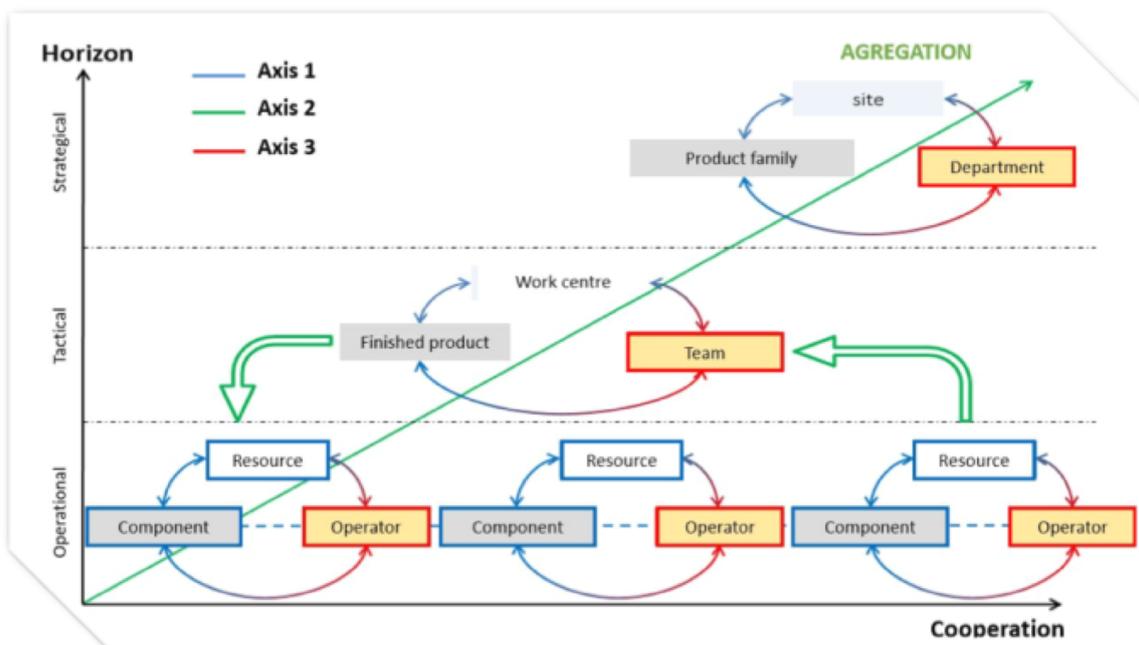


Figure 30 : cadre de modélisation des systèmes adaptables centré Homme

Le comportement du système de pilotage intelligent est complexe. Peu de résultats de recherches tangibles et réalisables sur la maîtrise de la complexité de la théorie du système général ont été proposées. De ce fait, les mises en œuvre restent à ce jour limitées et l'acceptation dans le domaine industriel varie selon les applications (Lanz et al., 2012). Dans le paragraphe suivant, nous présenterons les principales architectures de pilotage intelligent. Nous utiliserons une grille de classification basée sur les concepts expliqués dans ce paragraphe.

II.6 ARCHITECTURES D'IMPLEMENTATION

II.6.1 Synthèse de l'état de l'art

Dans les paragraphes précédents nous avons vu que la mise en œuvre de ces modèles de systèmes de pilotage complexes-adaptables repose majoritairement sur le paradigme d'IAD et la programmation orienté-objets. On peut citer, sans être exhaustif, plusieurs exemples d'architectures de systèmes intelligents basés sur des agents YAMS (Van Dyke Parunak, 1987), AARIA (Van Dyke Parunak, Baker, & Clark, 1997), METAMORPH (Maturana, Shen, & Norrie, 1999), DMAS InteRRaP (Fisher, 1999), ADACOR (Leitao, 2004), Pabadis Promise (Wunsch & Bratukhin, 2007), FrMS (Ryu & Jung, 2003), NEIMS (Gu, Tang, Zheng, & Wang, 2011), HCBA (Chirn and McFarlane, 2000), D-MAS (Verstraete et al., 2008) ou PROSIS (Pujo et al., 2009). La recherche d'une implémentation efficace des HMS reste un sujet à forte attractivité au sein de la communauté des chercheurs travaillant sur les systèmes agiles-adaptables. Nous pouvons citer des travaux récents comme ORCA-FMS (Pach et al., 2014), ADACOR2 (Barbosa, 2015) et Service-oriented Holonic Manufacturing Systems – SoHMS). Ces architectures peuvent être caractérisées selon le cadre présenté dans la Figure 31.

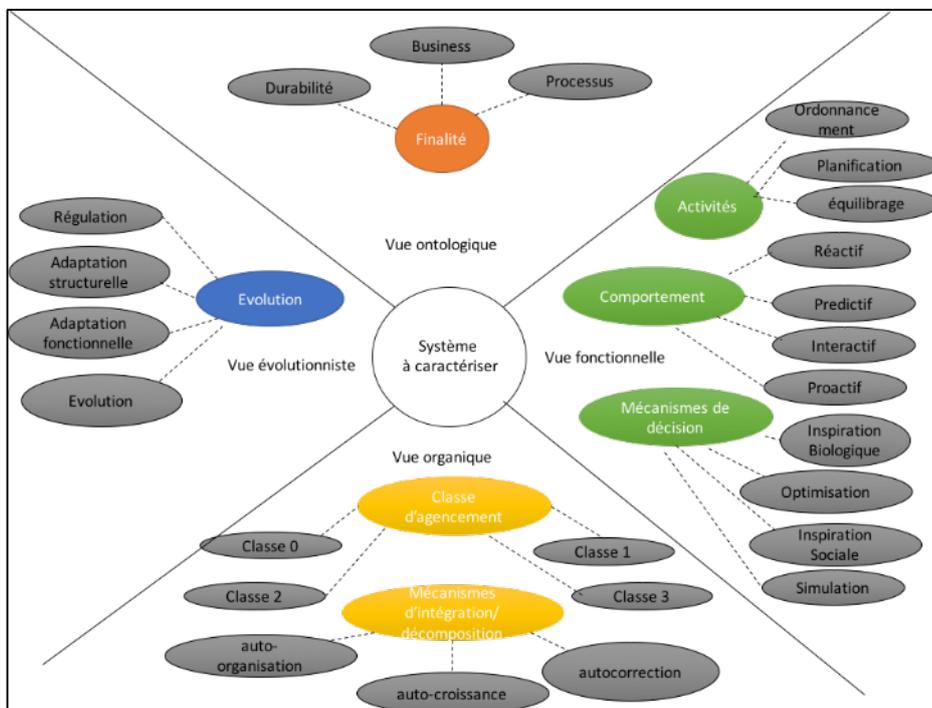


Figure 31 : cadre de caractérisation des systèmes complexes-adaptables

Ce dernier reprend les concepts que nous avons développés précédemment, à savoir : en jaune la vue organique qui montre comment le système de pilotage s'organise face à une perturbation, en orange la finalité (ou orientation), en bleu sa capacité à évoluer et implémenter les 4 phases d'équilibration et enfin en vert son fonctionnement (les activités implémentées, ses comportements face aux différents évènements du système opérant et aussi les mécanismes de décision). Ce cadre peut être vu comme une première tentative de classification des architectures de pilotage complexes-adaptables qui nécessite, sans doute, un raffinement voire des corrections. Une première analyse de ces architectures selon le cadre proposé montre qu'elles ont majoritairement une finalité centrée processus et tentent au mieux d'hybrider des

activités centrées processus et business sans critères génériques pour y parvenir. Nous constatons aussi que très peu d'architectures implémentent les 4 phases d'équilibrage.

Par rapport à nos travaux sur la modélisation des systèmes de pilotage intelligents, plus précisément les SCP, nous avons cherché à éprouver et à démontrer, l'applicabilité et l'efficacité industrielle du paradigme SCP en utilisant les systèmes multi-agents et une plate-forme expérimentale que nous présentons dans le paragraphe suivant.

II.6.2 Présentation de TRACILOGIS

II.6.2.1 Le système opérant

Le plateau technique TRACILOGIS (TRAçabilité Identification et contrôle par le produit pour les chaînes LOGIStiques), en particulier, sa cellule d'assemblage/désassemblage représentée dans la Figure 32 à un double objectif :

- mettre en œuvre, tester et comparer différentes techniques de traçabilité (invasives ou non) au sein de la chaîne logistique en général et la filière bois en particulier.
- offrir un environnement de test permettant la mise en œuvre de scénarii de production dans un contexte centralisé, distribué ou hybride grâce aux systèmes multi-agents développés pour implémenter des systèmes de pilotage intelligents de type HMS.

Le système opérant est composé d'un système de convoyage réparti en 4 zones (cf. Figure 32), chacune étant pilotée par un automate programmable industriel de type Siemens S7-300, l'ensemble du système étant équipé par un réseau RFID HF. La zone A correspond à une zone de transformation où les plateaux vides sont marqués sur les machines M1 ou M2. La zone B est une zone tampon permettant de simuler un point de découplage par exemple (cf. Figure 33). La zone C permet d'assembler les pièces sur le plateau en fonction de la configuration du produit (une caméra est aussi installée pour la reconnaissance des couleurs) (cf. Figure 34).

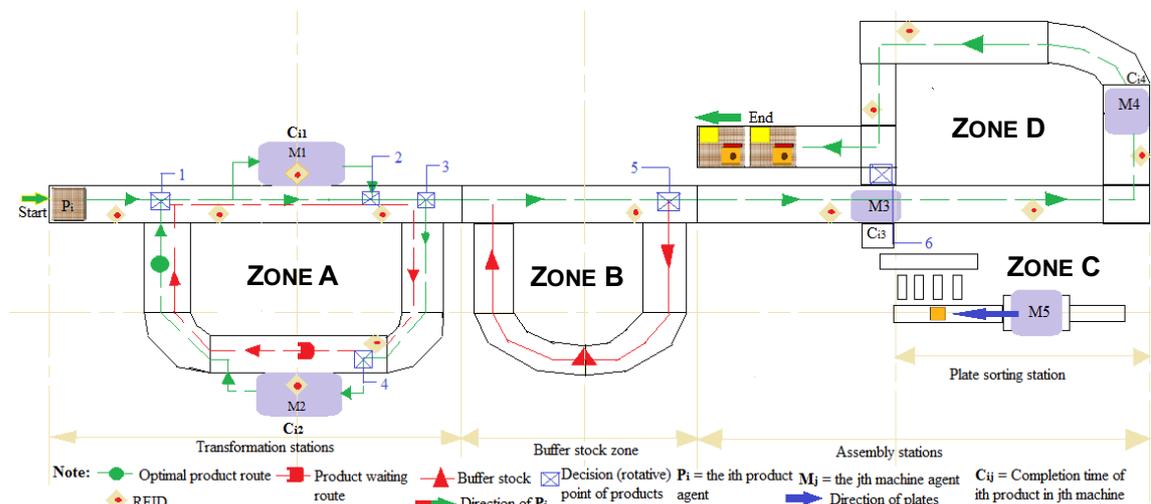


Figure 32 : système opérant de la cellule CAD de TRACILOGIS



Figure 33 : zone assemblage (C)

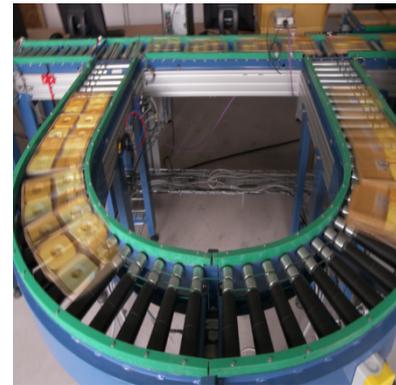


Figure 34 : zone de découpage (B)

II.6.2.2 Le système de pilotage

Les systèmes multi-agents reposent sur les éléments de base appelé « agent » qu'il convient de définir. D'un point de vue informatique, un agent est décrit par un objet abstrait similaire à un objet de la programmation orientée objet, sauf qu'au lieu d'être défini en termes de méthodes et d'attributs, un agent est défini en termes de comportements (Huhns and Singh, 1998).

Pour développer ces agents nous avons utilisé JADE (Java Agent DEveloppement framework). Il s'agit d'une plate-forme logicielle permettant le développement de systèmes multi-agents et d'applications conformes aux normes FIPA (FIPA, 2002). Elle comprend trois composantes de base : un environnement d'exécution dans lequel les agents peuvent "vivre", une bibliothèque de classes que les programmeurs peuvent utiliser pour développer leurs agents et un ensemble d'outils graphiques permettant la gestion et l'administration des agents actifs.

Pour mettre en place un système contrôlé par le produit, une plate-forme basée sur JADE a été créée. Cette plate-forme utilise deux bibliothèques : une bibliothèque générique pour faciliter le développement d'agents logiciel Cobalt (COMmon Base for Agent deveLopmenT) et une bibliothèque spécifique pour pilotage du système opérant : Topase (TracilOgis Platform Agent SystEm) (cf. Figure 35).

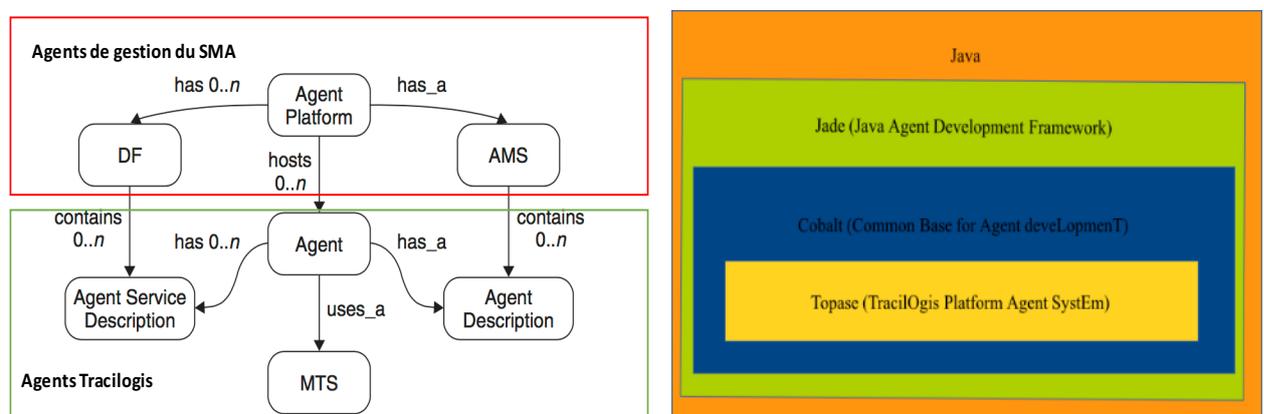


Figure 35 : la structure logicielle

Ainsi, le système développé est constitué des agents de fonctionnement comme DF qui permet de gérer les services proposés par les agents de types produit et ressource, les agents AMS permettant la description des agents hébergés sur la plate-forme. Les agents³⁵ propres au système de pilotage (Topase) sont présentés dans la Figure 36.

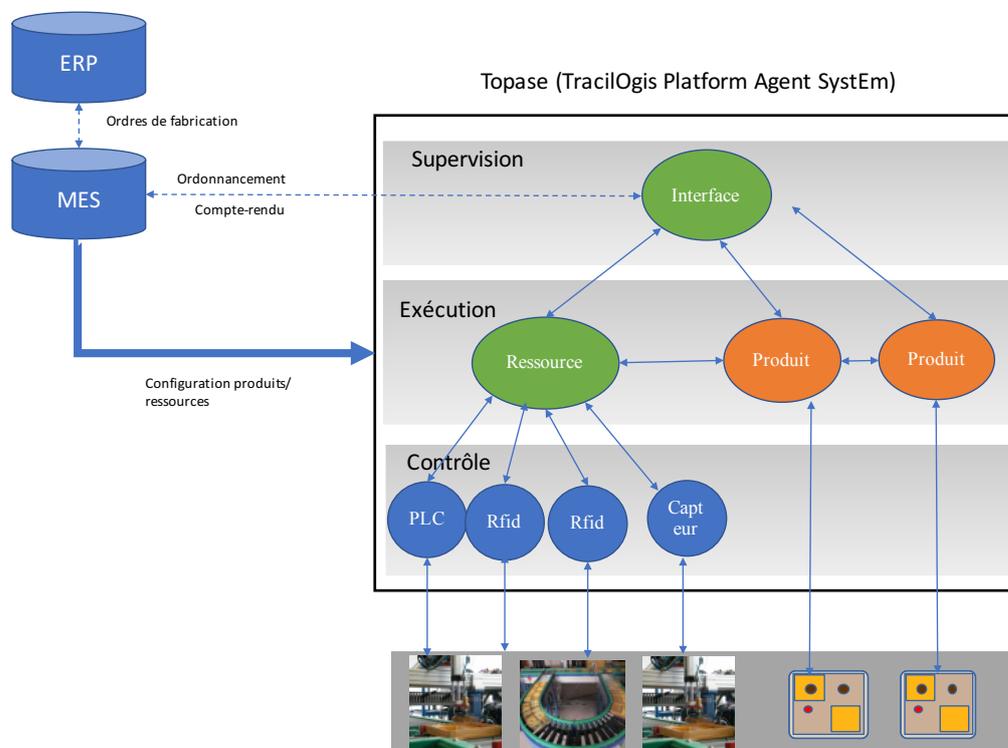


Figure 36 : l'architecture de pilotage implémentée pour la plate-forme TracilOgis

Un agent interface a été créé pour permettre à l'utilisateur (ou à des services externes) de superviser (donner des ordres et recevoir des comptes-rendus). Chaque objet physique du système opérant possède son « double numérique» (exemple PLCAgent, RFIDAgent représenté en bleu dans la Figure 36). Ces agents ont des fonctions purement utilitaires pour permettre la communication entre des agents cognitifs (ressource, produit) avec un équipement (automate industriel, lecteur RFID, caméra, capteur, base de données...). Ils permettent par exemple de régler le problème d'accès concurrent à une ressource externe en centralisant les interactions (les requêtes). Les agents produits et ressources implémentent des comportements leurs permettant de percevoir leur environnement.

³⁵ Le diagramme de classes représentant les principaux agents implémentés pour le pilotage est présenté en annexe Hind Bril EL HAOUZI

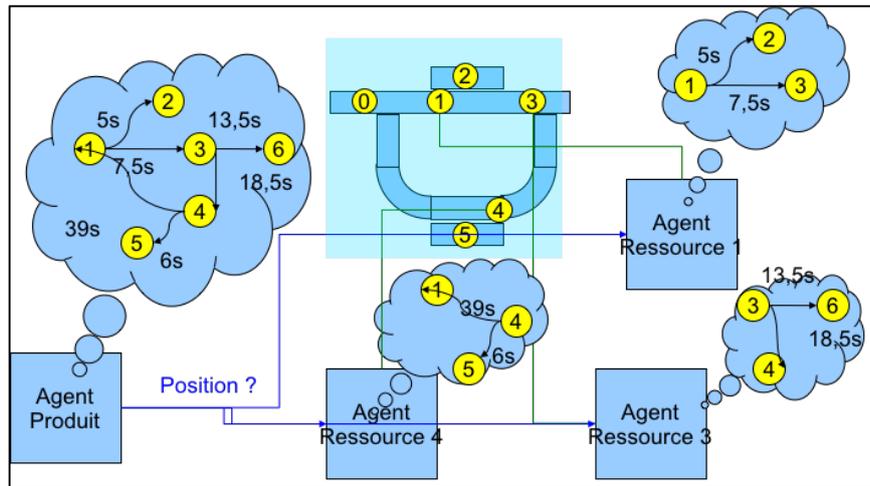


Figure 37 : perception de l'environnement des agents produits et ressources

Dans le scénario de base, le produit est l'élément le plus « intelligent ». Ainsi, comme le montre la Figure 37, la ressource n'a qu'une perception partielle de son environnement (chaque agent ressource connaît les services qu'il offre, ses deux proches voisins et le temps de parcours pour accéder à ses voisins). Le produit, quant à lui, a une perception de l'environnement plus large lui permettant de construire son cycle de vie dans la cellule CAD. Pour construire son parcours, l'agent dispose de plusieurs comportements dont les principaux sont décrits par des diagrammes d'activités. Un premier comportement permet à l'agent produit de découvrir son environnement en construisant un graphe de ressources (leur position et leurs services). A partir de ses données historiques, de sa position à l'instant t, il décide du chemin à suivre en utilisant l'algorithme de Dijkstra pour calculer le plus courts chemin dans le graphe orienté constitué des ressources et des distances entre celles-ci (cf. Figure 38).

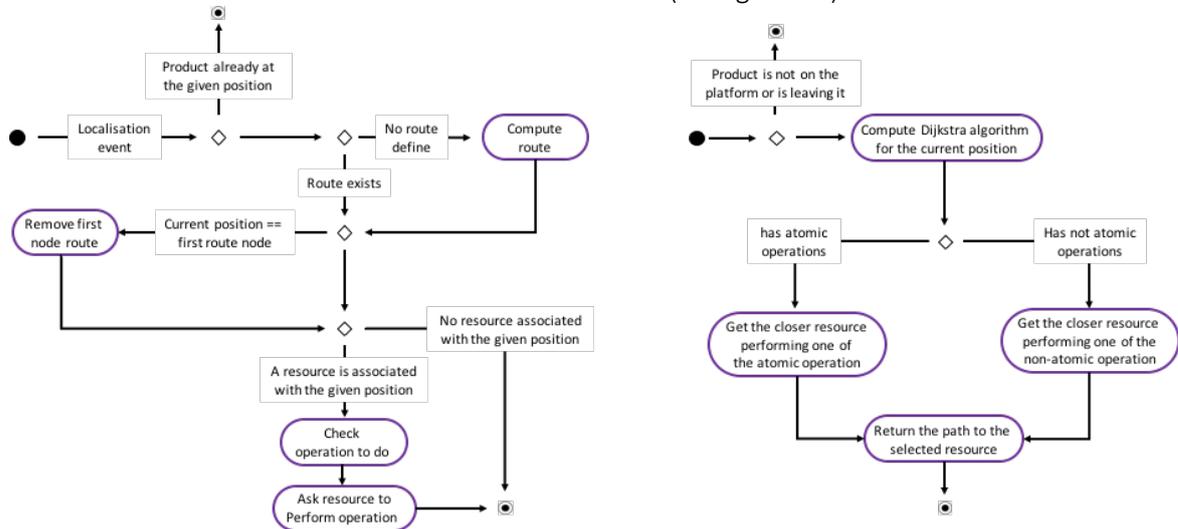


Figure 38 : la découverte de l'environnement du produit et son choix de parcours

Un comportement plus complexe a été ajouté pour permettre aux produits d'échanger leur configuration (SWAP) lors d'un évènement perturbateur. Les interactions entre agents sont basées sur FIPA CFP (Call For Proposal). Ainsi, l'agent (initiateur) cherche à échanger sa configuration en modifiant sa priorité avec un autre agent. L'agent recevant une demande

accepte ou refuse en fonction de sa propre priorité, sa date de fin estimée, sa configuration actuelle et sa position (cf. Figure 39).

PID	Tag	Priorité	Conf. actuelle	Conf. voulue	Fin Estimée
1	T001	8			10:00
2	T002	6			10:02
3	T003	5			10:04
4	T004	5			10:05
5	T005	7			10:07

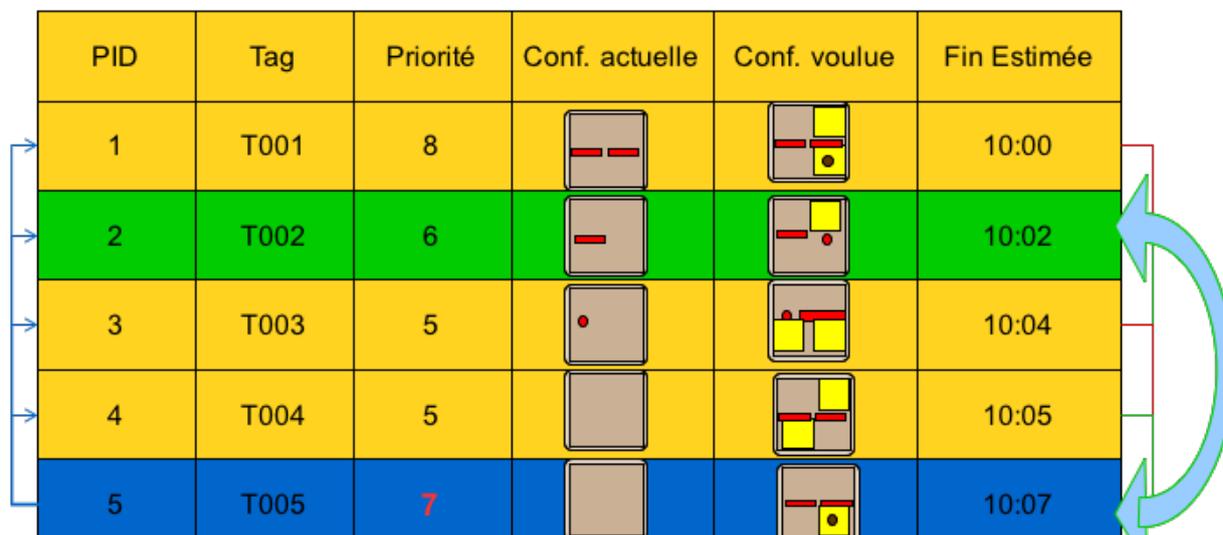


Figure 39 : illustration du comportement SWAP

A ce jour, la plate-forme nous a permis d'étudier plusieurs scénarios de pilotage. Dans le cadre de la thèse d'E. Zimmerman, elle nous a permis de transposer le cas Acta-Mobilier à l'échelle de la cellule CAD de TRACILOGIS pour évaluer et quantifier l'apport du modèle de groupement de lots et leurs séquençements (Zimmermann et al., 2017c) (Zimmermann et al., 2017a). Elle nous a également permis de simuler un protocole de négociation entre les produits et une ressource pour réadapter le planning de production suite à un événement perturbateur (Mezgebe et al., 2017). Nous sommes convaincus que l'approche de modélisation offerte par cette plate-forme est conforme à la vision de l'industrie 4.0 en proposant de doter chaque élément du système physique de son « double numérique » et en proposant une gestion des ressources et de ses interactions avec les produits permettant de mettre en place une vision « plugin and produce » (grâce, en particulier, à la notion de « service »).

En simulant et en mettant en œuvre notre vision de système de pilotage adaptable selon une approche VSM nous le rendrons durable de par la prise en compte dynamique tant de l'environnement et de son action sur la politique, que de l'Homme. Pour autant, nous aurons besoin de plusieurs évolutions de cette plate-forme que nous décrirons dans notre projet scientifique. Le paragraphe suivant a pour vocation de présenter les nouvelles avancées technologiques qui nous conduisent à penser que celles-ci contribueront à faire passer les applications de mise en œuvre des paradigmes qui ont entre 20 à 30 ans aujourd'hui à une TRL³⁶ plus avancée.

³⁶ TRL : en anglais (Technology Readiness Level), qui peut se traduire par niveau de maturité technologique
Hind Bril EL HAOUZI

II.7 AVANCEES TECHNOLOGIQUES

II.7.1 Introduction

« La loi de Moore » en 1965 prévoyait déjà la vitesse du développement technologique dans la société d'aujourd'hui. Les ordinateurs récents deviennent de plus en plus petits tout en permettant une plus grande puissance de calcul. Ce fait a conduit à la prolifération des objets physiques dotés de systèmes informatiques embarqués appelés CPS. Par ailleurs, dans le prolongement de la vision « ubiquitous computing » qui remonte aux années 90 et en conséquence directe de la croissance rapide des dispositifs informatiques, nous avons vécu l'apparition du paradigme de l'Internet des objets (IoT) qui scelle une nouvelle avancée pour les systèmes de production du futur. Dans ce qui suit, l'objectif est de donner quelques définitions de ces concepts ainsi que la vision Industrie 4.0.

II.7.2 Les CPS

La première définition que l'on peut trouver des (CPS) date de 2006 (Lee, 2006) lors de travaux avec la National Science Foundation¹ (NSF) américaine : *“Cyber-physical systems (CPS) are physical and engineered systems whose operations are monitored, coordinated, controlled and integrated by a computing and communication core. This intimate coupling between the cyber and physical will be manifested from the nano-world to large-scale wide-area systems of systems. And at multiple time-scales”*. De cette définition, nous retiendrons que les CPS sont des systèmes résultants d'un couplage entre des processus physiques et des capacités de calcul, de communication et de commande. Dans les travaux de (Cardin, 2016), l'auteur présente une synthèse de définitions et de classifications des CPS ainsi qu'une analyse quantitative montrant la prolifération des travaux autour de ce nouveau concept. Il explique que la terminologie « cyber », venant de la cybernétique (de Norbert Wiener) vieille de 60 ans, prend tout son sens avec les CPS. Ainsi, des auteurs comme (Lee et al., 2015) ont donné une classification du niveau d'intelligence d'un CPS :

- Niveau C1 : capable de se connecter à un réseau,
- Niveau C2 : traiter de l'information et la retranscrire,
- Niveau C3 : connaître son environnement,
- Niveau C4 : avoir des capacités cognitives (diagnostiquer et agir) et le niveau supérieur.
- Niveau C5 : le CPS peut s'adapter en cas de perturbation pour retrouver l'équilibre.

II.7.3 Définition IoT

Le terme Internet des objets (IoT) a été introduit par Kevin Ashton pour décrire comment l'internet des objets peut être créé par l'association des technologies d'auto-identification et des capteurs aux objets de tous les jours. Au fil du temps, la définition a évolué « *the IoT as a network of entities that are connected through any form of sensor, enabling these entities, which we term as Internet-connected constituents to be located, identified, and even operated upon* » (Ng and Wakenshaw, 2017).

La prolifération des objets connectés à Internet permet d'interagir entre les dispositifs et les objets, mais aussi entre les objets et les personnes, offrant ainsi de nouvelles opportunités d'applications. En effet, les personnes peuvent se connecter directement à des éléments (tels que des téléphones portables, des enregistrements de santé électroniques, etc.) (cf. Figure 38).

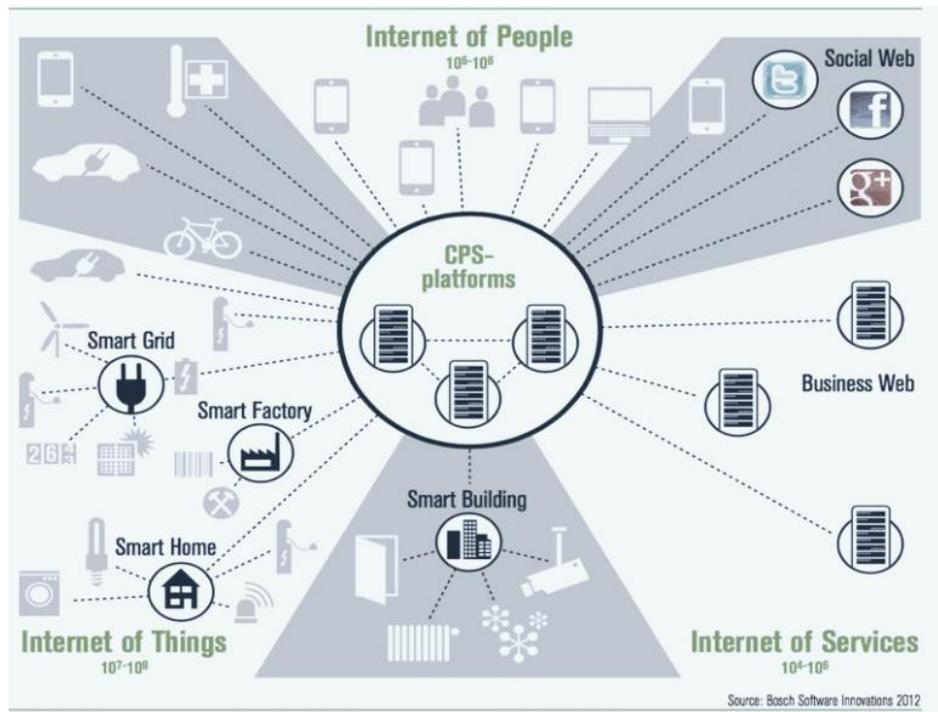


Figure 40 : les CPS au cœur des 3 types d'Internet

II.7.4 Différences entre IoT et CPS

A la première lecture des définitions de CPS et de l'IoT, il est parfois difficile de voir la différence entre ces deux paradigmes. Nous présentons ici deux critères de différenciation qui nous semblent les plus représentatifs.

II.7.4.1 Une histoire de communautés ?

Le paradigme CPS est couramment utilisé (et préféré par rapport à IoT) par les communautés d'ingénierie « mécatronique ». Il est également plus largement utilisé par des informaticiens travaillant sur des systèmes embarqués. En outre, le CPS est préféré à IoT aux États-Unis. IoT est couramment utilisé (et préféré par rapport à CPS) par les communautés de réseaux et télécommunications. En Europe et en Chine, IoT a tendance à être utilisé plus que CPS, même si ce dernier terme gagne en popularité dans des domaines tels que l'usine du futur ou l'initiative Industrie 4.0.

II.7.4.2 Une différence d'axe de synchronisation

L'IoT va connecter différents objets les uns aux autres (synchronisation horizontale). En revanche les CPS utilisent la connexion au cloud et aux capteurs pour synchroniser les objets physiques à leur homologue cyber (virtuel) (synchronisation verticale) (cf. Figure 39).

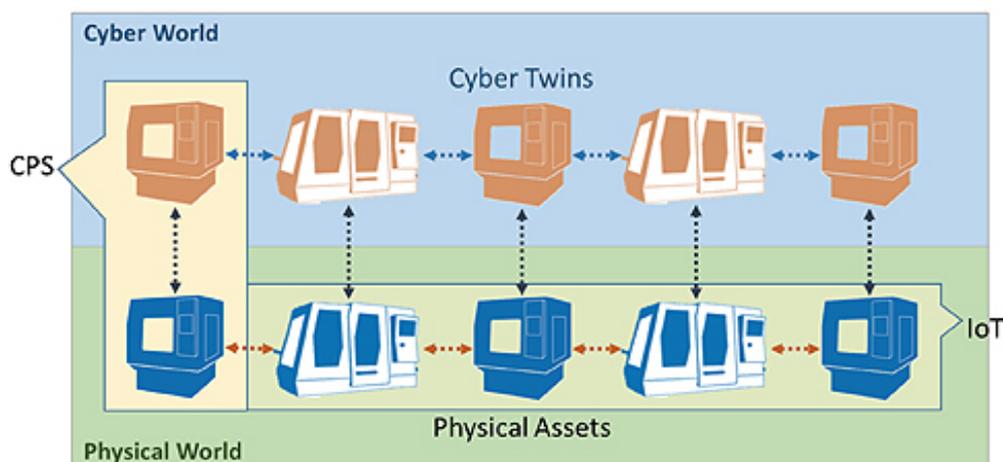


Figure 41 : la différence entre IoT et CPS selon J LEE ³⁷

II.7.5 Industrie 4.0

Sur la base de ces deux avancées technologiques majeures et des transformations, à la fois sociétales et organisationnelles, qu'elles induisent, les contours de l'usine du futur se sont dessinés. Ainsi, nous avons vu se lancer plusieurs initiatives, de manière pratiquement simultanée, au niveau national et international, avec pour objectif principal de tracer les feuilles de route pour tirer pleinement profit de ces technologies et préparer les transformations organisationnelles et sociétales que nous allons décrire ci-après. Sur les 28 pays européens, 11 programmes nationaux sur l'innovation et le renouveau industriel ont été lancés (Autriche, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Irlande, Lettonie, Pays-Bas, Suède, Royaume-Uni). Une analyse compare les visions de l'usine du futur de ces pays avec celles proposées au niveau européen (PATHFINDER, 2014). Malgré les initiatives locales, les pays européens se sont inscrits majoritairement derrière l'initiative allemande : l'Industrie 4.0.

II.7.5.1 Une stratégie, une vision

Il s'agit d'une initiative stratégique du gouvernement allemand qui a été adoptée dans le cadre du « Plan d'action Stratégie 2020 pour la haute technologie » en 2011 (Kagermann et al., 2013). L'idée derrière ce terme est qu'après les trois premières révolutions industrielles provenant de la mécanisation, de l'électricité et de l'informatique, l'introduction de l'IoT et des CPS dans l'environnement de fabrication inaugure la 4^{ème} révolution industrielle. Ainsi, les usines peuvent se développer dans des environnements intelligents dans lesquels le fossé entre le monde réel et le monde numérique diminue. La forte polarisation du monde électrotechnique et hiérarchique de l'automatisation de l'usine passera par des réseaux d'entreprises intelligentes, qui permettront des processus dynamiques de réingénierie et offriront la capacité de répondre avec souplesse aux perturbations, aux pannes ou à toutes sortes d'événements non prévus.

II.7.5.2 Des paradigmes

L'industrie 4.0 repose sur trois paradigmes : le produit intelligent (déjà présenté), la ressource intelligente et l'Homme augmenté. Les ressources (machines, modules de production, cellule...) seront composées de CPS qui échangent de manière autonome des informations,

³⁷ <http://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/>
Hind Bril EL HAOUZI

déclenchent des actions et se contrôlent indépendamment (Zamfirescu et al., 2014). De cette façon, les machines peuvent s'auto-organiser dans des réseaux de production. Les lignes de production deviendront si flexibles et modulaires que même la plus petite taille de lot pourra être produite dans des conditions de production de masse très flexible. Le paradigme « opérateur augmenté » vise à intégrer l'Homme dans ce nouvel environnement des systèmes de production. L'industrie 4.0 ne conçoit pas une organisation de production sans l'Homme (contrairement à l'approche CIM des années 80) : les opérateurs humains sont reconnus comme les éléments les plus agiles dans le système de production, étant au maximum adaptables à un environnement de travail de plus en plus difficile. Ainsi, cette aptitude de l'opérateur humain à s'adapter lui permettra de se confronter à une grande variété d'emplois allant de la spécification et du suivi, à la vérification des stratégies de production. L'opérateur pourra être assisté par des applications supports lors de la résolution des problèmes (Gorecky et al., 2014).

II.7.5.3 Une architecture de référence

Au niveau architecture, l'industrie 4.0 repose sur une architecture de référence appelée RAMI pour Reference Architecture Model Industry 4.0. Cette architecture peut être considérée comme une architecture orientée services (SOA). Elle est organisée selon trois axes (cf. Figure 42) :

- l'axe 1 représente les différents niveaux hiérarchiques, du produit intelligent au monde connecté, en passant par l'entreprise intelligente.
- L'axe 2 représente un ensemble de couches allant des objets physiques au processus métiers.
- L'axe 3 représente le cycle de vie des produits avec les deux macro-phases de développement et de production (cf. Figure 42).

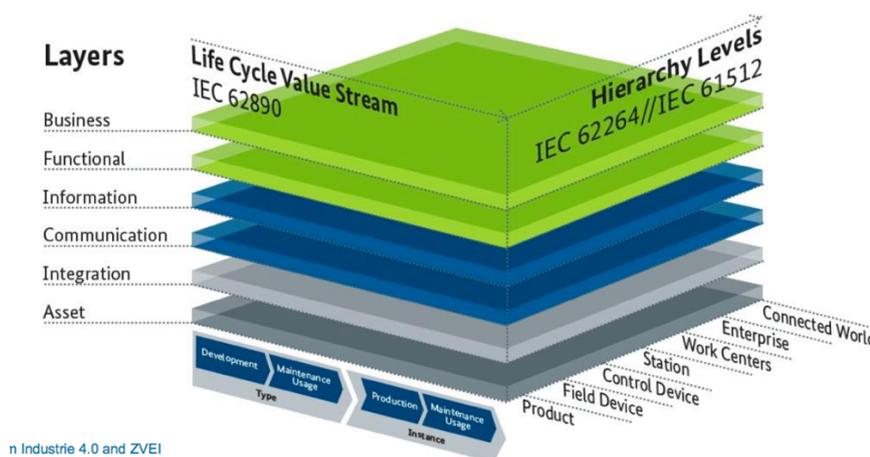


Figure 42 : l'architecture RAMI (source)

Ce débat majeur sur Industrie 4.0 qui s'est développé en Allemagne puis dans toute l'Europe, s'est propagé dans le même temps à d'autres pays, comme les Etats-Unis, la Chine (Intelligent Manufacturing), le Japon (e-factory) ou la Corée (Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy).

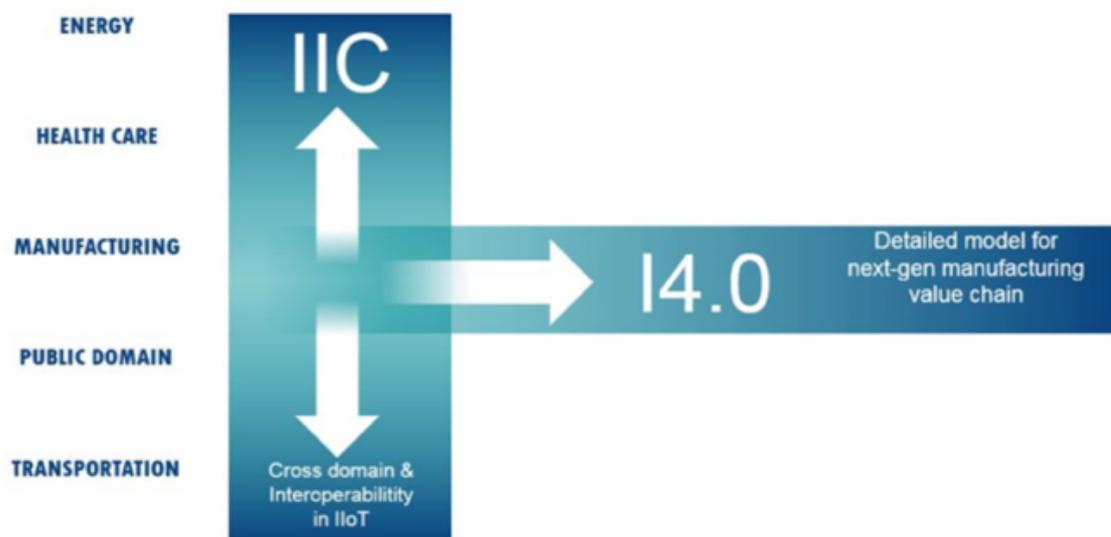


Figure 43 : différences entre l'initiative I4.0 et IIC³⁸

Aux États-Unis, plusieurs initiatives telles que la Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC) ³⁹ ou le Industrial Internet Consortium (IIC) ⁴⁰ favorisent le concept de fabrication avancée qui repose sur l'intégration de nouvelles technologies telles que l'IoT dans les systèmes de production pour améliorer les produits et les processus de fabrication. La fabrication « avancée » partage la plupart des paradigmes de l'industrie 4.0, en particulier l'Internet des Objets pour répondre au besoin de personnalisation de masse et d'amélioration de l'efficacité. Les représentants de Platform Industrie 4.0 et du Consortium Internet industriel se sont rencontrés pour explorer l'alignement potentiel de leurs deux architectures, respectivement, le modèle d'architecture de référence pour Industrie 4.0 (RAMI4.0) et l'architecture industrielle de référence Internet (IIRA). RAMI 4.0, l'accent est mis sur la fabrication. L'IIRA croise plusieurs domaines d'application (cf. Figure 41). En dépit, des différences de noms, les domaines d'application les deux architectures partagent plusieurs mêmes concepts.

II.8 BILAN ET DISCUSSIONS

Les paradigmes et les avantages de toutes ces avancées technologiques et scientifiques, soulèvent la question de comment déployer la vision et les outils de l'industrie 4.0 et les aligner à la stratégie d'affaire de chaque entreprise ? Plusieurs travaux ont abordé cette question (Dassisti et al., 2017). C'est dans ce cadre que le projet du consortium Acatech, composé de chercheurs universitaires et d'entreprises, a proposé une représentation des niveaux de maturité pour accompagner les entreprises dans leur transformation numérique en augmentant leur niveau de maturité ou « capacité numérique », de la numérisation à l'auto-

³⁸ source :<http://blog.iiconsortium.org/2016/03/the-industrial-internet-is-important-new-technologies-and-new-business-opportunities-will-disrupt-industries-on-many-level.html>

³⁹ The SMLC was formed in the mid-2000s to help revitalize the oil & gas, process, and hybrid manufacturing industrial sectors in the US. The Coalition's vision is to improve manufacturing competitiveness and sustainability in a manner that individual members would not be able to realize on their own.

⁴⁰ IIC : Consortium Internet industriel est le partenariat public-privé mondial sans but lucratif de plus de 250 organisations membres, le Consortium regroupe des leaders d'entreprise, des entrepreneurs, des chercheurs et des gouvernements en une seule communauté afin de promouvoir l'innovation et de partager les meilleures pratiques.

organisation en passant par la capacité de prédiction (cf. Figure 44). Chaque entreprise doit décider quelle étape de maturité représente le meilleur équilibre entre les coûts, ses capacités et les gains escomptés. Le consortium propose d'utiliser cette matrice selon quatre domaines structurels (systèmes d'informations, culture, ressources, organisation). Cela conduira à une analyse complète et une définition d'un certain nombre de lignes directrices et principes qui permettent aux entreprises d'identifier les capacités d'Industrie 4.0 qu'elles doivent encore développer.

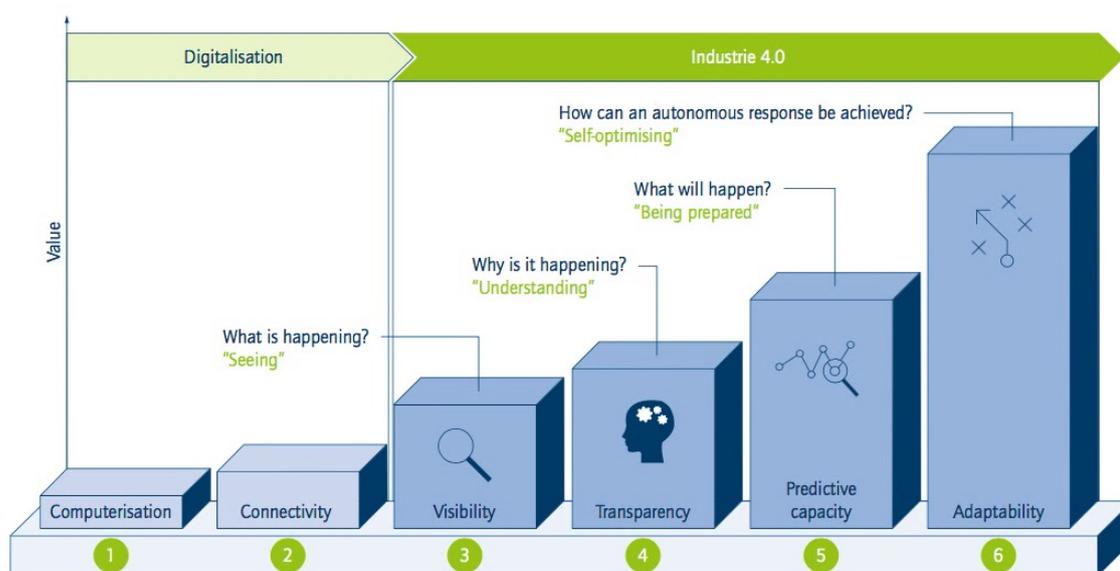


Figure 44 : Indice de maturité de la gestion de la transformation numérique des entreprises⁴¹

Dans ces niveaux de maturité la capacité de prédiction (de simuler les différents scénarios pour définir et choisir les orientations futures) est présentée comme un prérequis à l'adaptabilité ou l'auto-optimisation: *"Building on the transparency stage, the next development stage is predictive capacity. Once it has reached this stage, the company is able to simulate different future scenarios and identify the most likely ones. This involves projecting the digital shadow into the future in order to depict a variety of scenarios that can then be assessed in terms of how likely they are to occur"*. (FIR e. V. at RWTH Aachen University)

Ainsi, dans le chapitre suivant nous présenterons les nouvelles tendances de la simulation et la virtualisation qui permettront de dépasser l'usage classique de la simulation dans la conception et la validation des systèmes de production à un usage plus actif au cœur du système de prise de décision.

⁴¹ source: FIR e. V. at RWTH Aachen University
Hind Bril EL HAOUZI

Chapitre

III

La simulation et la virtualisation pour les systèmes de production intelligents

« Nous raisonnons toujours sur des modèles. »

(Paul VALERY, Cahiers.)

III.1 INTRODUCTION

L'utilisation d'outils numériques de prédiction et de simulation pour soutenir, à la fois la conception intégrée du système de production et le pilotage de l'usine, revêt une importance capitale dans les programmes relatifs à l'usine du futur (EFFRA, 2012). D'une part, les exigences du marché ainsi qu'un environnement commercial hautement compétitif augmentent le besoin de tels outils, et d'autre part, la complexité des systèmes de production induite par la vision Industrie 4.0 implique que l'environnement de l'usine doit rester à tout moment prévisible, analysable et simulable, malgré la tendance croissante à la décentralisation amenée par les CPPS et aux systèmes modulaires de fabrication en général (Rossgoderer, 2015). En plus de cette modularité, ces-derniers apportent des capacités de connectivité, d'autonomie et la double vision (physique et numérique).

Grâce à ces capacités et les différentes représentations virtuelles du produit et des processus qui peuvent être utilisées le long de leur cycle de vie, la co-simulation des usines intelligentes devient de plus en plus crédible. Les auteurs comme (Rosen et al., 2015) montrent que cette virtualisation et la vision amenée par IoT faciliteront le partage des informations via une boucle fermée de la numérisation autour du concept Digital Twin (cf. Figure 45).

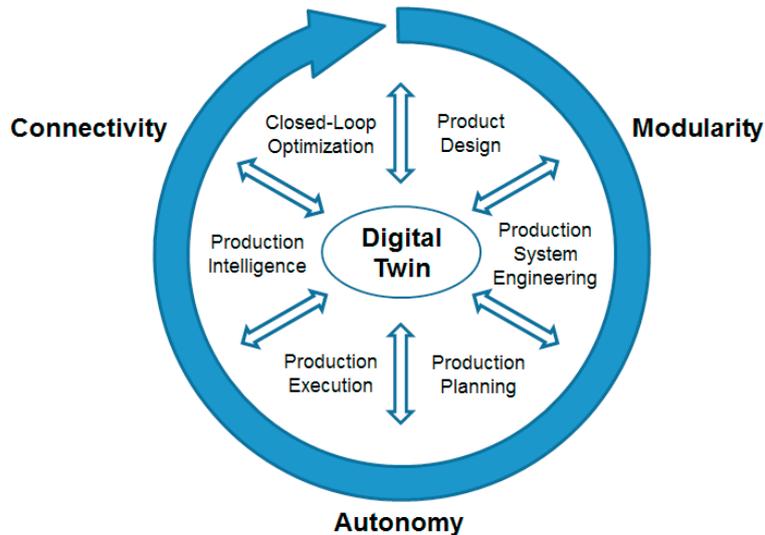


Figure 45 : le Digital Twin

Le terme Digital Twin a été présenté au grand public pour la première fois dans « NASA's integrated technology roadmap » (feuille de route de la technologie de la NASA, 2010 et 2012). Ce concept peut être considéré comme l'un des prochains grands progrès de la technologie de modélisation et de simulation des systèmes de production (cf. Figure 46) (Mourtzis et al., 2014), (Rosen et al., 2015). Ainsi, chaque élément physique sera accompagné de sa représentation virtuelle qui permet de prédire (dans le monde virtuel) ses performances futures dans le monde physique (Khajavi, Holmström, 2015).

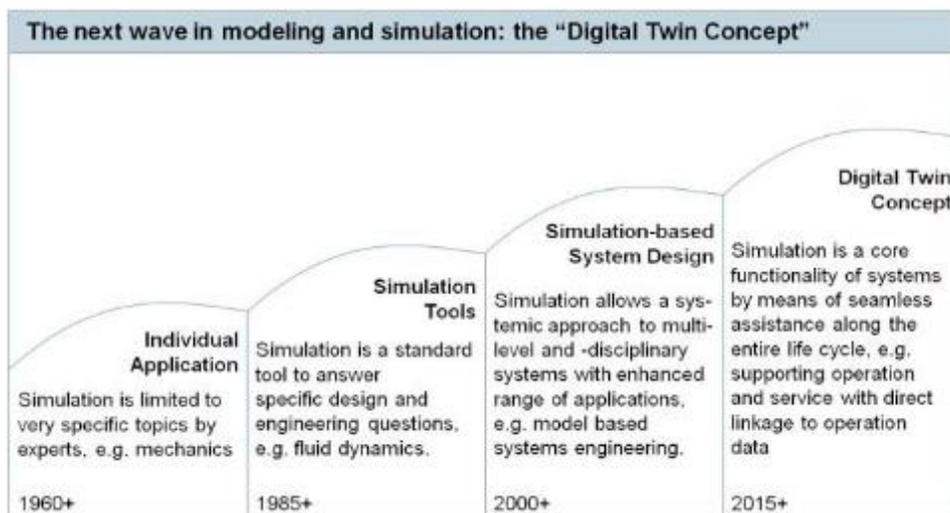


Figure 46 : les nouvelles tendances de la simulation

Les principaux avantages des technologies de prédiction et de simulation incluent la capacité de comparer des configurations alternatives pendant la conception du système (off-ligne) réduisant à la fois le temps de mise sur le marché et le coût de mise en œuvre (Weyer, 2014) mais aussi un usage « on-line » avec des ajustements à court terme en récoltant des informations et des connaissances (des CPPS) sans perturber le système physique et en planifiant ou en testant les processus de (ré) ingénierie en cours d'exécution.

De nombreux défis se présentent lorsque l'on tente d'exploiter pleinement le potentiel de ces technologies et méthodes de simulation dans cet environnement d'usine basée sur les CPPS

(Mourtzis, 2014). Dans ce contexte, le projet européen «PATHFINDER⁴²» s’inscrivant dans le cadre des «Factories of the Future» a permis de présenter 8 actions de recherche en se basant sur huit critères (l’offre actuelle du marché, les besoins futurs, les manquants, etc.) :

- Action de recherche 1 (RA1) - l’utilisation du cloud (et en particulier le paradigme IaaS⁴³) pour augmenter les performances de calcul et, par exemple, faciliter l’accès à des modèles de simulation et de prévision et des analyses complexes et performantes à l’aide d’un catalogue d’applications de fabrication pour les PME ;
- Action de recherche 2 (RA2) - la simulation multi-domaines et multi-disciplines : le développement de modèles et d’outils multidisciplinaires pour concevoir des systèmes flexibles et facilement reconfigurables intégrant des modèles de différents domaines ;
- Action de recherche 3 (RA3) - la simulation pour la gestion de la fin de vie : outils de simulation pour la phase de démantèlement (démantèlement, réparation et reconstruction). Exemple d’aide à la décision pour aider à la conception ou à la reconfiguration des lignes d’assemblage/de-assemblage ;
- Action de recherche 4 (RA4) - l’intégration multi-niveaux des technologies de prédiction et de simulation : application de simulations multi-niveaux visant à fournir différentes représentations d’informations pertinentes (fonctionnalités d’accès multi-niveaux, agrégation de données avec différentes fonctionnalités de granularité) ;
- Action de recherche 5 (RA5) - la simulation temps réel pour le contrôle et la supervision : la collecte de données en temps réel à partir de toutes les ressources de l’usine et la synchronisation des ressources physiques et virtuelles. L’intégration des outils de simulation avec MES (Manufacturing Execution System) ;
- Action de recherche 6 (RA6) - les modèles de simulation et de prédiction intelligents et auto-apprenants. L’ajustement des modèles se fait à partir des données historiques ou temps-réel ;
- Action de recherche 7 (RA7) - apprentissage et formation basés sur la simulation *centrée Homme*. La simulation et la virtualisation peuvent être utilisées dans le cadre d’un jeu de rôle pour la formation ou pour aider à l’optimisation multicritères basée sur les capacités des opérateurs humains ;
- Action de recherche 8 (RA8) - le crowdsourcing basé sur la simulation et la prédiction: le crowdsourcing est la pratique qui correspond à faire appel au grand public pour aider à la construction d’une offre. Ainsi, la simulation peut être utilisée pour la compréhension et l’analyse des attentes des clients à travers les réseaux sociaux et les technologies IHM.

La figure 47 présente l’analyse des orientations stratégiques des 8 pays européens faisant référence à la simulation et aux outils de prédiction par rapport aux 8 actions mentionnées ci-dessous. Par exemple, en France, l’accent est mis sur les actions RA1 et RA7. Le document affirme aussi que les laboratoires d’excellence dans le domaine de la simulation en France sont

⁴² Le projet PATHFINDER s’inscrit dans le cadre des «Factories of the Future», un programme de 1,2 milliard d’euros dans lequel la Commission Européenne et l’industrie collaborent dans le domaine de la recherche pour soutenir le développement et l’innovation de nouvelles technologies dans le secteur manufacturier de l’UE. Voir <http://www.pathfinderproject.eu>

⁴³ IaaS : Infrastructure as a Service : les nouvelles solutions logicielles qui permettent de proposer un service d’hébergement de serveurs virtuels à grande échelle

LSIS/ LIMOS. Dans la suite du document, nous verrons que mes travaux, passés et futurs, s’inscrivent majoritairement dans l’action RA5 (simulation pour le contrôle et la supervision) et une ouverture sur l’action RA7 (apprentissage et formation basés sur la simulation *centrée Homme*).

	RA1	RA2	RA3	RA4	RA5	RA6	RA7	RA8
	Open and Cloud-based S&FT for high-tech performance computing	Multi-disciplinary and multi-domain integrated S&FT	S&FT for life-cycle management	Multi-level S&FT integration	S&FT for real-time factory controlling and monitoring	Smart, Intelligent and self-learning S&FT	Human-centred simulation-based learning & training	Crowdsourcing-based S&FT
Denmark								X
France	X						X	
Germany	X	X	X	X		X	X	
Ireland	X	X	X	X	X	X		X
Netherlands	X		X		X		X	
Netherlands2	X		X	X	X	X	X	
Sweden	X		X		X	X	X	
United Kingdom	X		X			X	X	

Figure 47 : ventilation des travaux de recherche des chercheurs européens selon les RA

Le projet PATHFINDER fait état de six défis pour les technologies de simulation et de prédiction qui sont :

- L'évolutivité : se réfère à la capacité d'une application à fonctionner efficacement lorsque son contexte est modifié. Ce défi porte sur l'intégration progressive et l'adoption des technologies de simulation et de la prédiction avec les différents objets connectés et les « clouds » ;
- La synchronisation du monde numérique et du monde réel : cette synchronisation se réfère à la convergence du monde physique et du monde virtuel, où le second doit se rapprocher étroitement du premier (voire l'imiter) et où le premier génère un grand volume de données à prendre en charge par le dernier. Ce défi concerne l'auto-ajustement (adaptation) des modèles numériques déclenchés par des objets intelligents (CPPS). La co-simulation temps réel est aussi un critère important ;
- Des Interfaces Homme Machine (IHM) avancées : les IHM avancées doivent permettre d'interagir avec les modèles de simulation de manière intuitive et ergonomique. Ce défi s'adresse aux interfaces utilisateur intuitives contextuelles et collaboratives ;
- La cohérence et la sécurité numériques : ce critère vise à garantir la sécurité et l'intégrité des données qui transitent le long du cycle de vie de l'usine ;
- La continuité numérique : de l'intégration verticale et de l'intégration horizontale, où les sources de données distribuées et hétérogènes seront liées et mises à disposition de manière ouverte et interopérable (voir la Figure 47) ;

- La gestion de connaissances et de données dans les technologies de simulation et de prédiction. Ce défi s'adresse aux données massives : définition des ontologies; capture et réutilisation de connaissances pertinentes, également pour la formation et l'éducation.

La Figure 46 montre l'exemple de l'action de recherche (intégration des outils de modélisation et de simulation pour augmenter la synchronisation entre le système physique et sa représentation informatique tout le long du cycle de vie du produit) et une évaluation de sa couverture selon les 7 défis. Comme indiqué sur la Figure 48, cette action permet en particulier la continuité numérique et la synchronisation des modèles numériques et des systèmes physiques.

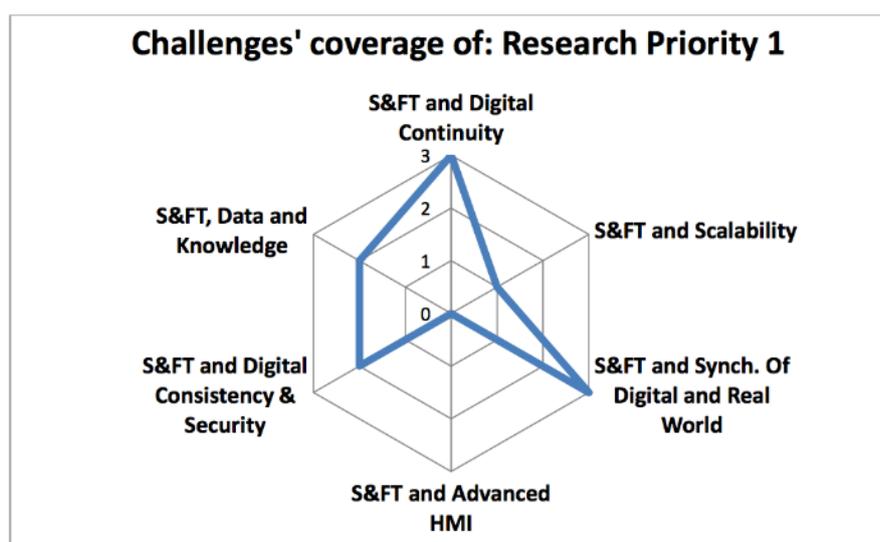


Figure 48 : couverture des 7 défis par l'action de recherche 1

Parmi ces six défis, trois ont été exploitées dans (Weyer et al., 2016). Nous les présenterons en nous inspirant de la recherche du projet MAYA EU-H2020⁴⁴, le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020. Ainsi, comme présenté dans la Figure 49, les trois défis sont : **la continuité numérique** tout au long du cycle de vie de la production, **une synchronisation parfaite entre le monde réel et le monde numérique** et permettant un environnement de **simulation multidisciplinaire** pour aborder des scénarios de production de plus en plus complexes.

⁴⁴ <http://www.maya-euproject.com>

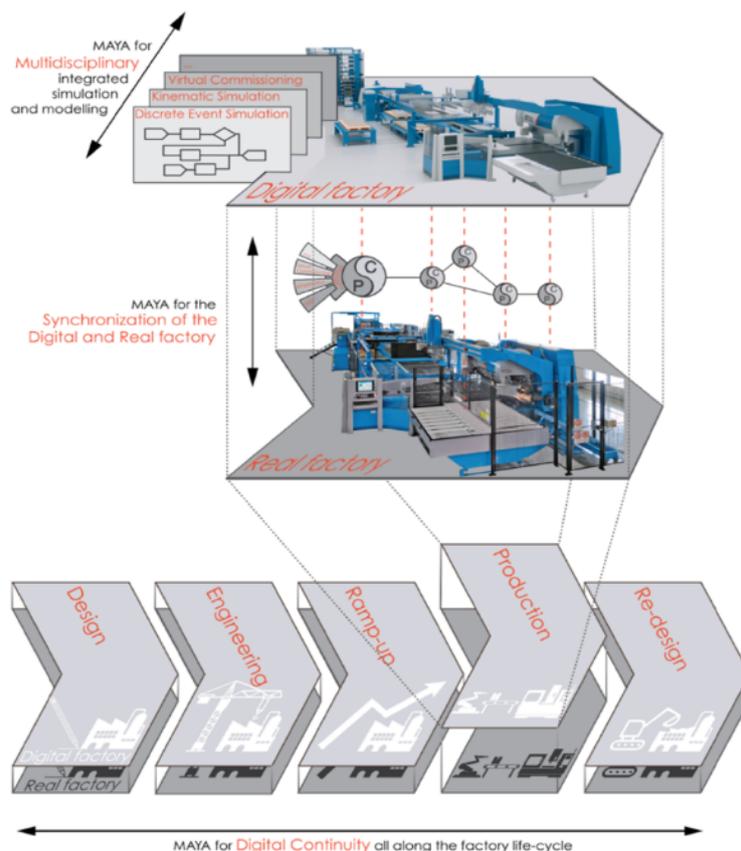


Figure 49 : les défis à exploiter les potentiels de simulation dans les usines basées CPS.⁴⁵

Cette vision de la simulation multidisciplinaire, en tant qu'approche pour créer et simuler une représentation virtuelle de l'usine et de ses « actifs » de fabrication sous des points de vues différents et complémentaires, deviendront les principaux outils pour tester d'autres configurations de produits ou de processus de fabrication et réagir rapidement aux influences imprévisibles dans le pilotage des futurs systèmes de production (PATHFINDER, 2014). Pour exploiter pleinement les potentiels de la simulation multidisciplinaire, il est nécessaire d'avoir un environnement approprié dans lequel différents outils de simulation et dispositifs CPS fonctionneront et interagiront, en établissant des protocoles d'initialisation, de synchronisation et de déconnexion. Le principe est que les différents modèles peuvent utiliser au cours de leur exécution les résultats provenant d'autres types de modèles. Les modèles de simulation doivent être interconnectés et synchronisés les uns avec les autres et permettre l'échange de données pertinentes avec d'autres outils pendant leur exécution.

Le deuxième défi concerne la continuité numérique, il consiste à conserver les informations numériques, pertinentes, disponibles tout au long du cycle de vie de la production à travers un ensemble d'outils variés (CAD : Conception Assistée par Ordinateur; VR-AR : Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée), les systèmes classiques d'information comme les ERP, les MES et les systèmes SCADA etc.). Ces derniers permettent d'enrichir et d'utiliser les données selon le besoin de chaque phase. Une norme commune pour les modèles d'information des CPS et les interfaces - selon le principe du digital TWIN (cité auparavant) - est plus importante que jamais pour tout échange de données entre les différents types de périphériques CPS et les outils de

⁴⁵ Tirée du projet MAYA : <http://www.maya-euproject.com>

simulation. Les CPS, leurs caractéristiques et leurs modèles de simulation pertinents, doivent être décrits de la conception à l'intégration et à l'utilisation dans l'environnement de production (Figure 50).

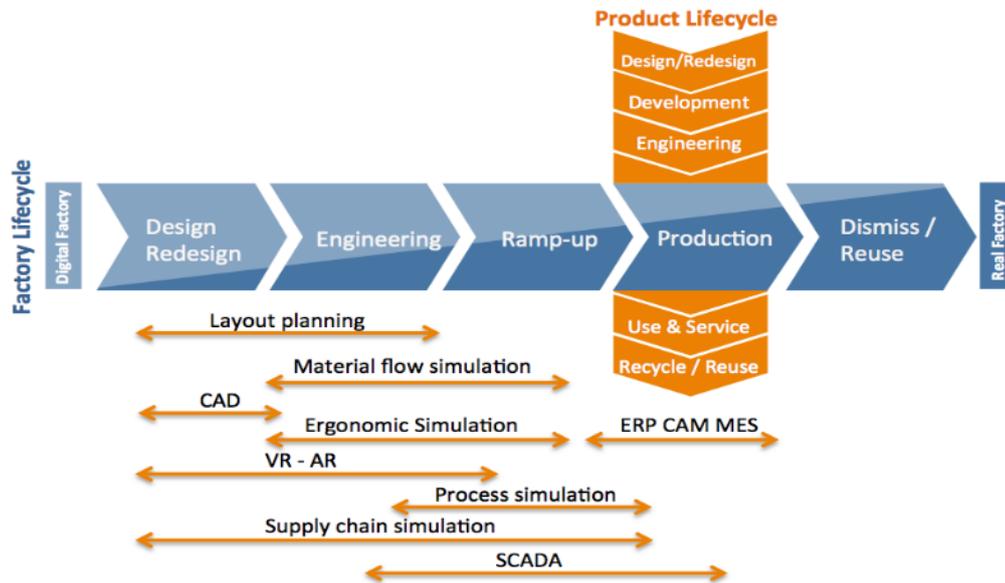


Figure 50 : cycle de vie produit et processus (tiré du PATHFINDER)

Le troisième défi concerne la synchronisation du monde physique avec son double numérique, qui génère un grand volume de données (données massives) à gérer par la représentation numérique de l'usine. Sur la base d'une telle représentation, le monde virtuel doit suivre le monde physique en temps réel, afin que le modèle numérique puisse surveiller, ajuster et optimiser des processus réels, anticiper les échecs et augmenter l'efficacité et ce, de manière interopérable et indépendante, des fournisseurs des CPS. Cela crée une connexion bidirectionnelle entre les éléments physiques au niveau de l'atelier et les moteurs de simulation multidisciplinaires.

Par ailleurs, au cours des deux dernières décennies, l'application de la modélisation et de la simulation aux systèmes complexes a démontré un certain nombre de capacités qui sont cruciales pour une utilisation à grande échelle dans le contexte industriel. L'effort principal dans la communauté de simulation s'est fait au sujet des questions de **réutilisation**. De nombreux articles portant sur cette dernière apparaissent dans les grandes conférences et revues (Sargent, 1986), (Wyatt, 1990). (S. Robinson et al, 2004) ont donné une définition du terme « réutilisation du modèle de simulation » : ils mettent en évidence la motivation à développer des modèles réutilisables ainsi que la validité, le coût et la crédibilité de la réutilisation. Une approche GTS⁴⁶ est un bon exemple pour illustrer cette capacité. L'objectif est la capitalisation des connaissances génériques sur les modèles de simulation de systèmes qui ont des propriétés communes, au lieu d'étudier chaque système et de développer des composants spécifiques.

Une autre capacité largement étudiée est la **modularité**. Dans le développement logiciel, la modularité fait référence à l'encapsulation de sous-systèmes clés, d'objets et de composants derrière des interfaces bien définies et relativement stables. Cela facilite l'intégration de ces composants avec des applications multiples, ainsi que l'évolution ou la ré-implémentation possible de ces composants avec un impact minimal sur les applications qui les utilisent. Dans

⁴⁶ GTS : Generic Template Simulation. Cette approche sera présentée dans III.2.1.1
Hind Bril EL HAOUZI

le domaine de la modélisation de systèmes, la modularité est utilisée pour améliorer la compréhension du système, réduire la complexité du modèle et faciliter la réutilisation de composants normalisés. Par exemple, la vue systémique subdivise le système de fabrication en trois sous-systèmes principaux : le sous-système physique modélisant les différentes ressources de l'usine, le sous-système informationnel (appelé sous-système logique dans certaines méthodologies de simulation) et le sous-système décisionnel. Plusieurs méthodologies ont été proposées pour permettre cette modularité (El Haouzi, 2008).

Notre hypothèse est que la masse de données disponibles, plus au moins automatiquement, permettront l'**adaptabilité** de ces modèles dans le temps. La propriété d'adaptation a déjà été traitée dans la littérature, en particulier par l'approche DDDS « Dynamic Data Driven Simulation » (simulation en ligne pilotée par les données) (Darema, 2004). Dans le contexte des IMS (Intelligent Manufacturing Systems), celle-ci a été étudiée principalement par rapport au comportement adaptatif de certaines entités dans le modèle. Plusieurs études ont montré que les modèles de simulation à base d'agents permettent aux systèmes complexes d'être adaptatifs et d'évoluer ou de s'adapter en fonction des modifications intervenues dans les réseaux relationnels des agents mais sans pouvoir agir sur la structure même de ceux-ci (Haouzi et al., 2013). Les travaux de (Valckenaers, 2001) ont retenu notre attention du fait que la construction même du modèle d'émulation (ou de simulation) s'appuie sur un mécanisme de miroir : chaque élément du système physique à son image dans le monde virtuel, le système d'information (concept semblable à celui de « digital Twin »). Dans ce cadre, l'adaptabilité peut être facilitée mais nécessite toujours une connaissance *a priori* des comportements des objets du système. Un autre aspect intéressant de ces travaux est la proposition d'utiliser des algorithmes de type bio-inspirés (stigmergie par exemple) qui permettent d'utiliser cette image comme un support virtuel de navigation et donc de prise de décision. D'autres auteurs (Véjar and Charpentier, 2011) ont proposé une méthode originale pour la génération automatique de modèles de simulation pour les systèmes à événements discrets. Ils ont utilisé les données de localisation des produits dans le système de fonctionnement. Le flux de données de caractéristiques liées aux produits constitue l'entrée d'un algorithme qui génère un modèle de simulation de réseaux de files d'attente pour une classe de système de type Job-shop. Le processus de modélisation comporte l'avantage de ne pas nécessiter une connaissance *a priori* du système à modéliser, la construction et la mise à jour du modèle sont alors facilitées. Néanmoins, l'utilisation de cette approche reste limitée à la classe d'utilisation Job-Shop et nécessite une interruption dans l'utilisation du modèle lors de sa réinitialisation. Par ailleurs, toutes ces approches ne prennent pas en compte le changement des situations d'usage et la boucle interaction Homme-Machine. Elles ne permettent donc pas une utilisation de la simulation à tout instant avec des scénarios changeants. En plus, malgré une littérature riche dans le domaine de la capacité d'adaptation, il n'y a pas de consensus sur la définition de cette capacité et les attentes de la modélisation et des modèles de simulation adaptative.

Une analyse de la littérature autour de l'usage de la simulation dans la planification et le contrôle ayant été réalisée dans (Jeon and Kim, 2016). Le but de ce chapitre n'est pas de revenir sur des concepts déjà largement étudiés dans la littérature, comme par exemple la définition de la simulation, sa finalité ou les types de modèles existants. Nous nous limiterons à présenter un état des lieux des méthodes d'ingénierie, des modèles de simulation ainsi que les différentes approches d'évaluation des systèmes de contrôles par la simulation. Ces méthodes seront illustrées, le plus possible, par des exemples de nos contributions.

III.2 INGENIERIE DES MODELES DE SIMULATION ADAPTABLES

La simulation peut être vue comme un processus rationnel allant de l'analyse du système d'intérêt à l'exécution d'un programme informatique permettant de conduire des expérimentations sur ce dernier. Ainsi, la simulation permet des apports à plusieurs niveaux. En phase d'analyse, elle permet de trouver des propriétés comportementales ou quantitatives sous forme d'indicateurs de performance. Ensuite, la phase de modélisation permet une représentation abstraite du système réel et donc conduit à améliorer sa connaissance. Enfin, la simulation permet d'étudier les variations des indicateurs de performance et le comportement dynamique du système observé. Pour mettre en œuvre ce processus, plusieurs méthodologies existent et partagent de nombreux points communs. Nous avons, dans le cadre de précédents travaux, présenté certaines de ces méthodologies et les avons adaptées pour les systèmes de type SCP.

Dans les systèmes de production, comme dans la plupart des domaines d'application, les modèles de simulation sont très souvent faits à la main par des experts. Une discussion sur la réduction du temps de développement ou l'adaptation des modèles de simulation a commencé avec (Sargent, 1986), (Wyatt, 1990), (T.R Willemain, 1995) et (S. Robinson et al 2004) et elle est toujours d'actualité. L'ingénierie des modèles de simulation a donné naissance à plusieurs approches permettant de réduire le temps de développement et de mise à jour (adaptation) des modèles de simulation afin de garantir leur qualité de prédiction et leur justesse par rapport au système réel/intérêt.

Nous pouvons identifier à partir de la littérature 5 grandes familles d'approches de développement des modèles de simulation, qui partagent le but de réduire le temps passé pour les travaux de conception et d'adaptation de ces modèles :

- Simulation Générique ou basée sur des Patrons (Generic or Template based Simulation) ;
- Simulation Dirigée par les Données (DDS) ;
- Dynamic Data Driven Simulation (DDDS) ;
- Simulation Pilotée par Modèle (MDS) ou (Simulation based–system design) ;
- Digital Twin (que nous avons présenté précédemment).

III.2.1 Simulation générique ou basée sur des Templates ou patrons (GTS)

L'approche GTS (Generic Template based Simulation) est utilisée pour développer un ensemble d'objets de modélisation génériques. Ces objets peuvent être simplement personnalisés pour s'adapter aux spécificités du problème étudié par des mécanismes d'activation/désactivation ou en changeant les valeurs des paramètres de l'objet générique (A. Guru et al., 2004). Un avantage important des approches GTS est la réutilisation des modèles comme discuté dans (M.J Steele, 2002) et (Y.J Son et al, 2000). Certains auteurs tels que (S. Kasputis et al, 2000) parlent également de la simulation composable, car le processus de modélisation peut être réduit à une composition de blocs de simulation. Aujourd'hui, la plupart des langages de simulation à usage général (comme Arena, Witness, Flexsim et autres) adoptent cette approche et beaucoup d'entre eux offrent la possibilité de modéliser un système industriel à l'aide d'objets génériques facilement appréhendables (files d'attente, zones de stockage, unités de traitements, ...). Dans l'encadré suivant, une application de cette approche a été développée dans l'entreprise TRANE.

Contexte : la particularité de l'entreprise TRANE est, qu'en dépit de la grande variabilité de son offre de produits, toutes ses usines sont organisées selon la DFT ce qui implique un grand niveau de standardisation des processus de production. Ainsi, par soucis de généralisation et de réutilisabilité, j'ai, dans le cadre de mes travaux antérieurs, créé une plateforme générique du domaine des systèmes organisés en DFT. Les principaux objets de ce processus et leurs interrelations sont présentés dans la Figure 51.

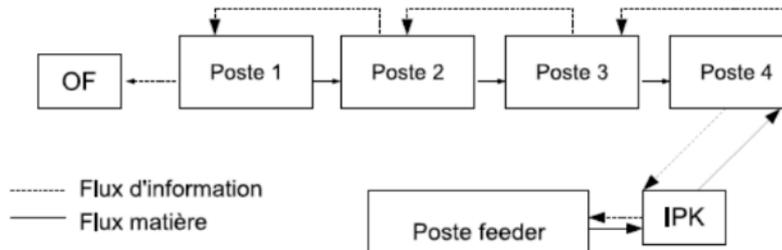


Figure 51 : les principaux objets de modélisation et leurs inter-relations

Contribution : nous avons développé une bibliothèque de composants génériques pour les systèmes de production organisés selon la DFT, utilisée à des fins variées (valider les investissements ou concevoir un système de contrôle des flux de produits) (H. El Haouzi et al, 2009). La bibliothèque a été développée grâce à l'outil « Arena Pro » et contient une dizaine de composants génériques dont les principaux sont : un composant générique pour modéliser le comportement de l'opérateur ; un composant «In Process Kanban» pour la synchronisation des lignes et les feeders ou l'équilibrage de ligne ; un composant «gestion des ordres de fabrication» qui crée les entités dans le modèle en fonction du plan directeur de production, un composant gestion des opérateurs et un composant «poste de travail ».

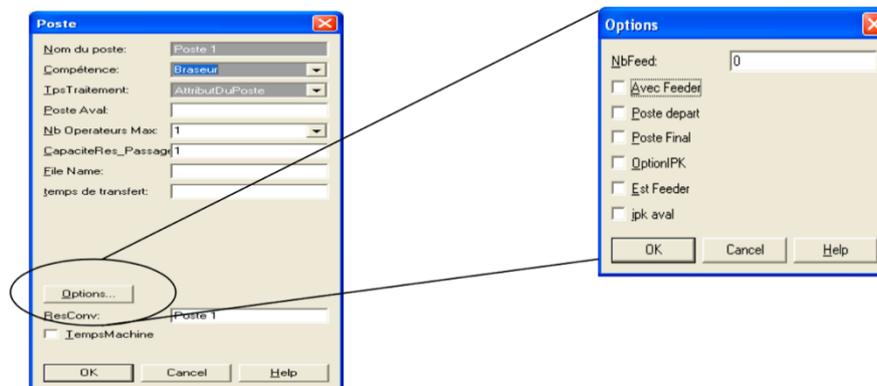


Figure 52 : interface du composant « poste de travail »

Par exemple, le composant générique « poste de travail » est caractérisé par un nom (poste 3), une compétence (testeur), un temps de traitement (T3 : variable selon le type de produit, un nb d'opérateur maxi (1), un fichier pour les statistiques (fich3.text)).

III.2.2 Simulation dirigée par les données (SDD)

Dans une approche de simulation dirigée par les données (SDD), le modèle est généré automatiquement à partir des données issues de la base des données existantes dans l'entreprise. Le modèle est mis à jour lorsque les données sont modifiées ou à la demande de l'utilisateur. Cette approche diffère des approches de simulation traditionnelles, car l'expert humain analyse le problème et définit chaque étape du modèle de simulation en utilisant généralement un outil GTS (Bing Cao, 2004). Dans le contexte du système de fabrication, de nombreux documents et études de recherche favorisent l'utilisation des données importées des systèmes ERP, MES, CAPP⁴⁷ ou directement des capteurs pour concevoir et/ou maintenir ces modèles de simulation. La simulation hors ligne constitue l'élément essentiel de ces contributions. Dans la suite, nous présentons deux exemples.

Contexte : dans le but d'améliorer la productivité, équilibrer les charges et rationaliser les en-cours en tôlerie, les moyens de production des deux sites français de l'entreprise TRANE ont été regroupés pour former le feeder Tôlerie nommé Front End (cf. Figure 53).

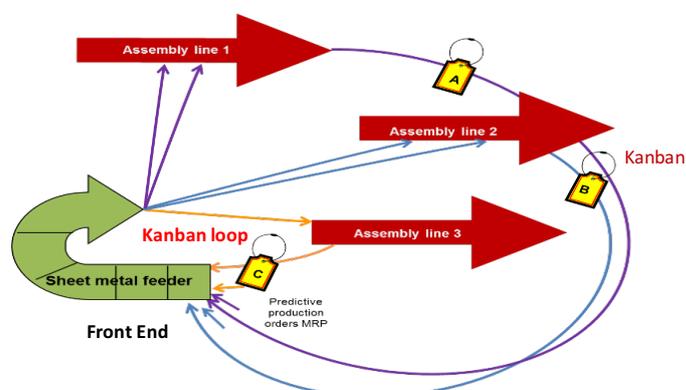


Figure 53 : schéma représentant le pilotage de la cellule Front-end

Afin de cadencer la ligne de production un regroupement de pièces provenant à la fois des d'ordres de fabrication (par calcul MRP) et des cartes Kanban est mis en œuvre afin de former des lots de fabrication/ « Jobs » : la variété des pièces d'un Job à optimiser entraîne un rendement matière plus ou moins élevé. Afin de limiter les pertes en matières premières, il est possible d'agir sur des paramètres/facteurs tels que le temps d'attente avant la création d'un Job. En effet, plus on attend l'arrivée de nouvelles relances kanban, plus on obtiendra une grande diversité de pièces ce qui permettra d'obtenir un rendement matière satisfaisant. C'est pourquoi la détermination du Job a un impact à la fois sur les délais de réapprovisionnement des pièces produites ainsi que sur les pertes en matières premières. Par ailleurs, au vu de la variabilité des demandes clients ainsi que les aléas de production, le nombre des cartes Kanban nécessite d'être calculé dynamiquement.

Contribution : dans ce cadre, nous avons proposé une approche proactive pour le pilotage d'une cellule de fabrication en utilisant une plate-forme de simulation constituée d'un modèle d'émulation (basé sur la bibliothèque d'objets génériques développés sous Arena), un ETL (Talend) pour l'extraction des données structurelles (postes de travail, gammes...), dynamiques (le plan de production et les données de traçabilité des cartes Kanban) et des règles de pilotage permettant de générer des « extra-cartes » pour pallier à la variabilité des demandes clients et

⁴⁷ CAPP : Computer-Aided Process Planning
Hind Bril EL HAOUZI

des retards de production (Talbi et al, 2013) (cf. Figure 52). La plate-forme est développée en C#.

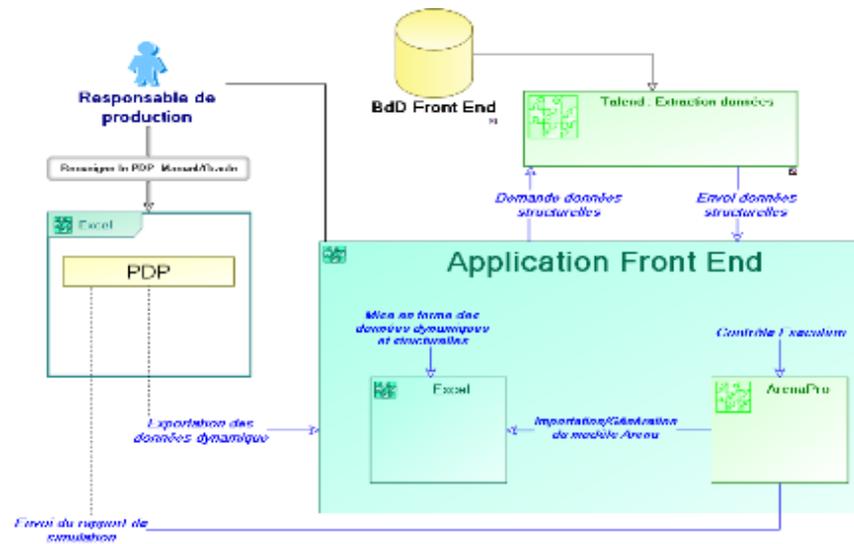


Figure 54 : plate-forme de simulation pour le pilotage de la cellule Front-end

La même plate-forme a été utilisée pour déterminer la taille des lots en l’associant à un modèle d’optimisation de découpe. Pour simuler le comportement de ce modèle d’optimisation, nous avons développé un algorithme d’optimisation de type Two-dimensional Rectangular Multiple Stock Size Cutting Stock Problem en prenant en compte la contrainte technique « guillotine ». Le modèle d’aide à la décision est décrit dans la Figure 53.

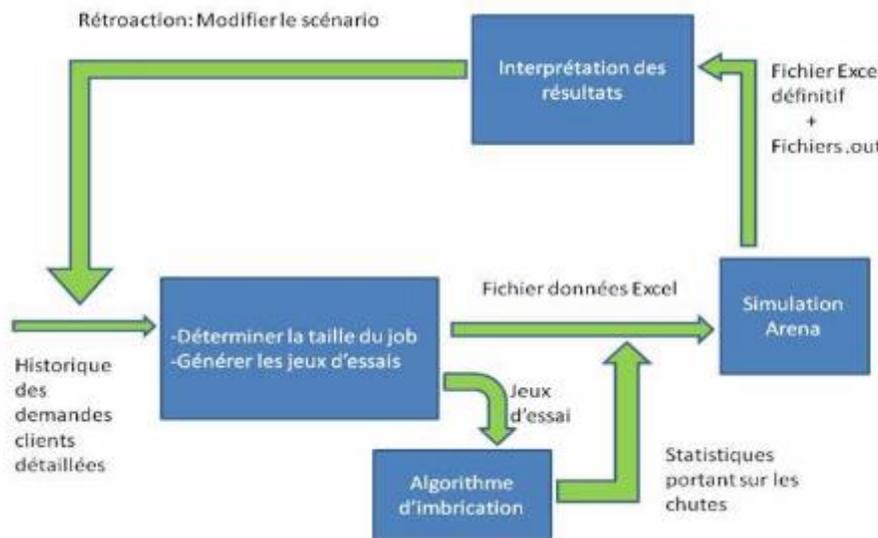


Figure 55 : système d’aide à la décision pour l’optimisation de la taille des jobs

Contexte 2: la thèse de Ludwig Dumetz a pour but d’aider les entreprises de l’industrie forestière, en particulier les scieries, à choisir des stratégies de pilotage adaptées à leurs marchés. Ces stratégies s’appuient sur différents paramètres tels que les politiques d’acceptation des commandes ou les politiques de planification qui peuvent être évaluées pour différentes conditions de marché (produits de commodité (standards), ou inversement un marché composé de produits spéciaux (à la commande)).

Contribution : Les travaux ont conduit à développer une plateforme de simulation au niveau du pilotage tactique et opérationnel, configurable et utilisable par les industriels de la filière. Ce projet implique d'évaluer et de comparer ces différentes stratégies de pilotage, prenant en compte des algorithmes de planification, des prises de décisions et des processus d'affaires. La plate-forme de simulation a été développée en utilisant le logiciel Simio (cf. Figure 56). Ce modèle est connecté à un ERP pour prendre en compte certaines informations concernant la gestion des stocks, la production de bois, le volume de matière en approvisionnement, le carnet de commandes, etc., en intégrant des modèles d'optimisation.

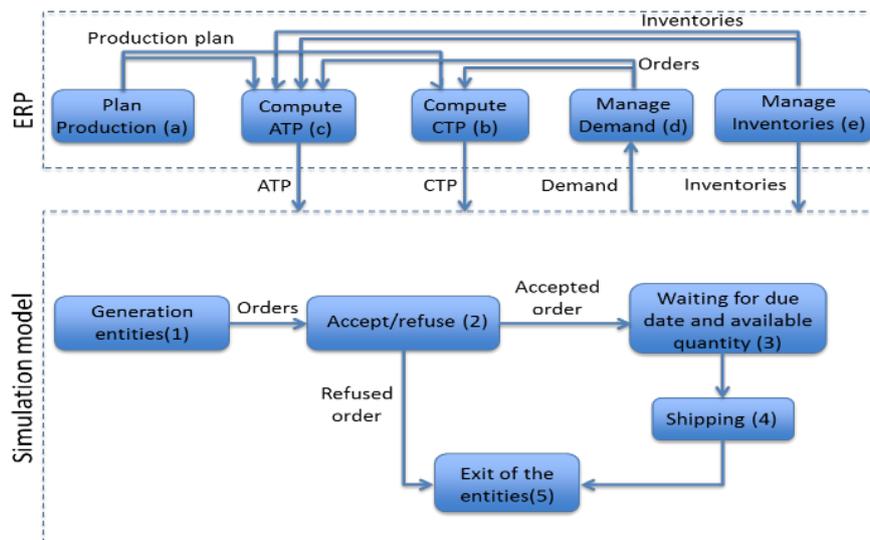


Figure 56 : une représentation conceptuelle du cadre de simulation tirée de (Dumetz et al., 2017)

Le modèle de simulation "appelle" l'ERP chaque fois qu'une planification est nécessaire, qu'une nouvelle commande est acceptée, ou lorsque l'ATP, le CTP⁴⁸ ou l'état des stocks le rend nécessaire.

Les paramètres du modèle spécifient l'horizon de simulation, l'horizon de planification et la fréquence de re-planification. L'utilisateur doit également préciser quelle devrait être la politique utilisée pour accepter / refuser une commande. La commande peut être acceptée sur la base des stocks actuels, de l'ATP, du CTP, ou de façon mixte (MIX : ATP et CTP)(Dumetz et al., 2016). La même plate-forme a été utilisée pour évaluer et simuler des systèmes de pilotages décentralisés. Le but étant d'évaluer les mécanismes de coordination (flux tiré, flux poussé ou piloté par le goulot-MpC⁴⁹) des différents plannings des ateliers sciage, séchage et rabotage.

III.2.3 Simulation dirigée dynamiquement par des données (DDDS)

Dans le contexte de la simulation en ligne, un nouveau paradigme est apparu : Dynamic Data Driven Simulation (DDDS). Le principe est que le système de simulation est continuellement influencé par des données en temps réel pour assurer sa justesse vis-à-vis du système simulé. Cela permet une meilleure qualité de prédiction et d'analyse. Les applications qu'il est possible de trouver dans la littérature traitent des modèles plus anciens utilisés pour faire des prédictions sur les systèmes physiques (par ex. : prévisions météorologiques, explorations

⁴⁸ ATP : Available To Promise/CTP : Capable To Promise

⁴⁹ MpC : Management par les Contraintes : technique de gestion utilisant la théorie des contraintes

pétrolières, etc.). Cependant, la maturité du concept est due à (Darema, 2004) qui a introduit les systèmes DDS « dynamiques ». Cette approche fait écho aux différents défis présentés précédemment (exemple : simulation & Big Data, synchronisation des modèles virtuels et physiques, etc.). Dans l'action IV.1.5.5 de notre projet, nous envisageons de travailler sur une extension des travaux de (Véjar and Charpentier, 2012) qui exploitent cette approche pour la génération de modèles de simulation basée sur les données des trajectoires du produit dans l'usine.

Contexte : en vue d'utiliser cette approche dans le contexte des données-massives issues des CPS, nous nous sommes intéressées à la propriété d'adaptabilité des modèles de simulation. Dans la littérature, on peut trouver plusieurs travaux pour mesurer la maturité et la crédibilité des processus de développement produits, logiciels ou matériels. Le cadre le plus connu est le Modèle de Maturité de Capacité (CMM). Le CMM peut être défini selon le (rapport CMMI, 2002) comme un modèle contenant les éléments essentiels pour le développement des processus efficaces pour une ou plusieurs disciplines. Il décrit également un chemin d'amélioration évolutive, allant des processus ad-hoc et immatures aux processus optimisés. Au cours de la dernière décennie, certaines utilisations du champ CMM dans la modélisation ont été présentées mais l'accent a été mis principalement sur les processus de validation et de vérification ou sur la capacité de prédiction.

Contribution : nous avons proposé un CMM pour évaluer la maturité d'un modèle de simulation du point de vue de la capacité d'adaptation. Nous avons nommé ce modèle : ACMM, il utilise quatre éléments contribuant à la conception et l'utilisation des modèles de simulation : gestion et traitement de données, développement de modèles, validation de modèle et exécution de simulation.

Pour chacun de ces éléments, des attributs sont identifiés et caractérisent cinq niveaux croissants de maturité sous différents angles : conceptuel, organisationnel et technique.

- **le niveau conceptuel** concerne la modélisation au niveau d'abstraction le plus élevé (méta-modèles, ontologies, modèles de référence ...) ;
- **le niveau organisationnel** définit les fonctionnalités du système sans tenir compte des plates-formes de simulation-modélisation spécifiques où le modèle pourrait être mis en œuvre plus tard ;
- **le niveau technique** traite des outils et dispositifs utilisés pour élaborer un modèle de simulation et d'exécution du code de simulation.

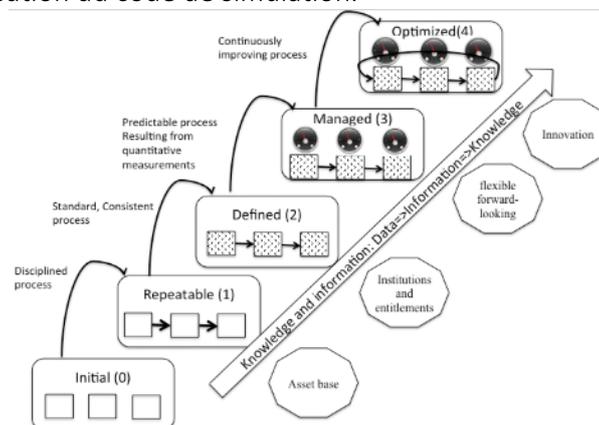


Figure 57 : les cinq niveaux de maturité de l'adaptation des modèles de simulation

La Figure 57 montre les cinq niveaux de maturité d'adaptation des modèles de simulation allant du niveau 0 (initial), où il n'existe pas d'environnement stable pour développer et maintenir le modèle de simulation (la performance dépend des capacités des développeurs (experts) et varie en fonction de leurs connaissances, compétences et culture scientifique), jusqu'au niveau 4 (optimisé) où le processus d'adaptation des modèles est maîtrisé et continuellement amélioré.

La matrice ACMM a été utilisée dans (Haouzi et al., 2013) pour dégager les défis que nous pouvons relever dans le cadre de développement des modèles de simulation adaptables selon (cf. Figure 58) :

- les quatre éléments contribuant à la conception des modèles de simulation (A) : gestion et traitement de données, développement de modèles, validation du modèle et exécution de la simulation ;
- les trois niveaux d'abstraction (B) : conceptuel, organisationnel et technique ;
- les cinq niveaux de maturité (C) : initial, répétable, défini, managé, optimisé.

La Figure 58 donne un aperçu de la matrice au niveau de l'élément « gestion et traitement des données».

Adaptive CMM for Modeling & Simulation		Maturity levels				
		Level 0 Initial	Level 1 Repeatable / assest base	Level 2 Defined / ententilement auidelines	Level 3 Managed (flexibility)	Level 4 Optimized (Innovation)
A Data Management and Processing: How data is collected, processed and updated, how carefully accuracy is assessed	B Conceptual	Data is not formalized, heterogenous representation, occasional modifications	Data is modelled in rigid way and/or without explicit connections	Data structure and their interactions are defined	Ontologies or metamodel are set allowing the formalization of data and the knowledge	The knowledge is enriched dynamically into the ontologies or meta-Models
	Organisational	Ad-hoc collecting and storage systems performed specially by human expert	The collection and storage data systems procedures and policies are known	The standards and documentation for data management (Collecting,maintenance..) are defined	Data are processed regarding quantitative goals, completeness, accuracy, and objectivity	Data life cycle is managed by defining some operations like aggregation, integration, dissemination, destruction, and inference.
	Technical	The accessibility to simulation model data is low. There is no interface or system for data adaptation	Data can be modified using a closed data storage devices	Interfaces or tools to ease access and the update of data are provided.	An efficient Information system is built (for remote and quick access to data)	Automatic data update: batch processing , data synchronization, geolocation data or knowledge inferences can be used to create and update the simulation model data

Figure 58 : extrait de la matrice de maturité pour les modèles de simulation adaptables

Pour l'exemple, nous avons identifié les challenges suivant :

- Comment passer d'une donnée à une connaissance ?
- Quels indicateurs génériques utiliser ?
- Quel sont les besoins de co-simulation temps réel /discrets ?
- Comment caractériser l'Interaction Homme/ modèle de simulation
- Comment garantir la disponibilité du système de simulation (tolérance aux pannes).

III.2.4 La simulation dirigée par les modèles (MDS)

La simulation dirigée par modèles (Model Driven Simulation (MDS) ou Simulation Based System Engineering Model) est inspirée du domaine du développement de logiciels, en particulier du domaine de la transformation de modèles d'application à grande échelle et du développement d'architectures logicielles (Manset D., et al., 2006), (SJ Mellor et al, 2004). Les trois principaux intérêts de la MDS sont : la portabilité, l'interopérabilité et la réutilisabilité grâce à la séparation des aspects logiciels et des aspects abstraits ou métiers. Par ailleurs, (Deniz Cetinkay et al, 2010) ont présenté l'intérêt d'utiliser une approche MDS.

Contexte : Compte-tenu du contexte de l'entreprise TRANE et du degré de standardisation de celle-ci, pour construire nos modèles de simulation et d'émulation, il était nécessaire d'utiliser une méthode structurée pour garantir la généricité, d'une part et la réutilisabilité, d'autre part.

Contribution : nous avons donc utilisé une approche dérivée de l'ingénierie dirigée par les modèles en utilisant 4 niveaux ontologiques (cf. Figure 59) : dans un premier temps, au niveau le plus bas, nous avons analysé des cas particuliers de lignes d'assemblage. Ce qui nous a permis de construire les premiers modèles de simulation (avec le logiciel Arena©) que nous avons ensuite généralisé en modèles de référence en N2 (avec le logiciel Arena©) et en modèle de connaissance en N3 (en utilisant UML et en particulier les diagrammes de classes et de séquencement). Ceci nous a permis un déploiement rapide sur les autres cas de systèmes réels par particularisation du modèle de référence et respectivement par la généralisation et l'enrichissement du modèle de référence et du modèle de connaissance (méta-modèle) permettant ainsi leur mise-à-jour.

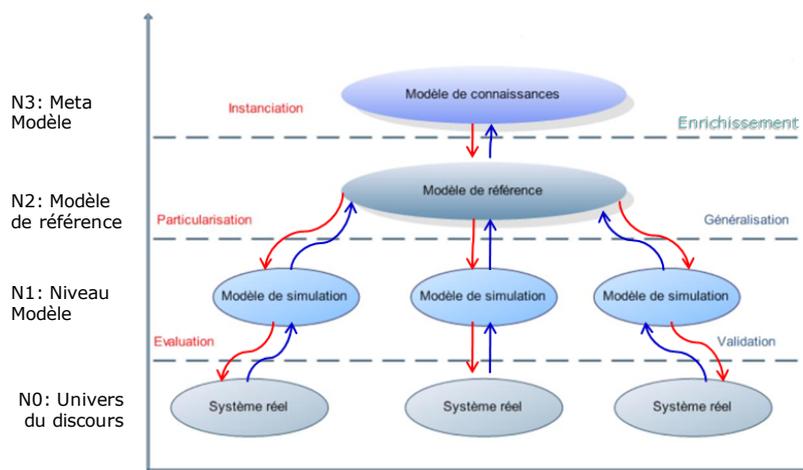


Figure 59 : construction dirigée par le modèle

III.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, le contexte scientifique et technologique des nouvelles approches de la simulation pour la conception et le support des systèmes de production du futur a été présenté. Le but étant de dresser la liste des nombreux défis qui peuvent être exploités dans mon projet scientifique. Ainsi, mes travaux de recherche passés et futurs s'inscrivent et s'inscriront pleinement dans ce contexte. Dès mes premiers travaux de recherche, je me suis intéressée à la conception et la mise en œuvre de modes de pilotage « intelligent » et à la simulation comme outil de conception et de validation de ces systèmes. Nous avons utilisé deux modes d'interactions entre le modèle de simulation et le système physique qui correspondent dans la terminologie mécatronique respectivement au Software-In-the-Loop et au Hardware-In-the-Loop.

Dans une approche de simulation de type **Software-In-the-Loop**, le prototype ou modèle du système de contrôle représenté par une implémentation simplifiée des règles de décision sous forme d'algorithmes ou d'heuristiques, régit le modèle d'émulation. Le but est de concevoir le système de pilotage en testant les algorithmes de prise de décision qui seront implémentés.

Cette situation expérimentale est proche de la pratique traditionnelle de simulation, mais insiste nettement sur la séparation entre modèle de contrôle et modèle du système opérant (modèle d'émulation) (cf. Figure 60).

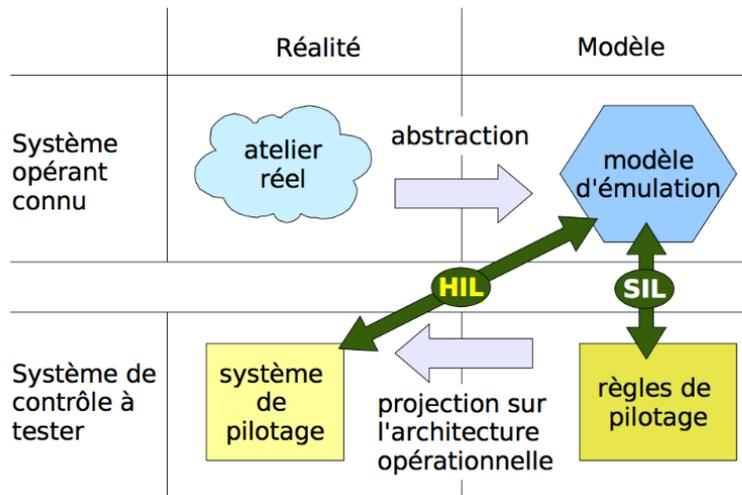


Figure 60 : les approches de validation SIL et HIL (R. Pannequin, 2007)

Dans une approche de simulation de type **Hardware-In-the-Loop**, la simulation consiste à valider le comportement du vrai système de contrôle ainsi que de ses interactions avec un système physique émulé et les systèmes d'information de l'entreprise. Le principal avantage réside dans le fait que la validation peut être transposée dans une plateforme virtuelle (le système d'émulation) sans avoir à utiliser le système physique réel, ce qui réduit le temps de développement et de mise en œuvre (cf. Figure 60).

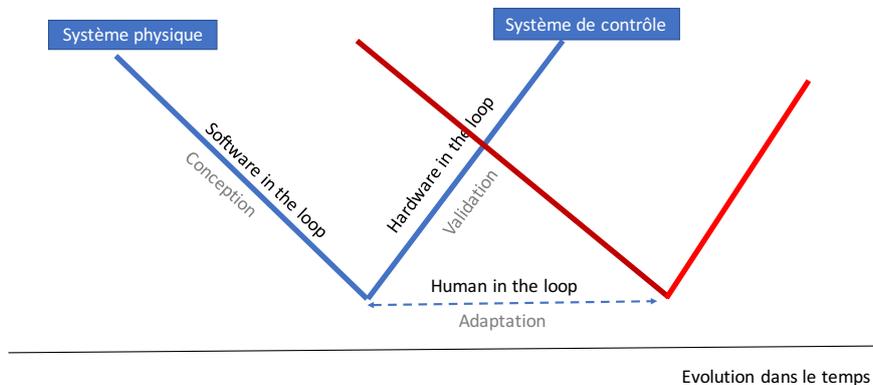


Figure 61 : situation d'usage de la simulation dans la vie du système de pilotage

Mes objectifs futurs restent en continuité avec ce double usage de la simulation mais ont pour ambition de placer la simulation au cœur des nouveaux systèmes de pilotage. Dans ce nouvel usage, l'interactivité Homme-Machine jouera un rôle primordial dans la prise de décision mais aussi dans la mise-à-jour des systèmes de simulation (cf. Figure 61).

Chapitre IV Projet de recherche et d'enseignement

Penser l'intégration d'un système complexe hétérogène, résultant de l'interaction de plusieurs systèmes homogènes, nécessite par conséquent de raisonner transversalement en construisant des modèles d'un type nouveau, qui capturent l'émergence en intégrant de manière cohérente les parties de chaque modèle homogène constitutif d'un modèle systémique d'ensemble. Or force est de constater que rien ne nous prépare à ce nouveau paradigme qu'est le raisonnement systémique, qui oblige à mettre en relation des savoirs de nature extrêmement différentes et à transcender les silos traditionnels d'organisation de la connaissance.

(Daniel Krob, 2012)

IV.1 PROJET DE RECHERCHE

IV.1.1 Hypothèses et motivations

Notre hypothèse est que la complexité des interactions entre les objets physiques et/ou virtuels, rendues possibles par les avancées technologiques de l'industrie 4.0, conduira à des situations de décision nécessitant d'utiliser des modèles de simulation/émulation en symbiose avec les systèmes de pilotage de la production et de la logistique. L'intégration de l'Homme, de la conception à l'usage, est motivée par les incertitudes inhérentes aux données et à leurs interprétations, aux situations d'usage, aux conséquences des décisions prises et par la vision d'un monde qui se doit de rester un système social.

Ainsi notre projet a pour but de proposer un cadre de modélisation anthropocentré pour la simulation et le pilotage basé sur les objets connectés. Le projet propose de s'attaquer en particulier aux défis suivants :

Défi 1 : l'étude des architectures de pilotage et d'organisation des systèmes industriels du futur. Comment assurer l'agilité et la durabilité de ces systèmes afin de trouver un nouveau point d'équilibre face aux différentes sources de variabilité ? Dans une vision où tout élément physique du système manufacturier a son équivalent virtuel (CPS), la recherche de l'agilité passera par des changements dans les composants physiques (des nouveaux modèles d'organisation des ateliers, des usines voire des chaînes logistiques) ou des composants virtuels (architectures de pilotage s'appuyant sur toutes les intelligences incluant l'Homme).

Défi 2 : l'exploitation des données terrain : Comment passer de la masse de données brutes provenant des objets connectés (CPS) à de la connaissance pertinente, formalisée par des modèles (ou patterns) et permettant d'une manière inductive de développer et de mettre à jour les modèles de simulation et de pilotage.

Défi 3 : l'étude de l'adaptabilité des modèles de simulation et de leur prédictibilité. Comme nous l'avons présenté dans nos travaux précédents (Haouzi et al., 2013), il n'y a pas de consensus sur la définition de l'adaptabilité, ni d'analyse des degrés de maturité des modèles de simulation adaptables à chaque étape de leur cycle de vie. Un premier point qui peut être traité, est la proposition d'une définition formelle de la propriété d'adaptabilité. D'autres questions, d'ordre conceptuel ou technologique peuvent être posées : Comment assurer l'adaptation du modèle de simulation, en ligne de façon synchronique, pour prendre en compte les changements de paramètres du système et de son environnement et/ou changements structurels de façon diachronique ? Cela posera des questions sur la « continuité numérique » et sur la synchronisation du système réel, du modèle de pilotage et du modèle de simulation/émulation.

Défi 4 : l'étude de l'interaction Homme-Machine et des différents modes de coopération : le facteur humain doit être pris en compte tout au long du cycle de vie du système concerné. Pour illustration, l'étape « validation du modèle » dépend des cas d'utilisation. Elle est difficilement automatisable et a toujours été réalisée par les utilisateurs finaux des modèles. Les questions qui peuvent se poser sont alors : Comment répercuter les changements des exigences (indicateurs de performance) dans le modèle sans remettre en cause tout le système d'évaluation-simulation ? Quelles décisions laisser à l'opérateur humain et quels indicateurs mettre pour faciliter la décision ? Comment apprendre (capitaliser) de cette coopération Homme-application ? ...

Défi 5 : la validation de nos approches et modèles par des expérimentations réelles : plus que jamais le développement d'applications représentatives des contextes industriels sont nécessaires pour la démonstration, la preuve de concept, la validation des modèles et

méthodes proposées, mais surtout pour favoriser l'acceptation des avancées scientifiques par le monde économique.

Pour répondre à ces différents défis nous avons besoin de développer une stratégie de recherche sur plusieurs horizons et échelles d'application (cette partie sera abordée dans le paragraphe IV.1.4).

IV.1.2 Les résultats attendus

Les défis qui seront soulevés tant au niveau conceptuel (les modèles de maturité et le cadre de modélisation générique), qu'au niveau technique (l'exploitation de la masse de données issue des CPPS pour la génération et la mise à jour des modèles de simulation, les langages et les paradigmes de programmation), sont autant de points, si nous réussissons à bien les mener, qui permettront de proposer des recommandations et des bonnes pratiques de modélisation couvrant un large horizon de domaines d'application et de situations d'usage. Enfin, considérer l'Homme au centre de la boucle de décision pour que la technologie s'adapte à l'Homme et pas l'inverse, place aussi ce projet dans une tentative de prendre en compte un de nos défis sociétaux, qui est la place de l'Homme dans l'usine du futur.

De manière plus pragmatique, des exemples de résultats scientifiques que nos travaux devraient permettre de proposer, peuvent être dégagés :

- des modèles originaux de contrôle et de pilotage de chaînes logistiques durables conduisant à optimiser des délais, des coûts, des stocks, l'efficacité énergétique et la coopération Homme-machine, etc. ;
- des mécanismes de mise à jour et d'adaptation des modèles d'émulation et de contrôle face aux aléas du système physique, ceci afin d'assurer l'agilité recherchée par les nouveaux paradigmes de production ;
- des modèles de données multidimensionnels intégrant les composantes géométriques et le temps, ou la géométrie et la thermique pour s'approcher de plus en plus d'une vision holistique de la gestion de la performance ;
- des méthodes de couplage de données géométriques (nuages de points) et discrètes (relevés RFID) afin d'estimer l'état d'un système industriel cyber-physique (de production ou de construction) ;
- des méthodes de comparaison de l'état du CPPS réel/état du CPPS numérique pour déterminer des méthodes de synchronisation ;
- des nouveaux usages de la simulation pour le pilotage à travers le concept « Human-In-The Loop » ;
- des modèles prenant en compte le facteur humain et mettant l'Homme au centre de la boucle de décision ;
- ...

IV.1.3 Cadre institutionnel

IV.1.3.1 Au niveau local

Le projet de recherche que nous proposons s'intègre dans les objectifs et les axes de recherche du département Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques (ISET) du CRAN et plus particulièrement dans le futur projet de recherche « Système et Objets Intelligents en Interactions (S&O-2I) » d'ISET, qui sera déployé lors du prochain contrat quinquennal (2018-2023).

Le projet S&O-21, s'intéresse à diverses manières de piloter les flux de produits dans les systèmes logistiques complexes (chaînes logistiques et intra-atelier) ainsi qu'aux moyens d'y apporter des services (concept d'environnement ambiant) et ce, en partant de l'hypothèse que les produits et/ou les ressources sont intelligents et en interactions. L'ambition de notre projet est d'apporter une nouvelle hypothèse à travers le paradigme « l'Homme augmenté ». Cela nous permettra, comme prôné par l'initiative Industrie 4.0, d'explorer une vision intégrative de l'organisation, de la technologie et de leurs interactions avec l'Homme.

Ayant pris, depuis un an, la responsabilité du plateau technique TRACILOGIS, j'entrevois des perspectives de travail collaboratif avec l'ensemble du département ISET mais aussi des collaborations possibles avec des collègues des autres départements CID et SBS. En effet, le plateau technique TRACILOGIS, qui a été principalement développé dans le cadre de l'ERT (*Traçabilité et impact des nouvelles technologies d'IDentification et de contrôle des produits sur les modes de gestion des chaînes LOGistiques des filières fibres naturelles*) créée en 2003 et du CPER SGE (Sciences et Génie de l'Environnement) dont l'objectif premier était de structurer le Campus Bois d'Epinal en appui avec le *Pôle de Compétitivité Fibres Grand'Est* (période 2007-2013, aujourd'hui pôle fibres-énergivie), offre un environnement de test permettant la mise en œuvre de scénarii de classification, d'identification et de gestion intelligente des flux de production et de logistique de pièces dans un contexte centralisé, distribué ou hybride (centralisé et distribué).

Par ailleurs, le plateau technique permet d'implanter, tester et comparer différentes techniques de traçabilité et de contrôle au sein de la chaîne logistique, en particulier pour la filière forêt-bois. A ce titre, il dispose d'un ensemble de systèmes d'imagerie permettant la caractérisation et le contrôle non-destructif de matériaux (PIM), d'une plate-forme ingénierie numérique pour la construction (INC) dont le but est d'outiller les PME du domaine avec des outils de gestion de données, de visualisation et de pilotage et d'une plate-forme flexible de production automatisée sous forme d'une cellule d'assemblage/ désassemblage (CAD) avec 4 zones permettant de simuler le fonctionnement de diverses classes de problèmes (Voir Figure 62).

- Plateau technique du campus Bois

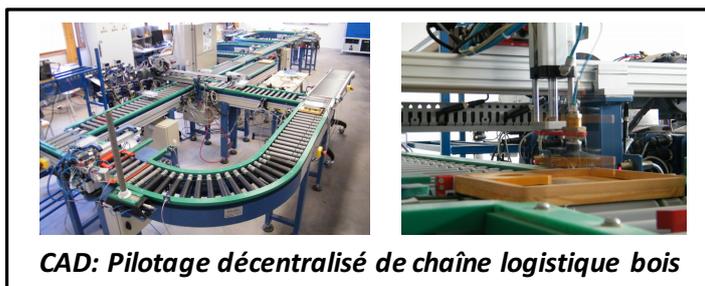
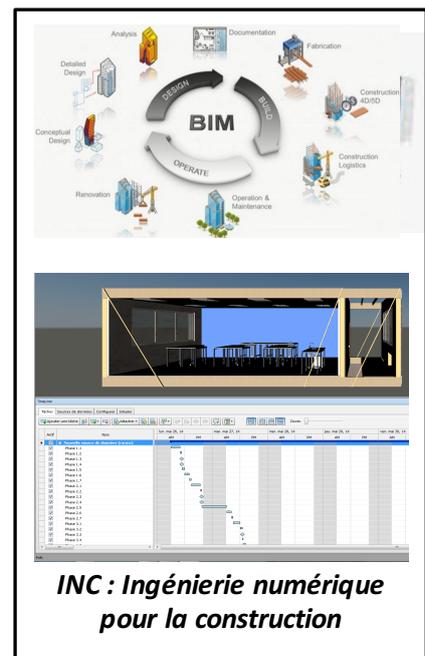


Figure 62 : les 3 plateformes du plateau technique Tracilogis

La plateforme d'imagerie multimodale (PIM) rassemble dans un même lieu sur le plateau **TRACILOGIS** un ensemble unique d'instruments d'imagerie à vocation industrielle (Imageur hyperspectral NIR ; caméra Linéaire (Spyder 3 Color SC-30 02K-80) ; caméra Intelligente 3D (Sick Color Ranger-E50444), scanner à ultrasons (Airstar MDF Ultrasonic Detection System, MODEL WD 12-8); scanner à micro-ondes (Satimo Dento LRX); spectromètre NIR-FT (Brüker Matrix-F), etc.). En plus d'être à la disposition de la communauté régionale, elle a pour ambition de permettre à la communauté « Signal Image Vision » du GDR ISIS d'accéder à cet ensemble d'instruments en prenant en charge la production de données expérimentales acquises dans des conditions maîtrisées selon un protocole conçu et défini par les utilisateurs potentiels. Ces données doivent permettre de tester et de valider des modèles et des algorithmes de traitement d'images et de vision par ordinateur. Actuellement, cette plateforme sert de support à deux projets de recherche sur la spectroscopie et l'imagerie hyper-spectrale NIR pour l'analyse du matériau bois (FUI Trispirabois, ANR Optifin) menés conjointement par le CRAN et le CRITT BOIS. En termes de ressources humaines, elle est constituée principalement de 2 permanents CRAN : Pr David Brie (SBS) et Vincent Bombardier (ISET), 2 doctorants et un ingénieur CNRS recruté en septembre.

Au-delà des fonctionnalités de classification de produits bois déjà implantées, un projet qui peut être exploré avec ces deux collègues serait l'enrichissement des systèmes d'ingénierie numériques existants via l'intégration sur la cellule d'assemblage/désassemblage (CAD), des systèmes de vision et d'algorithmes de traitement permettant le contrôle en ligne de matériaux. Le but est de faire une analyse de sensibilité du système de vision par rapport à des paramètres de flux : le planning, la vitesse, le volume et les perturbations...

La « partie historique » du plateau technique est la cellule d'assemblage/désassemblage (CAD) déjà présentée **dans le chapitre II**. Elle a permis d'offrir un environnement de test permettant la mise en œuvre de scénarios de production pour plusieurs thèses (R. Pannequin, C. Herrera, J. Jover, M. Noyel). Actuellement deux thèses que je codirige avec le Pr A. Thomas et P. Thomas exploitent la plate-forme pour des expérimentations sur le contrôle de systèmes de production (celles d'E. Zimmermann et de T. Mezgebe). Un financement CPER a été octroyé en 2016 pour le développement de la partie émulation et traçabilité à l'échelle d'une chaîne logistique constituée de TRACILOGIS et de la plate-forme AIPL. L'équipe du CRAN collaborant dans ce projet est constituée de 8 chercheurs du département d'ISET.

La plateforme Ingénierie Numérique pour la Construction Bois (INC) est en cours de développement. Elle a pour but de développer des outils de pilotage et de contrôle des activités de production et de logistique. Ceci en s'appuyant et en proposant des systèmes de type BIM (Building Information Modeling) à l'usage des PME, utiles pour la rénovation, l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) et la construction neuve de maisons et de bâtiments. Deux pistes de développement sont envisagées actuellement :

- Mesure & optimisation de la consommation énergétique : cet axe consiste, dans un premier temps, à équiper le campus bois sur lequel l'ENSTIB est installée, de l'instrumentation nécessaire à la mesure de sa consommation énergétique et, dans un deuxième temps, d'implanter les moyens technologiques nécessaires pour agir sur cette consommation (actionneurs, interfaces H/M, ...) via la maquette numérique du système.
- Développement d'une plateforme web BIM (3, 4 et 5D) pour la rénovation et l'ITE de bâtiments : cet axe vise à prototyper (et même commercialiser) des solutions logicielles pour la rénovation et l'ITE de bâtiments à partir de l'acquisition de nuages de points par laser scanner terrestre.

Par ailleurs, l'implantation de ce plateau technique sur le Campus Bois ouvre aussi des perspectives de collaboration avec des laboratoires comme le LERMAB. Ainsi, grâce à la prise de responsabilité de l'action 3 du CPER Forbois2 je collabore avec un collègue du LERMAB (Pr Y.Rogaume), une équipe de 2 chercheurs (W. Dirigent, Pr A. Thomas) et un ingénieur du CRAN. Cette action vise à répondre à des problématiques d'optimisation énergétiques du bâtiment à différents niveaux, stratégique, tactique et opérationnel. Les problèmes de régulation ne seront pas traités dans ce cadre. En effet, un projet européen (Energy in Time ; FP7 NMP;2013-2017), et le laboratoire (département CID), déjà impliqué dans d'autres projets comme ENRBATIM, répondent en partie à ces problèmes. L'optimisation énergétique doit avoir une approche holistique en évaluant les indicateurs proposés à différentes étapes du cycle de vie du bâtiment.

En conclusion, ce contexte technologique et de recherche, riche en opportunités d'interactions avec des équipes aux multiples compétences, fait que nos ambitions sont multiples, tant sur l'aspect théorique qu'applicatif. Le choix et les priorisations de nos actions de recherche et de transfert seront guidés par l'intérêt général, la stratégie de recherche du laboratoire et les transferts pédagogiques nécessaires. Ils seront aussi motivés par la volonté de proposer au milieu socio-économique des méthodes et des outils d'aide à la décision pragmatiques afin de les accompagner dans le virage de la transition numérique et de l'industrie 4.0.

Nous avons décidé de favoriser en premier lieu le tissu industriel local et régional et en particulier la filière forêt-bois, que la région Grand-Est a décidé de soutenir en priorité et qui occupe une place cruciale en France. Le plateau technique et les différentes collaborations seront un atout majeur pour le transfert et la formation de nos étudiants qui alimenteront ce tissu industriel.

IV.1.3.2 Au niveau régional

Les orientations de recherche sont plus que jamais liées aux possibilités de financement. Au niveau régional, il est donc important de veiller à associer les sujets "prospectifs" aux sujets directement en lien avec le monde économique et la stratégie territoriale ou régionale (politiques locales).

Depuis 2013, je suis membre du conseil de l'ENSTIB. Ce conseil, de 24 personnes, offre une fenêtre formidable sur les préoccupations des représentants du monde socio-économique de la filière (ex : sociétés Poirot, Siat-Braun, Houot), des représentants des collectivités territoriales, régionales des Vosges et de la Grande Région ainsi que des organismes nationaux par le biais du FCBA. Les discussions au cours de ces conseils ont été pour moi un élément clé dans la compréhension de l'écosystème forêt-bois et une source de réflexions sur la filière, ses caractéristiques et sur le comment envisager des partenariats avec ces industries pour supporter notre projet de recherche, d'enseignement et contribuer à leur transition vers l'usine du futur.

Par ailleurs, notre projet est en totale adéquation avec la démarche de la nouvelle région Grand-Est de déploiement des concepts de l'usine du futur au sein des entreprises du territoire à travers d'un plan d'action matérialisé dans la Figure 63.



Figure 63 : extrait de la démarche de déploiement de l'Usine du futur de la région Grand-Est⁵⁰

Les enjeux pour la région sont multiples : économiques (optimisation de l'efficacité industrielle), écologiques (optimisation des ressources énergétiques), ainsi que sociétaux (repenser la place de l'Homme dans l'entreprise). Ils sont renforcés par la proximité de l'Allemagne; un pays à l'initiative du concept d'industrie 4.0. La démarche de déploiement de l'usine du futur a été lancée en janvier 2016. Elle découle de la 2^{ème} phase de la « nouvelle France Industrielle» coordonnée sur le plan national par l'alliance Industrie du Futur. La démarche s'adresse aux PME de la région souhaitant adopter le paradigme « usine du futur». Elle propose un diagnostic intégralement financé par la Région Grand-Est qui permet d'analyser la situation actuelle et donc la maturité de l'entreprise, d'identifier les pistes de progrès et les actions permettant d'obtenir des résultats rapides.

Par ailleurs, dans le cadre du pacte-lorraine 2014-2016⁵¹, qui est au cœur de la stratégie de réindustrialisation de la région, la filière-fois bénéficie d'une place de choix, puisqu'elle fait partie des filières d'excellence et d'avenir. Dans le même contexte, nous avons vu émerger l'IMEO (Institut du Management de l'Excellence Opérationnelle) qui est une structure créée dans le cadre du Pacte Lorraine avec comme objectif principal la formation et l'accompagnement des PME dans la mise en place de l'Excellence Opérationnelle pour renforcer leur compétitivité.

J'ai été impliquée dès le démarrage de ce projet en 2015 et nous avons bénéficié, avec une dizaine de collègues représentants d'autres composantes de l'Université de Lorraine, d'une formation conduisant à une certification Black-Belt validant la maîtrise de la démarche Six Sigma. L'objectif est de faire la promotion de cette démarche dans nos formations mais aussi d'accompagner les entreprises de la région dans leur mise en place de cette démarche.

⁵⁰ <http://www.fibois-alsace.com/UserFiles/File/actualites/2017-Plaquette-Usine-du-futur-V5page-page.pdf>

⁵¹ <http://www.pactelorraine.eu/le-pacte-lorraine/>

Notre stratégie pour le futur vise, d'une part, à pérenniser les relations étroites que le laboratoire entretient depuis de nombreuses années avec les acteurs industriels de la région comme TRANE, PARISOT, ACTA-MOBILIER et POIROT... par le biais de contrats cadres et d'autre part, nous souhaitons étendre le champ d'application à d'autres partenaires et d'autres problématiques industrielles.

Nous avons, aussi, le souhait d'être plus actifs dans les instances régionales comme les interprofessions forêt-bois FIBOIS ALSACE⁵², GIPEBLOR⁵³, ou le laboratoire d'excellence Labex ARBRE⁵⁴. Pour garder le lien avec la communauté d'experts en gestion de production et d'excellence opérationnelle nous pouvons réactiver le groupe GIR-EST⁵⁵ qui a été animé par Pr André Thomas pendant plusieurs années et qui m'a permis de visiter et d'assister à plusieurs conférences dans les entreprises de la région.

Enfin, notre connaissance du monde socio-économique acquise lors de mes années d'expériences industrielles nous permettra de prétendre à l'avenir de prendre en charge une mission de promotion ou de renforcement des liens avec le tissu socio-économique, au niveau du département ISET, voire du laboratoire.

IV.1.3.3 Au niveau national

Cette vision que nous avons des futurs modèles de pilotage basés sur la simulation rentre pleinement dans l'axe 2 « usine du futur » et notamment dans sa composante « usine virtuelle » de la stratégie nationale de recherche (SNR). Cette stratégie est inscrite dans la loi pour l'enseignement supérieur et la recherche du 23 juillet 2013 et a été élaborée par plusieurs acteurs : la communauté scientifique et universitaire, des partenaires sociaux et économiques, des pôles de compétitivité, des représentants du monde associatif, des administrations, agences publiques et collectivités territoriales concernées et de la société civile. Dix défis ont été identifiés en cohérence avec le programme européen Horizon 2020. Ces défis constituent la feuille de route des appels ANR depuis quelques années. C'est dans le défi « stimuler le renouveau industriel » que nos activités trouvent tout leur sens.

Les activités de recherche de la communauté française sur les systèmes manufacturiers intelligents, sont principalement issues du GT IMS2 du GDR MACS. Initialement, ces travaux ont démarré autour du projet « Systèmes Contrôlés par le Produit ». Le noyau dur de ce groupe de travail est formé de quatre laboratoires le CRAN, IRCCYN⁵⁶ de l'université Nantes, LAMIH⁵⁷ de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, le LSIS⁵⁸ de l'université de Saint-Jérôme à Marseille et d'un certain nombre d'autres intervenants plus ponctuels comme le LIMOS ou le CGI d'Albi, par exemple. La particularité de ces 4 laboratoires est d'avoir fait le choix de conduire des travaux autour du développement et de l'exploitation de plates-formes expérimentales dans le même esprit que TRACILOGIS. Dans ce cadre, nous avons menés quelques travaux de prospection collaboratifs qui ont conduit à l'article (Cardin et al., 2017).

⁵² <http://www.fibois-alsace.com>

⁵³ <http://www.gipeblor.com>

⁵⁴ <http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/>

⁵⁵ GIR-EST : Groupe d'Intérêt Régional des CPIM de France pour la région EST

⁵⁶ IRCCYN : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes

⁵⁷ LAMIH : Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines

⁵⁸ LSIS : Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes

Mes activités s'inscrivent pleinement dans cette communauté. Néanmoins, j'ai par le passé et, selon les opportunités qui se sont offertes à moi, participé au travail du GT MOME (Méthodes et Outils pour la Modélisation et l'Évaluation) pour les aspects purement modèle de simulation. Il en est de même avec le GT FL (flux logistique) pour les aspects applications gestion de la production et de la logistique.

Au niveau national, mon objectif, est de continuer à être actifs dans ces différentes communautés mais aussi de s'ouvrir sur d'autres communautés du GDR. En effet, actuellement, les concepts d'applications centrées sur l'Homme, la prise en compte du facteur humain et la coopération Homme-Machine sont essentiellement traités dans le groupe de travail Automatisation des Systèmes Hommes-Machines (ASHM) du GDR MACS et dans d'autres GDR comme GDR PSYCHO-ERGO ou le GDR Européen Groupement De Recherche Européen «Human-Machine Systems in Transportation. Toutefois, nous sommes aujourd'hui plusieurs de la communauté IMS2 à vouloir explorer ce point (Cardin, 2016), (Sallez, 2012), (Trentesaux and Millot, 2016).

J'ai aussi comme objectif de renforcer mon implication dans le GDR. A terme, ma volonté est d'animer un groupe de travail sur les problématiques liées à la conception et l'évaluation des systèmes de pilotage manufacturiers centrés Homme.

IV.1.3.4 Au niveau international

Mon projet est aussi en adéquation avec le cadre européen de l'agenda 2020 pour le projet « Factory of the Future » animé par (EFFRA, 2012). Cette initiative vise à aider les entreprises manufacturières de l'UE, en particulier les PME, à s'adapter aux pressions concurrentielles mondiales en s'appuyant sur les avancées des technologies de l'information et de la communication (TIC) (cf. Figure 64).

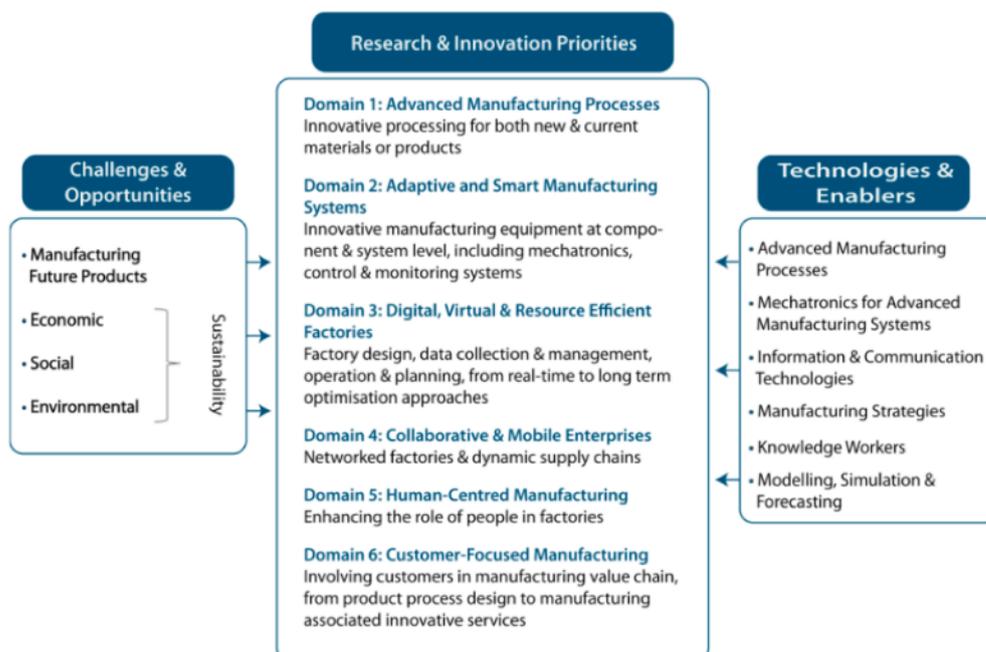


Figure 64 : schéma de référence de FoF 2020-(EFFRA, 2012)

A l'échelle internationale, la communauté « *Intelligent Manufacturing System* », travaillant en particulier sur les HMS compte des chercheurs en Angleterre (Auto-ID Lab, If Cambridge), en Belgique (Université de Louvain), au Portugal (Institut Polytechnique de Bragance, UNINOVA), en Finlande (Université d'AALTO), en Espagne (Université de La Mancha), en Roumanie (Institut Polytechnique de Bucarest) en Afrique du Sud (Department of Mechanical and Mechatronic Engineering/ Stellenbosch University) et aux USA (MIT, NIST), etc.

L'industrie 4.0 a rebattu les cartes des communautés autour des concepts CPS ou IoT, chaque grand pays a son initiative et son programme de recherche autour de ce concept : Industry 4.0 pour l'Allemagne (et Europe), pour les USA (Smart Manufacturing Leadership Coalition) (SMLC) ou le Industrial Internet Consortium (IIC), E-factory pour le Japon, Intelligent Manufacturing en Chine, etc.

Dans ce contexte, pour améliorer l'agilité des systèmes de production, quelques initiatives ont été lancées comme le projet « Lean MES » en Finlande, visant une implémentation modulaire des HMS en se basant sur les nouvelles ICT et en particulier sur les ontologies et les outils du web-semantic (Lanz et al., 2012). Des projets plus centrés sur la partie hardware, ont été menés pour tirer profit des nouvelles avancées dans le domaine de la mécatronique (CPS) et de l'internet (IoT). A titre d'exemple pour les plateformes de production agile, on peut citer le concept d'assemblage flexible FlexiMon (Klose, 2014) ou le projet de recherche AutoPnP (Ostertag, 2014). Cependant, ces plateformes, dans leur implémentation, dépendent des fournisseurs de solutions spécifiques et sont donc moins conformes à la vision Industrie 4.0 qui prône l'interopérabilité et la congruence des solutions multifournisseurs. Pour répondre à ce problème, SmartFactory KL⁵⁹, en tant que centre d'expertise et plateforme de recherche et de démonstration indépendante du fabricant, prépare le terrain pour l'usine intelligente du futur en travaillant sur des standards et solutions qui constituent la base d'une technologie d'automatisation très flexible de type « plug in and produce ». Grâce à une collaboration avec plusieurs grands acteurs de l'automatisation.

Toutes ces avancées confortent la crédibilité et l'adéquation de notre projet aux enjeux des systèmes manufacturiers du futur.

Depuis 2014, je suis membre de l'IFAC 5.1, ma stratégie est d'être plus actifs en proposant des sessions spéciales dans les prochains congrès organisés par ce comité. Je suis aussi membre de l'IPC du workshop Intelligent Manufacturing System. Nous proposons régulièrement des sessions spéciales à SOHOMA et à IESM. Notre stratégie est de continuer dans cette dynamique et être présents dans les IPCs de ces congrès.

Un autre objectif est de créer et renforcer les collaborations internationales dans notre discipline de recherche « conception et évaluation des architectures de pilotage » avec des professeurs comme les Pr P.Leito, Portugal, Pr M.Taich, Italie ou/et Dr. K. Kruger Afrique du Sud) et dans le domaine l'industrie 4.0 pour la filière-bois avec le Pr Jonathan Gaudreault Co-Directeur du FORAC à l'université Laval à Québec. Pour les aspects simulation, nous souhaitons renforcer notre lien avec la communauté internationale travaillant sur la simulation, en particulier dans le cadre des sociétés savantes comme SCS⁶⁰. Cela passera aussi par des publications dans des congrès internationaux comme Winter Simulation.

⁵⁹ <http://www.smartfactory.de>

⁶⁰ SCS : The Society For Modeling & Simulation International

IV.1.4 Organisation du projet

Pour adresser les 5 défis présentés dans la définition du projet, les actions envisagées seront organisées selon 2 thématiques :

- Contribution aux architectures de pilotage et d'organisation des systèmes durables.
- Modélisation anthropocentrée pour des modèles de simulation adaptables au cœur des nouveaux systèmes de pilotage.

Pour chaque thématique, nous avons identifié quelques actions élémentaires qui peuvent constituer des projets de thèses. Les travaux se dérouleront sur plusieurs horizons temporels et niveaux TRL⁶¹. Ils s'articuleront autour de ces 2 thématiques principales portant sur la formalisation du cadre de modélisation pour la simulation et le pilotage. Il s'agit dans un premier temps **de définir le cycle de vie des développements de nos modèles anthropocentrés et l'approche d'ingénierie des exigences** qui sera utilisée. Ces éléments constitueront le socle théorique et seront partagés et enrichis tout au long du projet.

Consciente que notre projet est ambitieux, ces 2 thématiques feront l'objet de plusieurs années de travail (une projection sur 10 ans). C'est pourquoi, aussi, cela passera nécessairement par des collaborations avec des partenaires locaux et extérieurs. Les actions que nous avons proposées représentent des exemples de projets que nous souhaitons mener prioritairement. Nous avons volontairement présenté celles-ci, non pas dans un ordre chronologique, mais par rapport à deux axes *TRL* et *Effort*. Cela permettra d'avoir une gestion agile de notre stratégie de recherche, en veillant à coupler des actions de recherche de ressourcement disciplinaire avec des actions de recherche finalisée. En effet, l'ordre chronologique sera étroitement lié aux opportunités de financement et à la stratégie du laboratoire. Dans la suite, nous présenterons les contextes et problématiques sous-jacents à ces deux thématiques ainsi que quelques actions de recherches potentielles.

Afin de développer notre stratégie de recherche, nous nous sommes appuyés sur le cadre générique de priorisation le « *value quadrant analysis* » utilisé, entre autres, dans le management agile de projets de R&D. Nous avons adapté ce cadre à nos besoins afin de structurer les différentes actions selon deux axes et 4 catégories d'actions : actions de consolidation, de transposition, de ressourcement et de rupture.

- **L'axe « TRL »** : le TRL (que nous avons déjà cité) est un critère de plus en plus important dans les programmes de financement de la recherche (ex. le programme Horizon 2020 de la commission européenne). Il peut aussi être important pour cibler les financements (région, partenaires socio-économiques) et la gestion du risque inhérente à tout projet de recherche. Par cet indicateur nous souhaitons veiller à associer une recherche disciplinaire plus fondamentale permettant le ressourcement scientifique (TRL>5) à une recherche plus appliquée permettant une meilleure collaboration avec les partenaires socio-économiques et la multidisciplinarité (TRL<5).
- **L'axe « Effort »** : Le but de cet indicateur est de quantifier le « coût des actions » et les risques associés. Les actions de recherche sont liées aux possibilités de financement γ (du plus facile 1 au plus difficile 3), aux besoins de nouvelles collaborations α (collaboration existante 0 à collaboration(s) à mettre en place 3) et aux ressources de développement β (0 à 3 pour les besoins en ressources de développement).

⁶¹ TRL : Technology Readiness Level

Ainsi, cet indicateur pourra être calculé selon la formule $1 \leq \text{Effort} = \alpha + \beta + \gamma \leq 9$. Il permettra de gérer les risques liés au projet mais aussi à l'impact (satisfaction d'explorer des nouveaux champs) sur les collaborateurs.

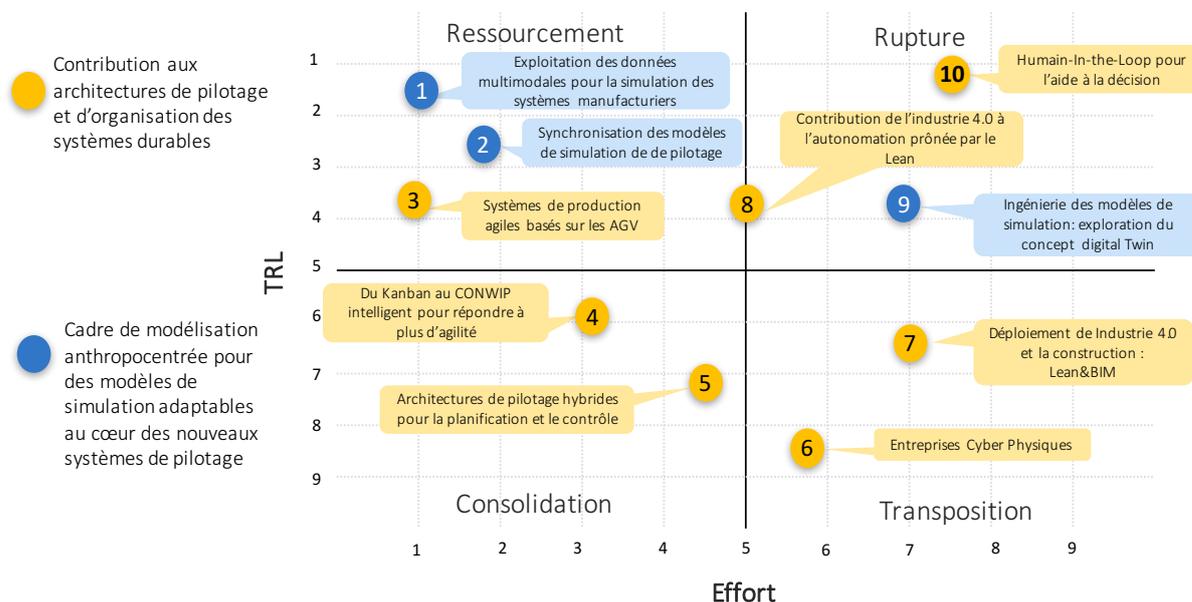


Figure 65 : cadre de priorisation selon axes TRL/EFFORT pour l'organisation de mes actions de recherche

Sans vouloir présenter en détail chacune de ces actions nous pouvons toutefois préciser et clarifier notre stratégie. Dans la zone $TRL < 5$ (Consolidation et Transposition) nous avons placé des actions plus appliquées qui s'intéresseront au développement de méthodologies et d'outils pour le développement de systèmes de production intelligents et durables. Nous pouvons ainsi transposer nos travaux sur les systèmes manufacturiers à l'échelle d'une cellule, d'une ligne d'assemblage, voire d'une usine et/ou à une échelle plus étendue encore comme les chaînes logistiques ou chantiers de construction (actions 6,7).

- les actions de « Transposition » sont plus difficiles à atteindre que les actions de « Consolidation » compte tenu de leur $TRL/EFFORT$ plus grand mais leur potentiel d'impact est supérieur aux « Transpositions » puisqu'elles permettent d'explorer d'autres champs de recherche et d'application (actions 6,7).
- les « Consolidations » étant plus simples à lancer, il s'agit de « la zone de confort » : s'appuyer sur nos résultats antérieurs pour une recherche finalisée dans des domaines d'application non loin de nos expériences passées (actions 4,5).
- dans la zone $TRL > 5$ nous avons placé les actions plus amont : les actions de types ruptures nécessiteront des collaborations externes avec des laboratoires qui travaillent sur les aspects Interactions Homme-Machine et demanderont un travail de maturation et davantage de temps (actions 8, 9,10).
- les activités de « Ressourcement » seront pour nous l'occasion de se concentrer sur une activité de recherche plus théorique centrée sur l'évaluation et la conception des architectures de pilotage (actions 1, 2,3).

IV.1.5 La thématique modélisation anthropocentrée pour des modèles de simulation adaptables au cœur des nouveaux systèmes de pilotage

Les systèmes de production du futur doivent plus que jamais faire face à de multiples sources de variabilité et d'événements imprévus. Face à ces événements et comme expliqué dans le chapitre 2, l'organisation du système, pour y répondre, peut être proactive, réactive ou interactive ou une association de ces trois composantes dans ce que (Hollnagel, 2006) appelle la résilience. Dans le cadre de ce scénario, la simulation peut être utilisée pour évaluer la situation et proposer une nouvelle réorganisation avec l'interactivité Homme-machine.

Traditionnellement, la simulation est utilisée en « off-line » dans les phases de conception et de validation des systèmes de pilotage. Ce récent usage de la simulation « on-line » pour réagir à des événements imprévus induit de nouvelles exigences dans le développement des modèles de simulation (Haouzi et al., 2013).

L'ingénierie des modèles de simulation a donné naissance à plusieurs approches permettant de réduire le temps de développement et de mise à jour de ces modèles afin de garantir leur qualité de prédiction et leur justesse par rapport au système réel.

IV.1.5.1 Directions de recherche proposées

Le cadre de modélisation, que nous proposerons, doit fournir le socle théorique pour le développement des modèles et des outils de simulation ayant cette capacité d'adaptation et mettant l'Homme en avant dans tout le cycle de vie de ces modèles. Cela passe, en priorité, par la définition de la propriété d'adaptabilité, l'évaluation de la maturité des modèles de simulation et la définition du cycle de vie des modèles. Ce nouvel usage de la simulation nous amène ainsi à proposer une approche holistique pour le développement des modèles de simulation et de pilotage.

Le paragraphe suivant a pour vocation de présenter les premières briques de nos réflexions.

1) Définition formelle de la propriété d'adaptation :

En complément à ce qui a été développé au début du chapitre II, la définition formelle de la propriété d'adaptation peut se décrire selon deux axes :

i) axe évolution du système dans le temps présenté dans Figure 66 et sur le principe de synchronisation qui postule que les caractéristiques soumises à des propriétés diachroniques sont à tout instant compatibles avec les propriétés synchroniques susceptible de les lier (Wal, 77).

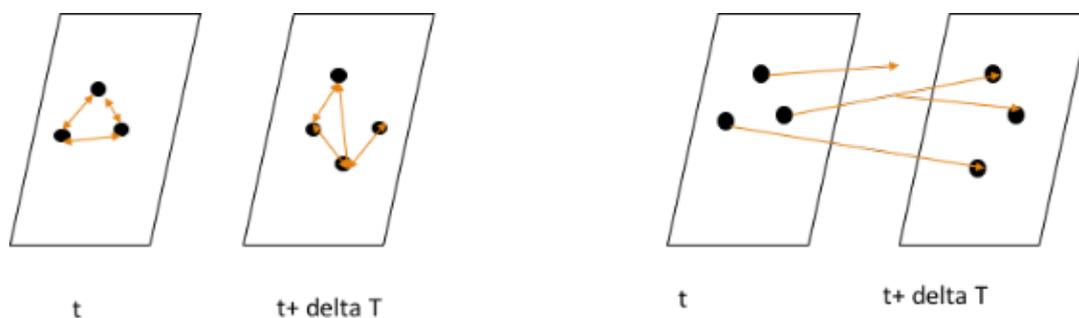


Figure 66 : approches synchronique et diachronique selon (Meinadier, 98)

ii) axe transformation : le but de tout système de production est de transformer les produits en y apportant de la valeur ajoutée. Nous pouvons utiliser la systémique pour

développer nos primitives de modèles de simulation. En effet, nous pouvons caractériser l'état de chaque produit par sa morphologie et ses coordonnées spatiales et temporelles (Le Moigne, 1977), (Feliot, 1997), (Penalva, 1997). Ainsi toute transformation, peut-être modélisée en fonction de sa nature avec une des primitives proposées (cf. Figure 67).

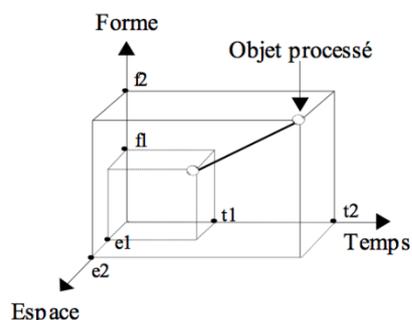


Figure 67 : le référentiel Temps, Espace, Forme (Le Moigne, 1994)

2) Le modèle de maturité :

Dans des travaux précédents, nous avons proposé un modèle de maturité pour les modèles de simulation adaptables. Ce modèle se base sur 3 niveaux ontologiques : conceptuel, organisationnel et technologique et sur 5 niveaux de maturité conduisant à atteindre la propriété d'adaptabilité. L'objectif, maintenant, est de mettre en place un système d'évaluation plus formel et de proposer un service de benchmark pour la communauté de la simulation des systèmes manufacturiers.

3) Une approche holistique pour le développement des modèles de simulation et de pilotage.

Au cours de la dernière décennie, il y a eu des avancées significatives dans les modèles et les technologies de collecte de données à partir des éléments physiques et la création de leur représentation virtuelle (le concept de Digital Twin).

Nous souhaitons par le biais de ce projet tester un usage nouveau de la simulation pour les systèmes de pilotage. L'utilisation du modèle de simulation comme un miroir du modèle de pilotage, travaillant en totale symbiose grâce à un échange mutuel de services (que nous pouvons grouper dans « enrichissement des modèles de pilotage » et « validation des modèles de simulation ») permettra une totale synchronisation entre les objets virtuels et les objets réels. Plusieurs questions conceptuelles et techniques se poseront. Quelles sont les types d'échanges entre les modèles ? Quels verrous technologiques faut-il soulever pour synchroniser les objets réels et les objets virtuels ?...

IV.1.5.2 Pistes de collaboration

Les principaux chercheurs qui pourront potentiellement être impliqués dans le projet sont issus du département ISET: William Dirigent (expert en analyse de données) et Alexis Aubry (expert en recherche opérationnelle). A ces deux jeunes chercheurs, s'ajoutent d'autres chercheurs seniors : Pr Patrick Charpentier (expert en évaluation de performances) et Philippe Thomas (MCF.-HDR) (expert en Data Mining). Les principaux collaborateurs externes envisagés sont : Olivier Cardin (expert en CPS et simulation) de l'université de Nantes, Paul Valkenaers de

l'université de Louvain (expert en systèmes intelligents de production) et Pr. Eric Brangier : Université de Lorraine (expert en psychologie et ergonomie des nouvelles technologies).

IV.1.5.3 Pistes de modes de financement :

Ce projet a été proposé dans le cadre d'un ANR JCJC 2017. Les commentaires des deux évaluateurs ont été très positifs. Ils ont, en particulier, apprécié le caractère innovant et le progrès par rapport à l'état de l'art. Nous profiterons de nos récentes avancées et de leurs commentaires pour proposer une nouvelle version de ce projet l'année prochaine. Notre objectif est de demander un financement pour une thèse et un post-doc. Comme le montre la Figure 65 plusieurs actions peuvent être associées à cette thématique. Nous souhaitons en priorité s'attaquer aux actions (1,2,6,8) identifiées dans la figure 67.

IV.1.5.4 L'action exploitation des données multimodales pour la simulation

L'idée originale de cette action réside dans l'utilisation **d'une méthode inductive** de la simulation basée sur **les connaissances explicites** des algorithmes appliqués aux données issues des CPS et **de connaissances tacites** d'un expert pour identifier des patterns ou des modèles de comportements. Sur la base de ces modèles de comportement des architectures et des paradigmes de programmation peuvent être explorés.

Selon les caractéristiques des données disponibles nous pouvons envisager plusieurs pistes. Une première piste consiste en l'utilisation d'une approche dirigée par les modèles (Bézivin et al, 2001), telle que nous l'avons proposée dans nos travaux de thèse, mettant en place plusieurs niveaux ontologiques.

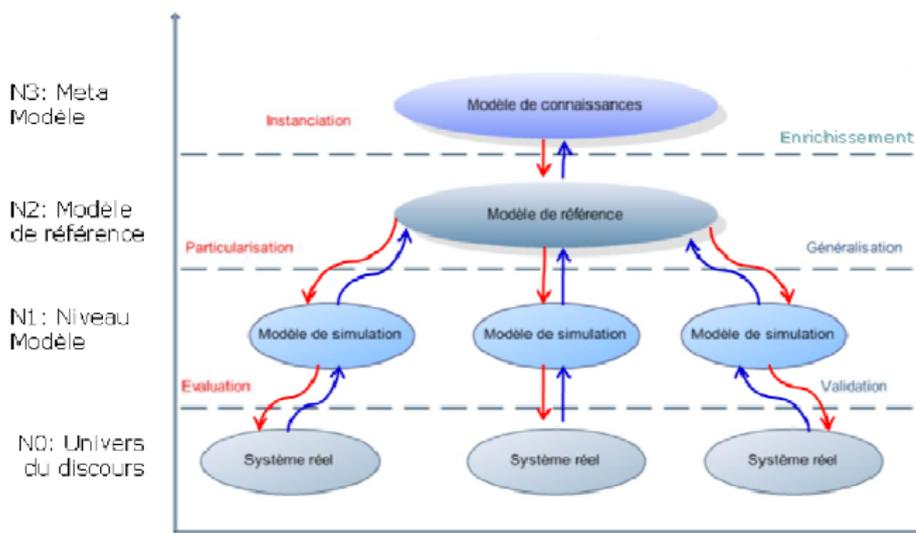


Figure 68 : l'ingénierie dirigée par les modèles pour la simulation

Cette méthode très utilisée dans le domaine de développements informatiques gagne de plus en plus du terrain dans la communauté de l'automatique et productique. Elle propose une automatisation du processus d'élaboration d'applications informatiques par modélisation. Cette automatisation est basée sur les connaissances d'ingénieurs expérimentés et de leurs bonnes pratiques en développement de logiciels. L'ordonnancement de l'ensemble des transformations des modèles est alors vu comme un processus de conception incluant l'ensemble des étapes de modélisation des plus conceptuelles jusqu'à la génération des applications exécutables.

Nous pouvons automatiser ces mécanismes d'inférence par le biais de modèles basés sur des ontologies pour la connaissance et la génération des modèles de simulation à événements discrets pour l'exécution. La place de l'Homme est à plusieurs niveaux : gérer la pertinence des modèles proposés, compléter les données, donner un avis d'expert (en utilisant par exemple la théorie d'incertitude et logique floue).

D'un point de vue plus pragmatique, une thèse que nous pouvons lancer rapidement reposera sur des travaux précédents de notre laboratoire (Véjar and Charpentier, 2011) qui, comme nous l'avons introduit précédemment, ont permis de proposer une approche originale pour la génération automatique de modèles de simulation pour les systèmes à événements discrets. Dans leurs travaux, ils ont utilisé les données de localisation des produits dans le système de fonctionnement. Le flux de données de caractéristiques liées aux produits constitue l'entrée d'un algorithme qui génère un modèle de simulation de réseaux de files d'attente pour une classe de systèmes de Job-shop. Le processus de modélisation comporte l'avantage de ne pas nécessiter une connaissance a priori du système à modéliser et permet par ailleurs que la construction et la mise à jour du modèle soient facilitées.

Deux perspectives intéressantes sont à traiter dans le cadre de ce projet :

- i) La généralisation de cette approche à d'autres classes d'utilisation ;
- ii) L'association du modèle de files d'attente/simulation (où seules les transformations de forme et d'espace ont été gérées avec des objets 3D du système physique étudié et la forme des objets du flux (ex : produits).

Pour étudier et valider cette approche nous utiliserons la plateforme TRACILOGIS en tant que système physique à étudier avec des scénarii représentant différentes classes de systèmes (job shop, flow shop, open shop). Le système de localisation des produits instrumentés (du plateau technique) permettra de générer le modèle de simulation. Pour générer le modèle d'animation associé au modèle de simulation, nous souhaitons étudier l'usage de scanners 3D pour la génération de l'objet 3D de l'atelier. Cela permettra de répondre aux besoins d'adaptabilité des modèles et donc de réduire les coûts de développement.

La plateforme que nous souhaitons développer s'appuie sur les ressources et les équipements que nous avons déjà mis en œuvre sur le plateau technique TRACILOGIS (couleur verte) et des solutions/équipements que nous souhaitons acquérir dans le cadre de ce projet CPER Cyber- Entreprise appel 2016-2017 et celui de l'appel 2017-2018 (couleur orange).

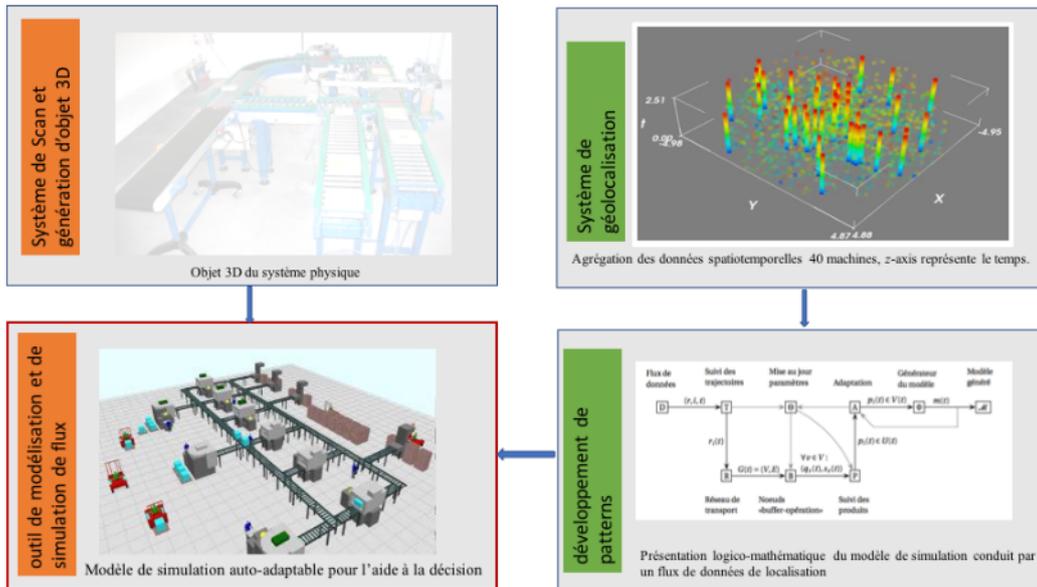


Figure 69 : extrait de la demande de CPER Entreprise Cyber-Entreprise appel 2017-2018

Au niveau interne, nous pensons collaborer avec Pr Patrick Charpentier qui a travaillé sur la génération automatique des modèles de réseaux de files d'attente.

Au niveau externe, nous souhaitons collaborer avec des fournisseurs de solutions logiciels comme Arena Rockwell Automation, flexsim...

IV.1.5.5 L'action synchronisation des modèles de simulation et de pilotage

Le but de cette action de recherche est de mettre en œuvre des méthodes permettant d'assurer la continuité numérique tout au long du cycle de vie de la production par le biais du concept Digital Twin comme expliqué précédemment et illustré dans la Figure 70 :

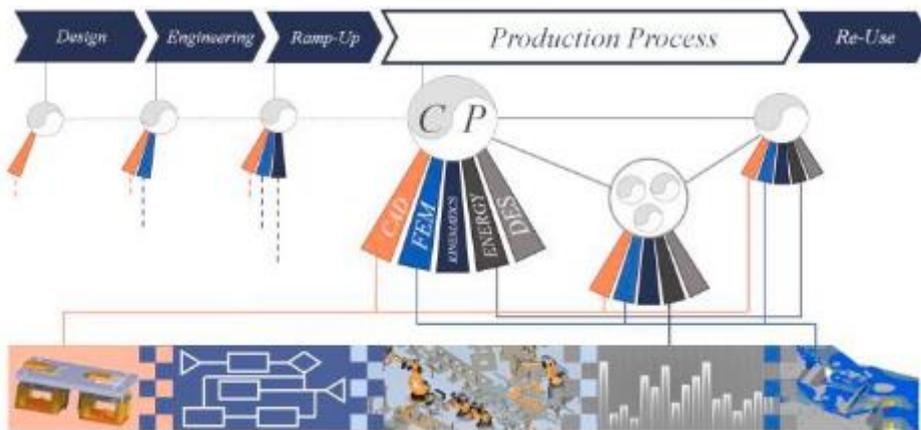


Figure 70 : la vision digitale TWIN selon (Weyer et al, 2016)

Pour assurer la synchronisation entre les mondes réel et numérique, les fournisseurs de CPS doivent être capables de fournir des périphériques prêts à se synchroniser avec des modèles de données personnalisés avec une description sémantique qui les rendent facilement intégrables dans les outils de simulation et de contrôle à plusieurs niveaux. Cela doit créer une connexion bidirectionnelle entre les éléments physiques au niveau de l'atelier et les outils de simulation multidisciplinaires. Plusieurs travaux et initiatives essayent de répondre au problème

d'interopérabilité et d'intégration de CPS. Un des défis technologiques que nous souhaitons soulever concerne l'utilisation de paradigmes informatiques et artefacts qui nous permettront de changer le modèle de simulation tout au long de leur cycle de vie et « à chaud » (disponibilité de l'application) tout en restant robuste face aux erreurs et imprécisions des données et avec une gestion de temps hybride (temps réel et temps discret). Le modèle pourra fonctionner en temps-réel pour garantir l'adéquation de la solution avec les objets réels mais pourra aussi profiter du mode de fonctionnement « à événements discrets » pour accélérer la simulation (dans le cas d'usage en prédiction).

Nous pensons, à l'instar de P. Valkenaers dans ses travaux, que l'utilisation de l'environnement d'Erlang/OTP permettra de répondre à une bonne partie de ces verrous. Dans ce cadre, nous pouvons collaborer avec ce dernier de l'université de Louvain ou avec le Dr Karl Kruger de Stellenbosch University qui a exploré l'usage de cet environnement dans le développement d'une architecture de pilotage Holonique. Pour cette action de ressourcement disciplinaire avec une TRL faible, nous pensons demander un financement dans le cadre d'un contrat doctoral.

IV.1.6 La thématique contribution aux architectures de pilotage et d'organisation des systèmes industriels durables

IV.1.6.1 Directions des recherches

La question que nous souhaitons soulever concerne l'agilité et la durabilité des futurs systèmes industriels dans leurs composantes physiques et virtuels.

Au niveau physique, les avancées technologiques en matière de mécanique, d'informatique et de transfert d'informations par communication permettent l'utilisation d'éléments mobiles, tels que les AGVs⁶² ou les drones, tout en limitant le coût de leurs déploiements dans le système industriel. Cette évolution nous amène à penser que l'intégration de ces éléments dans le système sera rapide, tout en offrant de nombreux avantages comme la flexibilité dans le routage des produits, la flexibilité de manutention... L'intégration de cet aspect mobilité des éléments des ateliers de production ouvre aussi des voies intéressantes dans la reconfigurabilité des systèmes de production, mais soulève cependant plusieurs questions :

- Quelle est la meilleure configuration des flux dans l'atelier ? C'est-à-dire quelles entités seront mobiles : les produits, les machines ou les deux ?
- Quel(s) sera(seront) le(s) rôle(s) des entités mobiles dans le système (ex : transport, surveillance, ...) ? Est-ce que, selon le type d'élément mobile, le rôle pourra être différent ?
- Quelle flexibilité de routage peut-on permettre ? Est-ce que les AGVs suivent des chemins prédéfinis, doivent-ils choisir parmi plusieurs chemins donnés ou doivent-ils planifier leur chemin jusqu'à la destination ?

Toutes ces questions amènent un grand nombre de défis puisqu'elles dépendent avant tout des infrastructures (des ateliers). Par exemple, pour certaines infrastructures (les ateliers à projet où les produits sont volumineux), il serait plutôt avantageux que les machines soient mobiles pour effectuer les opérations.

⁶² AGV: Automated guided vehicle
Hind Bril EL HAOUZI

Au niveau du système d'information se pose aussi la question de la coordination et de la négociation entre les éléments mobiles, puisque l'ensemble de ces éléments resteront dans un espace commun qu'ils devront se partager. Il faudra donc qu'ils coopèrent les uns avec les autres, qu'ils se coordonnent (afin d'éviter des collisions, par exemple) et que les décisions locales qu'ils prennent soit bénéfiques au système industriel global.

- Quelle intelligence doit-on alors embarquer dans les entités mobiles ?
- Quel est le nombre de décisions que peut prendre un élément mobile ?
- Doit-il juste servir d'élément physique ou peut-il prendre des décisions relatives à la production de manière réactive ?

Ainsi la prise de décision de ces éléments peut aussi bien être un atout qu'un point faible pour le système. En effet, une décision locale peut avoir de mauvaises répercussions sur les performances globales du système industriel. La prise de décision locale devra alors se faire d'une manière optimisée, tout en sachant qu'une entité mobile n'a qu'une quantité limitée d'informations. La coopération entre les entités mobiles et le système global aura aussi une grande importance afin de compenser les prises de décisions locales.

La conception et la maîtrise du fonctionnement d'un tel système ne sont pas des tâches triviales. Parmi les difficultés que l'on peut anticiper, la commutation (ou le basculement), entre mode centralisé et distribué reste un problème scientifique peu étudié et manque de formalisation et de généralisation. En effet, si le système centralisé a démontré sa force dans la mise en œuvre de modèles permettant d'obtenir des optimums globaux en terme de décision, il a aussi démontré ses faiblesses en situation de réaction face à des événements imprévisibles. Même si des travaux antérieurs ont montré que des décisions robustes peuvent être proposées pour garantir des performances malgré des perturbations modélisées *a priori*. Ces décisions, même robustes sur des perturbations fixées, deviennent souvent inopérantes lors de l'apparition d'aléas (les performances sont très dégradées). L'objectif donc est de continuer à chercher des mécanismes génériques d'hybridation pour permettre de tirer pleinement profit de ces deux modes de pilotage.

Par ailleurs, les entreprises manufacturières sont soumises à une pression croissante des consommateurs pour adhérer aux pratiques «vertes», éthiques et durables. Ainsi, la recherche de la durabilité peut être motivée par la nécessité d'une conformité réglementaire, d'une législation environnementale, d'initiatives sociales d'entreprise, d'économies de coûts grâce à l'éco-efficacité et à la satisfaction de la demande des clients...

Dans le modèle de (Bi, 2011), le cycle de vie du produit est divisé en quatre phases: «préfabrication», «fabrication», «utilisation» et «post-utilisation». L'impact sur la durabilité des quatre phases a été montré dans la Figure 71. L'objectif de nos travaux futurs serait de proposer des indicateurs de performances qui prennent en compte des aspects environnementaux et sociétaux en plus des indicateurs classiques d'efficacité. Ainsi, un des éléments que nous pouvons prendre en compte dans nos modèles de pilotage et de simulation serait le profil de consommation énergétique des processus de fabrication à l'instar des travaux de l'IRCCYN (Kouki, 2017). Nous pouvons aussi prendre en compte l'aspect humain en mettant en place le principe d'autonomie (voir l'action III.11.1). Ainsi, l'opérateur sera déchargé des missions de contrôle ou des tâches à non-valeur ajoutée. Un point qui n'a pas été souligné dans cette figure serait la prise en compte de la mise à jour des compétences des opérateurs dès la phase de préfabrication.

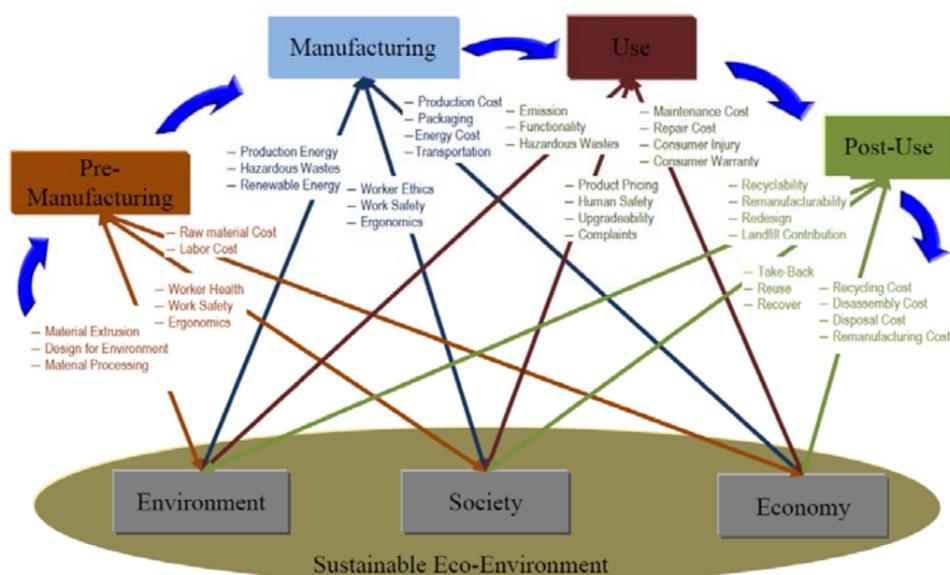


Figure 71 : la durabilité dans le cycle de vie du produit selon (BI, 2011)

IV.1.6.2 Collaboration

Dans ce projet transversal nous pouvons collaborer avec Guillaume Demesure (Maitre de Conférences) qui a travaillé sur l'introduction des AGV dans les systèmes de production. Sur la thématique de la durabilité nous pouvons travailler avec des collègues comme Phuc Do et le Pr Benoit IUNG. Au niveau externe, nous pensons collaborer avec Olivier Cardin de l'IRCYNN avec qui nous avons déjà eu plusieurs échanges à ce sujet.

IV.1.6.3 Mode de financement

Sur la thématique d'efficacité énergétique, nous pouvons solliciter un financement en répondant à des appels à projet ADEME ou région.

IV.1.6.4 L'action entreprises cyber-physiques

Jusqu'à aujourd'hui nos travaux se sont surtout concentrés sur les fonctions internes des chaînes logistiques. L'industrie 4.0 rend possible l'échange de données entre les fonctions internes et externes des différents sites de l'entreprise. Les décisions de sous-traiter ou d'internaliser des fonctions pourront se prendre de façon plus dynamique. Avec les nouvelles avancées technologiques dans le traitement de l'information et dans les moyens de communication, il est possible d'imaginer que la commande du client sera automatiquement relayée à un ensemble d'unités de production et de prestataires logistiques et que cette commande déclenchera la réalisation d'un ensemble de services de fabrication et de logistique qui s'autoréguleront (cf. Figure 72). (Fragmentation fonctionnelle et spatiale des activités de la chaîne de valeur).

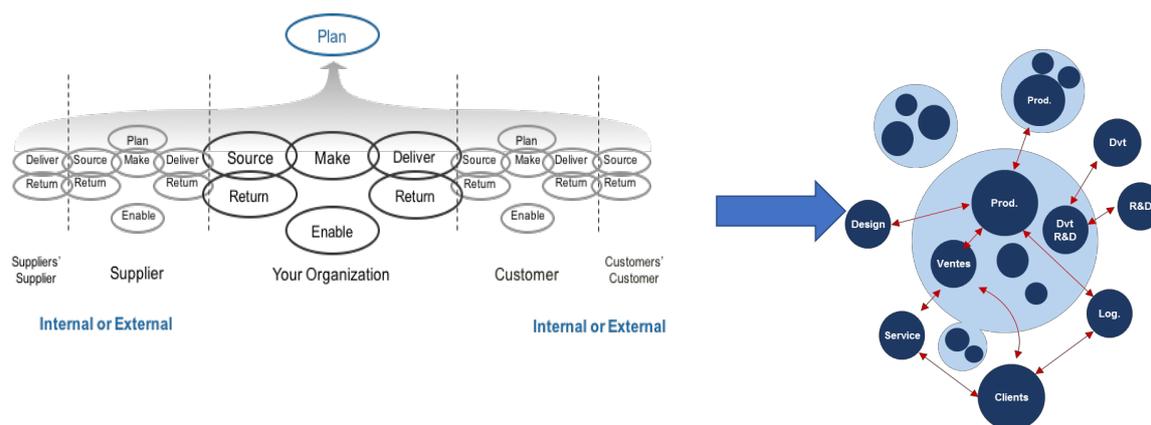


Figure 72 : schéma adapté de (Kagermann H., 2013)

Ainsi, cette action se focalisera sur l'exploitation des systèmes de production afin :

- de simuler, évaluer et optimiser ces nouvelles organisations de la chaîne logistique ;
- de faire évoluer sa logistique en tenant compte des aspects maîtrise énergétique, maîtrise des risques, des rejets et des déchets ;
- de promouvoir une logistique durable par l'optimisation du transport intermodal et de la logistique inverse.

Pour tester cette vision de chaîne logistique s'appuyant sur les CPS et les nouvelles technologies d'information, 60 K€ ont été octroyé pour mettre en place une plateforme d'expérimentation dans le cadre du CPER Cyber-Entreprises (appel 2015-2016). Je coordonne cette action au niveau CRAN avec une équipe de cinq permanents. La plate-forme se scindera en deux parties : une installée à l'AIPL sur le Campus sciences de Vandoeuvre les Nancy, l'autre étant sur TRACILOGIS sur le Campus bois à Epinal. Ainsi TRACILOGIS et l'AIPL seront dotés de trois écrans (Interface Homme-Machine (IHM)), deux émulant une vue numérique de la chaîne logistique utilisée pour véhiculer les produits entre les sites ou vers un entrepôt, le troisième utilisé pour simuler l'autre site. La Figure 73 représente « la vue AIPL » du système envisagé. Chaque sortie de plateforme (TRACILOGIS ou AIPL) sera équipée d'un portail permettant de «faire rentrer les produits dans la chaîne logistique» considérée. Ces plateformes existantes seront équipées de tags RFID permettant la (géo)localisation des produits sur chacun des sites. Un serveur situé à Epinal permettra de gérer les entrées-sorties des données des divers sites et chaîne logistique et de supporter les modèles d'optimisation qui seront développés.

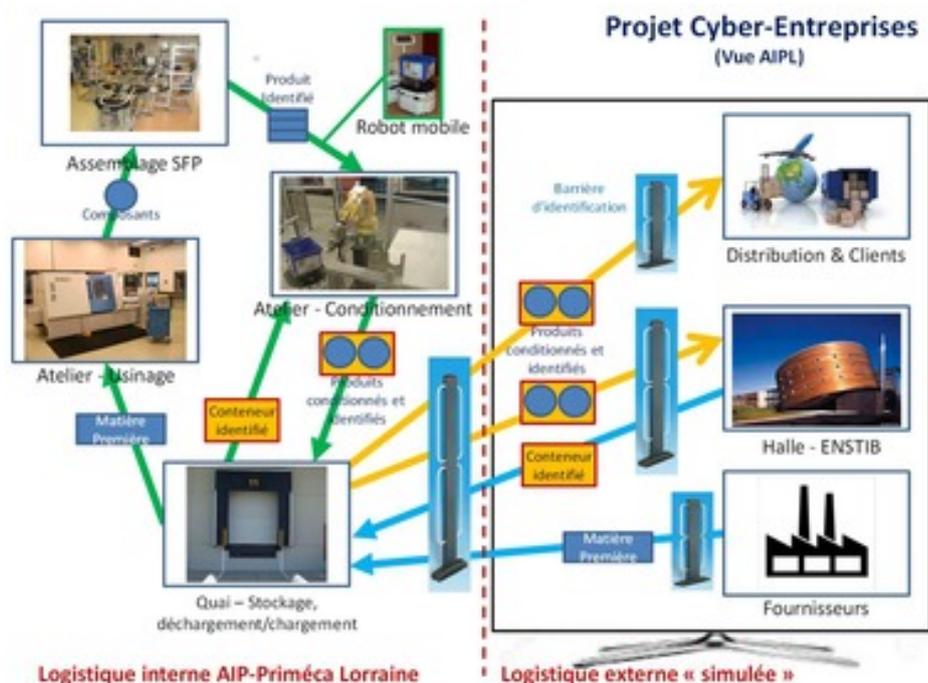


Figure 73 : schéma extrait du projet CPER Cyber-Entreprises (2015-2016)

Le projet CPER introduit précédemment conduira à mettre en place un outil d'aide à la décision pour la logistique et le transport. Dans ce cadre, nous envisageons de travailler plus particulièrement avec Mme Wahiba Ramdane Maître de conférences à l'Université de Lorraine/LORIA (spécialiste en recherche opérationnelle appliquée au transport) avec qui nous collaborons depuis 2 ans. Nous avons aussi la volonté d'intégrer le nouveau maître de conférences Guillaume Demesure recruté à l'ENSTIB dans la conduite de ce projet. Son travail sur le contrôle des AVG ainsi que sur le système de pilotage « basé agents » sera un atout.

IV.1.6.5 L'action contribution de l'industrie 4.0 à l'autonomation

Un des modèles permettant l'agilité des systèmes de production est le « Lean ». Le Lean trouve ses origines dans le Système de Production Toyota (TPS) développé dans les années 1950 et 60 (Womack and Jones, 1996). Il repose sur deux piliers. Le plus connu est le « juste à temps » et son outil phare est le Kanban. Le deuxième est le « jidoka » ou autonomation dont l'outil phare est l'« andon ». L'agilité est obtenue grâce au composant le plus « agile » dans le système, à savoir, l'Homme. Ainsi, tout le management repose sur des signaux visuels (andons) en fonction desquels l'opérateur prend les décisions. Le kanban, sert à contrôler des boucles d'informations locales liées aux étapes des processus physiques et éviter ainsi l'inertie des systèmes d'informations centralisés (de type ERP). De la même manière, le jidoka permet de mettre en place des boucles courtes d'identification de la non-conformité et de réaction immédiate.

Le succès de ce paradigme est tel que nous avons assisté à un foisonnement d'applications dans des secteurs variés tels que les hôpitaux, l'administration ou le bâtiment. Malgré des résultats spectaculaires, le Lean souffre, dans sa mise en œuvre classique (sans les nouvelles technologies ICT) de plusieurs limitations : la première, et plus importante, est sa myopie liée aux décisions locales prises par l'opérateur grâce aux outils du management visuel (effet « boîtes noires ») et une autre est la difficulté de réajustement du nombre de cartes de Kanban et du takt-time face à une variabilité des demandes clients de plus en plus croissante.

L'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication permet de pallier aux limites de ces différentes pratiques industrielles basées sur le management visuel, en garantissant une meilleure adaptabilité et réactivité face aux aléas et aux incertitudes, dans la mesure où on peut utiliser des capteurs/senseurs pour réduire cette myopie. Ainsi, les propriétés du modèle de pilotage global peuvent émerger d'un ensemble de comportements simples issus du terrain.

Par ce sujet je souhaite allier mes expériences et formations industrielles sur les approches Lean, six-sigma ou le management par contraintes avec mes activités de recherche autour de l'industrie 4.0. Une collaboration industrielle sera nécessaire pour explorer ce sujet. Ainsi, une thèse CIFRE avec une entreprise qui souhaite faire évoluer sa culture Lean ou six-sigma en adoptant les paradigmes de l'industrie 4.0. sera à envisager.

IV.2 PROJET D'ENSEIGNEMENT

En plus des formations académiques, j'ai pu, tout au long de ma carrière, bénéficier de formations et de qualifications professionnelles dispensées par des consultants ou des enseignants. Cela m'a permis de mesurer les divergences et les complémentarités des approches pédagogiques de ces formations mais aussi de mesurer l'impact et la complexité de la relation entre l'apprenant et le maître.

Cinq ans après avoir quitté le monde industriel, je ne cesse de mesurer le volume et la richesse des connaissances explicites des différents projets que j'ai menés ou dans lesquels j'ai été impliquée et surtout les connaissances tacites accumulées par le compagnonnage de mes différents responsables industriels. Je mesure aussi l'apport d'une formation comme la thèse et sa formule alliant l'autonomie (un projet porté par le doctorant), l'accompagnement par des directeurs de recherche et une culture scientifique du laboratoire. Les interactions avec des chercheurs de différents horizons participent grandement à la capacité d'apprendre dans un monde où la transversalité et la complexité ne cesse d'augmenter...

C'est ce recul qui m'a permis de m'intéresser à de nouvelles formes d'apprentissage comme le jeu, la pédagogie par le projet et de façon plus générale à l'approche par compétences.

Ainsi, j'ai profité du changement de la maquette pédagogique en 2014 pour faire évoluer mes enseignements au bénéfice des travaux de recherche engagés au CRAN et de mon expérience industrielle. En plus de mes enseignements classiques de la gestion de production et de la logistique, j'ai pris en charge l'UE qualité et plusieurs modules sur les Systèmes d'Information, la simulation à événements discrets et le Lean. Nous présenterons ici, le début de « ces chantiers » et surtout les perspectives.

IV.2.1 TRACILOGIS : Un bus de formation de l'acquisition des données, à la prise de décision, en passant par le traitement de l'information

Depuis la prise de la responsabilité du plateau technique TRACILOGIS, nous nous sommes forgés deux convictions : la pérennité du plateau passera par le transfert de nos activités de recherche vers l'enseignement et que le vivier de futurs chercheurs se trouve aussi parmi nos étudiants.

Ainsi, nous avons, dans le cadre l'UE 9.12 (ingénierie numérique pour les métiers de la filière bois), pris en charge deux modules visant à savoir modéliser le comportement du système industriel (simulation à événements discrets) et son système d'information support aux décisions (systèmes d'information, SGBD). Nous avons pris comme système d'étude la cellule CAD de TRACILOGIS. Avec l'ingénieur de la plateforme, nous avons développé un scénario de

mise en situation dans le but d'encourager la pratique de la pédagogie par projet. A travers, ce scénario l'étudiant doit concevoir le système d'information de l'entreprise TRACILOGIS et l'alimenter de données réelles de localisation et de traçabilité des produits (module SI, 24h en présentiel). Ce système d'information sert de base pour le module (modélisation et simulation SED/ 20h). L'idée de faire de TRACILOGIS un bus de formation (comme le montre la Figure 74), que nous avons proposée, prend forme petit à petit puisque, l'année prochaine, ce même système d'information servira aux deux modules qui traitent des méthodes et outils de collecte, d'exploration et d'analyse des données à des fins de classification ou de prédiction.

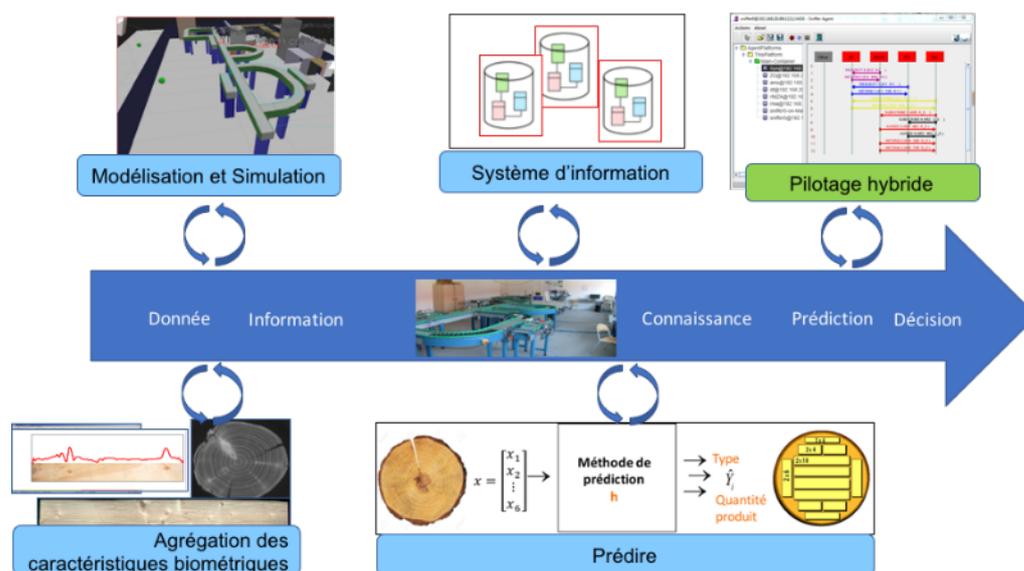


Figure 74 : les modules de formation utilisant ou qui pourront utiliser TRACILOGIS

Au niveau pédagogique, notre but est de favoriser l'acquisition de compétences par le projet. Le projet a l'avantage de pouvoir créer des situations complexes proches de la réalité industrielle dans lequel l'élève est acteur de la résolution, tout en étant aussi acteur de son propre apprentissage. Dans ce cas, la pédagogie n'est plus linéaire mais auto-adaptative. La relation entre l'enseignant et l'apprenant évolue au cours d'un tutorat actif ce qui permet que d'autres apprentissages fondamentaux puissent également se faire dans de bonnes conditions.

IV.2.2 UE Innovation et Industrialisation

Le module « Innovation » de cette UE est un bel exemple de la pédagogie par le projet. Les apprenants alternent entre des cours théoriques sur, entre autres, l'ingénierie système, les outils de la créativité, l'analyse fonctionnelle et de la valeur, l'ingénierie simultanée, l'écoconception, la protection industrielle et la protection des innovations, avec une mise en situation par petits groupes de 6 à 10 élèves travaillant sur un ou des projets proposés par un industriel. Cette mise en situation est équivalente à 20h de cours répartis sur 3 mois dans le but de laisser « le temps de l'apprentissage ». Les TP sont animés par 6 enseignants/consultants, chacun possède sa spécialité et sa culture (designers, méthodes industrielles, ingénierie système).

Depuis 2 ans, j'ai été impliquée dans l'animation de ces TP dans le but de prendre la responsabilité de l'UE l'année prochaine. Après cette période d'observation, notre ambition est de faire de cette UE un laboratoire pour faire infléchir notre formation d'ingénieur « centrée

Hind Bril EL HAOUZI

technique » vers une formation où la créativité et l'audace ont leur place. A l'ère de l'industrie 4.0 où les avancées technologiques foisonnent et dans le même esprit que les deux campagnes à portée mondiale menées par Pr Guy Boy « Human Centred Design : conception centrée Homme » et "From STEM⁶³ To STEAM⁶⁴, nous sommes convaincus que l'avenir est à la créativité, à la prise en compte de tous les facteurs humains (ergonomie, physiologie, psychologie...) dès le début de la conception, à la création de produits répondant aux besoins clients et à la satisfaction et au bien-être des Hommes.

IV.3 PROJET DE TRANSFERT TECHNOLOGIQUE

Préambule :

Ce projet s'appuie principalement sur le projet de LABCOM que nous souhaitons redéposer pour l'appel ANR 2018-2019. Par conséquent, il est donc le fruit d'un travail collectif avec, en particulier, le Pr André Thomas et Philippe Thomas MCF.-HDR de l'équipe SIA et les représentants du CRITT BOIS.

La filière forêt-bois réalise près de 60 milliards d'euros de chiffre d'affaires en France. Elle génère environ 440 000 emplois (directs et indirects) répartis dans près de 60 000 entreprises de la première transformation (trituration, sciage), de la deuxième transformation (emballage, tonnellerie, charpente-menuiserie-ossature, parquets, meubles en bois, papier et cartons), de la distribution et la mise en œuvre (charpente, menuiserie et agencement) et du bois énergie (PNFB 2016-2026). Deuxième poste déficitaire du commerce extérieur, avec près de 6 milliards d'euros de déficit annuel, ces secteurs recèlent un potentiel d'environ 60.000 emplois (Caullet, 2013)⁶⁵.

Depuis 30 ans, plusieurs enquêtes, rapports ministériels, régional ou interprofessionnels s'accordent sur la nécessité de développer la filière forêt-bois. Ils font globalement les mêmes constats : manque de structuration organisationnelle et informationnelle et différents gaspillages constatés à chaque maillon de la chaîne (production, transformation, distribution, la gestion et la valorisation de fin cycle). La compétitivité des entreprises de la filière bois passera donc nécessairement par l'identification de ces sources de gaspillage, l'analyse et l'exploitation des informations, donc par la mise en œuvre de nouveaux processus et outils d'ingénierie numérique, par l'évaluation et l'optimisation des procédés et des processus, mais aussi par une approche systémique traitant tous les maillons et leurs interactions par l'évaluation multicritères, par exemple.

⁶³ STEM : Science Technology Engineering and Mathematics

⁶⁴ STEAM : Science Technology Engineering, Art and Mathematics

⁶⁵ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-rapport-de-Jean-Yves-Caullet.html>

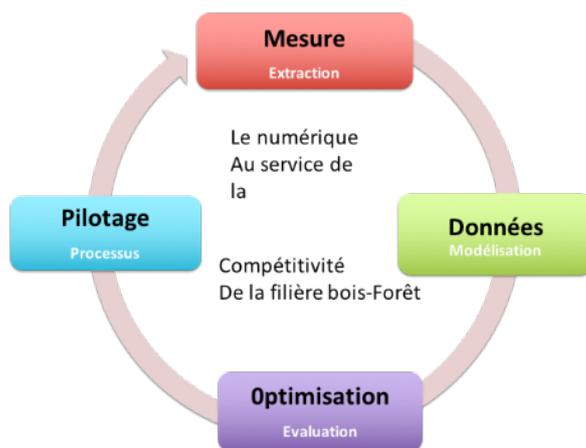


Figure 75 : les étapes de numérisation pour la filière bois-forêt

A l'instar des autres industries et à l'ère de l'usine 4.0 ou l'usine numérique, tous ces défis, poussent vers la transition numérique de la filière bois-forêt.

Par ailleurs, la très petite taille de la grande majorité des entreprises de la filière (90% TPE, PME) ne leur donne pas en général la possibilité d'engager individuellement les dépenses pour la recherche et développement nécessaires à leur évolution. Le CRITT BOIS apporte alors expertise et accompagnement aux acteurs de la filière dans leurs évolutions techniques et organisationnelles et leur fournit un point d'accès à l'univers de la recherche appliquée au matériau bois.

Sur des problématiques communes à ce tissu industriel, le CRITT BOIS initie et conduit des projets collaboratifs et des actions collectives qui permettent aux entreprises de faire des économies d'échelle, de s'inscrire dans une dynamique d'innovation technologique et parfois de disposer d'outils mutualisés.

Le but du LABCOM est donc de développer une ingénierie agile, adaptable, personnalisée aux divers cas de cette filière dans laquelle on pourra trouver des tonneliers, des fabricants de meubles, des constructeurs et des scieurs. Autant de processus divers de par leur nature, leurs produits et la taille des entreprises, mais partageant le même cycle d'exploitation des données. Les grands enjeux scientifiques et technologiques sont induits par la nécessité d'adapter les approches et outils de l'automatique. Ils sont associés à chacune des étapes du processus DOP décrit dans la Figure 75 :

Mesure : Il s'agit d'extraire des produits, procédés ou processus industriels des données brutes qui vont être à la base des activités de suivi, d'amélioration et de contrôle du système industriel. La particularité du bois permet d'explorer, en plus de l'instrumentation classique, des outils et méthodes biométriques (Tomographe à rayon X, Micro-onde ...)

Traitement des données : Ces données brutes devront être caractérisées, structurées, modélisées afin d'être exploitées. Les outils et méthodes utilisés sont principalement issus du domaine de l'intelligence artificielle et s'inspirent du concept de bio-mimétisme. Les réseaux de neurones ont permis par exemple de prédire l'évolution de la qualité ;

Optimisation : sur la base de ces modèles, des améliorations peuvent être proposées par le biais des outils de la recherche opérationnelle et évaluées en s'appuyant sur des systèmes d'évaluation de performances. A l'instar, des travaux réalisés en collaboration avec Parisot-meubles, par exemple, où une plateforme de simulation à événements discrets a permis de tester plusieurs règles de pilotage ;

Pilotage : les scénarios choisis devront être mis en œuvre dans le pilotage et le contrôle des procédés ou processus de production et de logistique. Après la phase d'évaluation, des systèmes de pilotage intelligent (SCP) peuvent être conçus et mis en œuvre. Des travaux de conception de ce mode de pilotage ont déjà été réalisés en collaboration avec la société TRANE.

Conclusion générale :

A ce jour, la rédaction de ce document m'offre l'occasion de faire le point sur mes travaux ainsi que sur les concepts et modèles que j'ai pu utiliser. Ainsi, nos travaux peuvent être synthétisés dans la Figure 76. Mon expérience, à la fois industrielle et de recherche, enrichie par les différentes collaborations que j'ai eues dans le cadre de l'encadrement des thèses et masters, m'a permis de développer un socle de connaissances dans la gestion de l'information et l'organisation industrielle. Ce socle a été mis au service d'un paradigme qui est celui des systèmes contrôlés par le produit. De ma formation par « compagnonnage » au CRAN aux côtés des personnes comme les professeurs Gérard Morel et André Thomas, j'ai gardé une culture de la systémique avec ses différents raisonnements, ses méthodes et ses vérités...

Ainsi, depuis 2004, ce triptyque, socle de connaissances, paradigme et culture, est le moteur et le fil conducteur de nos travaux. L'observation des problèmes issus de la réalité industrielle nous a conduits par homomorphisme à explorer des classes de problèmes de la littérature et à utiliser des paradigmes de modélisation issus à la fois du génie automatique et productique comme les HMS (Holonc Manufacturing System) et IMS (Intelligent Manufacturing System) et du génie informatique comme MAS (Multi-Agents System), IDM (Ingénierie dirigée par modèles) et IA (Systèmes Experts, Ontologies, etc.). Les outils de l'usine numérique (la simulation et la modélisation 3D) nous ont permis par pragmatisme de proposer des solutions pour les problèmes industriels posés.

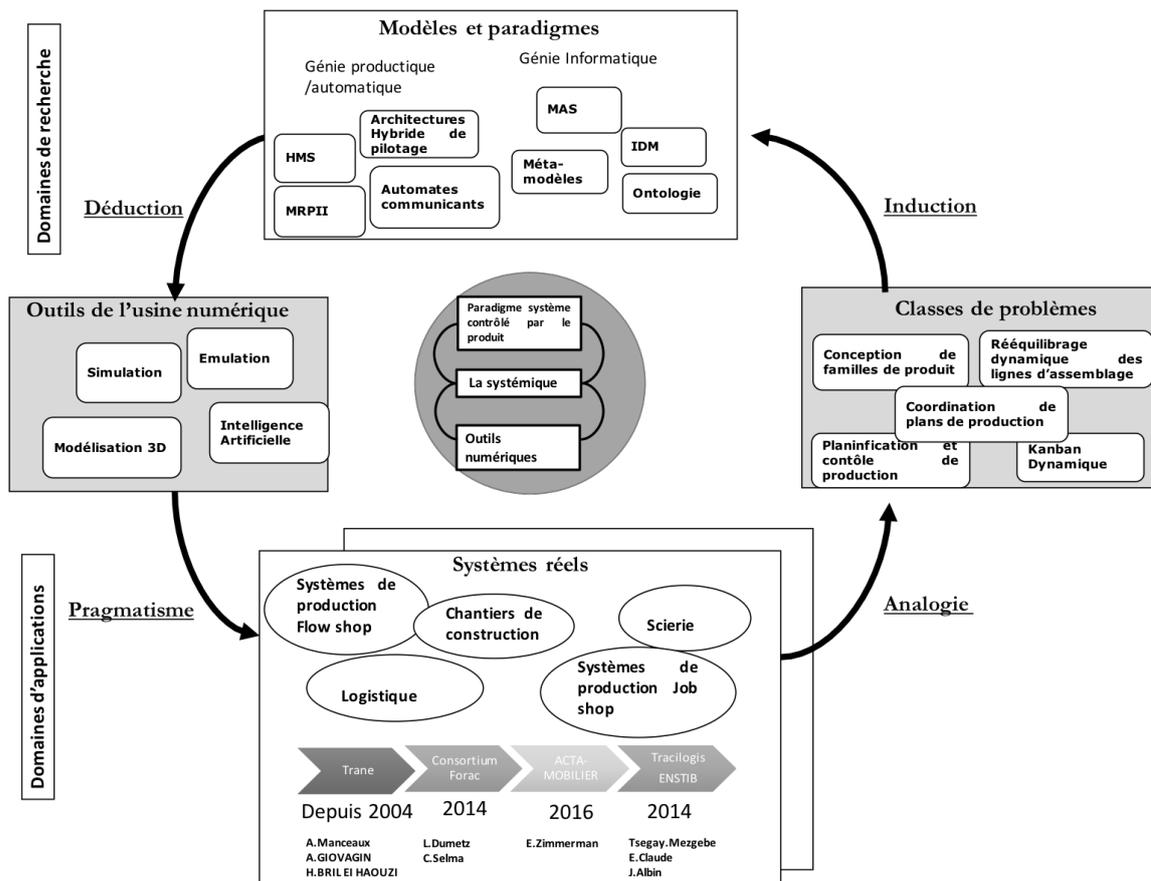


Figure 76 : heuristique de recherche utilisée et Synthèse de nos travaux

Les nouveaux défis, à la fois technologiques et scientifiques, nous ont amené à reconsidérer le paradigme systèmes contrôlés par le produit et à le transformer en paradigme pilotage et simulation des systèmes de production centrée Homme. Ainsi, **le défi scientifique majeur de mon projet de recherche portera sur la définition d'un cadre de modélisation anthropocentré pour la simulation et le pilotage basé sur les objets intelligents/connectés.** L'idée originale de ces travaux réside dans l'utilisation de méthodes inductives de la simulation basée sur les connaissances explicites des algorithmes appliqués aux données issues des CPPS (les systèmes de production cyber-physiques) et de connaissances tacites d'un expert pour identifier des « patterns » ou des modèles de comportements. Plusieurs méthodes et outils peuvent potentiellement être combinés pour supporter la formalisation de ces connaissances (réseaux de neurones, réseaux de files d'attente, ontologies et logique floue). Sur la base des modèles de comportements résultants, des architectures de type multi-agents et des environnements de programmation comme Erlang/OTP⁶⁶, pour supporter l'hétérogénéité des modèles impliqués, pourront être utilisés pour implanter ces nouveaux systèmes de pilotage. Et enfin, comme nous l'avons montré, ces travaux s'intègrent pleinement dans le futur projet de recherche « Système et Objets Intelligents en Interactions » (S&O-2I) d'ISET, qui sera déployé lors du prochain contrat quinquennal du CRAN (2018-2023).

⁶⁶ <http://erlang.org/doc/>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- al, P.S.P. et, Neuman, R.P., Cavanagh, R.R., 2000. *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance*, 1 edition. ed. McGraw-Hill Education, New York.
- Albin, J., 2014. Introduction du concept de matière communicante dans la construction béton (Rapport Master ISC). Université de Lorraine.
- Almecija, B., 2013. Apports des connaissances métiers pour la conception d'un système multi-capteurs de tri qualité Billon. *Contrib. Trade Knowl. Des. Multi-Sens. Sort Syst. Log Qual.*
- André Thomas, 2004. *DE LA PLANIFICATION AU PILOTAGE POUR LES CHAINES LOGISTIQUES*. Henri Poincaré.
- Arai, T., Aiyama, Y., Sugi, M., Ota, J., 2001. Holonic assembly system with Plug and Produce. *Comput. Ind., HOLONIC MANUFACTURING SYSTEMS* 46, 289–299. doi:10.1016/S0166-3615(01)00111-7
- Ashby, W.R., 1956. *An Introduction to Cybernetics*.(1. Publ.). Taylor & Francis.
- Bañna, S., Morel, G., Panetto, H., 2006. Interopérabilité dirigée par les modèles : une Approche Orientée Produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise. [Lieu de publication inconnu] : [éditeur inconnu]. 2006.
- Barbosa, J., 2015. Self-organized and evolvable holonic architecture for manufacturing control (phdthesis). Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Battaia, O., Dolgui, A., 2013. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *Int. J. Prod. Econ.* 142, 259–277. doi:10.1016/j.ijpe.2012.10.020
- Beer, S., 1984. The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. *J. Oper. Res. Soc.* 35, 7–25. doi:10.1057/jors.1984.2
- Beer, S., 1981. *Brain of the Firm: The Managerial Cybernetics of Organization*. John Wiley & Sons.
- Beer, S., 1971. The liberty machine. *Futures* 3, 338–348. doi:10.1016/0016-3287(71)90053-
- Beer, S., 1959. *Cybernetics and management*. Wiley.
- Belisário, L.S., 2015. Contribution de l'apprentissage par simulation à l'auto-adaptation des systèmes de production (phdthesis). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- Belisário, L.S., Azouz, N., Pierreval, H., 2015. Adaptive ConWIP: Analyzing the impact of changing the number of cards, in: 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). Presented at the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), pp. 930–937. doi:10.1109/IESM.2015.7380266
- Boy, G., 2012. *Orchestrating Human-Centered Design*. Springer Science & Business Media.
- Buxey, 1973. Production flow line system design—A review.
- Cardin, O., 2016. Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de systèmes de production cyber-physiques (thesis). Université de Nantes.
- Cardin, O., 2007. Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – Application à un système flexible de production (phdthesis). Université de Nantes.
- Cardin, O., Trentesaux, D., Thomas, A., Castagna, P., Berger, T., Bril El-Haouzi, H., 2017. Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: state of the art and future challenges. *J. Intell. Manuf.* 1503. doi:10.1007/s10845-015-1139-0
- Carmo, B.B.T. do, Margni, M., Baptiste, P., 2017. Addressing uncertain scoring and weighting factors in social life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 1609–1617. doi:10.1007/s11367-017-1275-1

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Castanedo, F., 2015. Etude comparative des outils et méthodes du Lean Construction avec les méthodes traditionnelles de planification projet et produit.

Chen, D., Kjellberg, T., Euler, A. von, 2010. Software Tools for the Digital Factory – An Evaluation and Discussion, in: Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology, Advances in Intelligent and Soft Computing. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 803–812. doi:10.1007/978-3-642-10430-5_62

Claude, E., 2014. Maquette numérique du bâtiment (BIM), Méthodes Tous Corps d'Etat (Rapport Master ISC). Université de Lorraine.

Clavier, C., Bril El Haouzi H, Wahiba Ramdane Cherif –Khettaf 2017. Analyse du comportement des métaheuristiques sur un problème de rééquilibrage dynamique des lignes d'assemblage. Presented at the ROADEF 2017, Metz.

Coletta, A.R., 2012. The Lean 3P Advantage: A Practitioner's Guide to the Production Preparation Process. CRC Press.

Cornuéjols, A., Miclet, L., Haton, J.-P., 2010. Apprentissage artificiel [Texte imprimé], Algorithmes. Paris : Eyrolles. DL 2010, cop. 2010.

Costanza, J., 1996. Just-In-Time manufacturing excellence John Costanza Institute of Technology Inc. ISBN: B0006ENXLI.

Dassisti, M., Panetto, H., Lezoche, M., Merla, P., Semeraro, C., Giovannini, A., Chimienti, M., 2017. Industry 4.0 paradigm: The viewpoint of the small and medium enterprises, in: 7th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2017, ICIST 2017 Proceedings. Kopaonik, Serbia, pp. 50–54.

Dumetz, L., Gaudreault, J., Thomas, A., Lehoux, N., Marier, P., El-Haouzi, H., 2017. Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with co-production. Int. J. Prod. Res. 55, 3631.

Dumetz, L., Gaudreault, J., Thomas, A., Lehoux, N., Marier, P., El-Haouzi, H., 2016. ATP vs CTP policies in co-production context: the winner is not always the expected one, in: International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS'16. Bordeaux, France.

Dupin, P., Ballard, G., Court, P., photographe, 2014. Le lean appliqué à la construction : comment optimiser la gestion de projet et réduire coûts et délais dans le bâtiment. Paris : Eyrolles. DL 2014, cop. 2014.

Durand, D., 1992. La systémique [Texte imprimé], Que sais-je ? : 1795. Paris : Presses universitaires de France. 1992.

El Haouzi, H., 2008. Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps : Application à l'entreprise Trane.

El Haouzi, H., Petin, J.-F., Thomas, A., 2009. Design and validation of a product-driven control system based on a six sigma methodology and discrete event simulation. Prod. Plan. CONTROL 20, 510–524.

El-Haouzi, H., 2008. Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps: Application à l'entreprise TRANE (phdthesis). Université Henri Poincaré - Nancy I.

ElMaraghy, H.A., 2005. Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. Int. J. Flex. Manuf. Syst. 17, 261–276. doi:10.1007/s10696-006-9028-7

Erkman, S., 1998. Vers une écologie industrielle [Texte imprimé] : Comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle, Dossier pour un débat: 84. Paris : C. L. Mayer. cop. 1998.

Ferber, J., 1994. La kénétique: des systèmes multi-agents à une science de l'interaction. Rev.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Int. Systémique 8, 13–27.

Ferber, J., Perrot, J.-F., 1995. Les systèmes multi-agents [Texte imprimé]: vers une intelligence collective, IIA, Informatique, intelligence artificielle. Paris : InterEditions. DL 1995.

Frosch, R.A., 1992. Industrial ecology: a philosophical introduction. Proc. Natl. Acad. Sci. 89, 800–803. doi:10.1073/pnas.89.3.800

Gallou, F.L., Meunier, B.B., 1992. Systémique: théorie et applications. Technique et documentation.

Ghosh, S., Gagnon, R.J., 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. Int. J. Prod. Res. 27, 637–670. doi:10.1080/00207548908942574

Gibert, P., 1980. Le contrôle de gestion dans les organisations publiques. Éditions d'Organisation, Paris, France.

Giovannini, A., 2015. A knowledge representation framework for the design and the evaluation of a product variety (phdthesis). Université de Lorraine.

Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., Dassisti, M., El Haouzi, H., 2012. Ontology-Based System for supporting Manufacturing Sustainability. Annu. Rev. Control 36, 309–317.

Giovannini, A., Panetto, H., Aubry, A., Salinesi, C., Aldanondo, M., Trajanovic, M., El Haouzi, H., Dassisti, M., Pierrel, L., 2015. A knowledge representation framework for the design and the evaluation of a product variety. 2015.

Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., Zühlke, D., 2014. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era, in: 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Presented at the 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 289–294. doi:10.1109/INDIN.2014.6945523

Gouyon, D., 2001. Application de techniques de synthèse de la commande en ingénierie d'automatisation. [S.l.] : [s.n.]. 2001.

Grangeon, N., Leclaire, P., Norre, S., 2011. Heuristics for the re-balancing of a vehicle assembly line. Int. J. Prod. Res. 49, 6609–6628. doi:10.1080/00207543.2010.539025

Gregor, M., Medvecky, S., 2010. Digital Factory – Theory and Practice. doi:10.5772/10380

Greif, M., 1989. L'Usine s'affiche: communication visuelle et management. Editions d'Organisation.

Guion, R., El Haouzi, H., Thomas, A., 2011. Etude de la pertinence d'un kanban adaptatif avec des contraintes multicritères: Cas d'une cellule de découpe, in: 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS. Marseille, France, p. CDROM.

Gunasekaran, A., 1999. Agile Manufacturing: A Framework for Research and Development. Int. J. Prod. Econ. 62, 87–105. doi:10.1016/S0925-5273(98)00222-9

Hamel, G., Prahalad, C.K., 1994. Competing for the Future [WWW Document]. Harv. Bus. Rev. URL <https://hbr.org/1994/07/competing-for-the-future> (accessed 10.9.17).

Haouzi, H.B.E., Thomas, A., Charpentier, P., 2013. Toward adaptive modelling & simulation for IMS: The Adaptive Capability Maturity Model and future challenges. IFAC Proc. Vol., 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems 46, 174–179. doi:10.3182/20130522-3-BR-4036.00104

Herrera, C., 2011. Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées. Generic Logist. Plan. Framew. Context Distrib. Cent. Decis.

Holling, C.S., 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. Annu. Rev. Ecol. Syst. 4, 1–23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Horbach, S., Ackermann, J., Müller, E., Schütze, J., 2011. Building blocks for adaptable factory systems. Robot. Comput.-Integr. Manuf., Conference papers of Flexible Automation

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- and Intelligent Manufacturing 27, 735–740. doi:10.1016/j.rcim.2010.12.011
- Horrocks, I., Patel-Schneider, P.F., Boley, H., Tabet, S., Grosz, B., Dean, M., 2004. SWRL: A semantic web rule language combining OWL and RuleML. W3C Memb. Submiss. 21, 79.
- Huhns, M.N., Singh, M.P. (Eds.), 1998. Readings in Agents. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Huin, A., Beck, J.-G., 2014. Application de la philosophie “Lean Manufacturing ” à un chantier de construction.
- Jeon, S.M., Kim, G., 2016. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). Prod. Plan. Control 27, 360–377. doi:10.1080/09537287.2015.1128010
- Jørgensen, A., 2013. Social LCA—a way ahead? Int. J. Life Cycle Assess. 18, 296–299. doi:10.1007/s11367-012-0517-5
- Jover, J., Thomas, A., Canet, D., 2013. Contribution à la réduction des pertes d’informations dans l’industrie du bois : utilisation de la Résonance Quadrupolaire Nucléaire pour l’identification de marqueurs chimiques et de la virtualisation du processus de production pour la détermination de nomenclatures divergentes. 2013.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., Wahlster, W., 2013. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- Karuna, H., Valckenaers, P., Saint-Germain, B., Verstraete, P., Zamfirescu, C.B., Brussel, H.V., 2004. Emergent Forecasting Using a Stigmergy Approach in Manufacturing Coordination and Control, in: Engineering Self-Organising Systems, Lecture Notes in Computer Science. Presented at the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 210–226. doi:10.1007/11494676_14
- Katayama, H., Bennett, D., 1999. Agility, Adaptability and Leanness: A Comparison of Concepts and a Study of Practice. Int. J. Prod. Econ. 60–61, 43–51. doi:10.1016/S0925-5273(98)00129-7
- Kidd, P.T., 1994. Agile Manufacturing: Forging New Frontiers, 1st edition. ed. Addison-Wesley, Wokingham, England ; Reading, Mass.
- Klein, T., 2008. Le kanban actif pour assurer l’intéropérabilité décisionnelle centralisé/distribué : Application à un industriel de l’ameublement. Act. Kanban Ensure Decis. Interoperability Appl. Furnit. Manuf.
- Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H., 1999. Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Ann. - Manuf. Technol. 48, 527–540. doi:10.1016/S0007-8506(07)63232-6
- Koskela, L., 1992. Application of the New Production Philosophy to Construction. Stanford University.
- Koskela, L.J., 2004. Moving on-beyond lean thinking. Lean Constr. J. 1, 24–37.
- Lanz, M., Järvenpää, E., Garcia, F., Luostarinen, P., Tuokko, R., 2012. Towards Adaptive Manufacturing Systems - Knowledge and Knowledge Management Systems. doi:10.5772/36015
- Le Moigne, J.-L., 1994. La théorie du système général: théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France-PUF.
- Lee, E., 2006. Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.-A., 2015. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manuf. Lett. 3, 18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- Leitão, P., Barbosa, J., Trentesaux, D., 2012. Bio-inspired multi-agent systems for

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- reconfigurable manufacturing systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 25, 934–944. doi:10.1016/j.engappai.2011.09.025
- Li, M., Haouzi, H.B.E., Thomas, A., Guidat, A., 2015. Fuzzy Decision-Making Method for Product Holons Encountered Emergency Breakdown in Product-Driven System: An Industrial Case, in: *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence*. Springer, Cham, pp. 243–256. doi:10.1007/978-3-319-15159-5_23
- Manceaux, A., 2015. Contribution au rééquilibrage dynamique des lignes d'assemblage : modélisation, résolutions et applications.
- Manceaux, A., Bril El-Haouzi, H., Ramdane Cherif-Khettaf, W., Bentaha, M.L., 2016. Iterated local search for dynamic line rebalancing problem, in: *8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2016*. Troyes, France.
- Mandelbrot, B.B., 1975. On the geometry of homogeneous turbulence, with stress on the fractal dimension of the iso-surfaces of scalars. *J. Fluid Mech.* 72, 401–416. doi:10.1017/S0022112075003047
- McCullen, P., Saw, R., Christopher, M., Towill, D., 2006. The F1 Supply Chain: Adapting the Car to the Circuit - the Supply Chain to the Market. *Supply Chain Forum Int. J.* 7, 14–23. doi:10.1080/16258312.2006.11517154
- McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J.L., Wong, C.Y., Ashton, K., 2003. Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Eng. Appl. Artif. Intell., Intelligent Manufacturing* 16, 365–376. doi:10.1016/S0952-1976(03)00077-0
- Mezgebe, T., Bril El Haouzi, H., Demesure, G., Thomas, A., Pannequin, R., 2017. A negotiation scenario using an agent-based modeling approach to deal with dynamic scheduling. Presented at the SOHOMA'17, Nantes.
- Morin, E., 1990. *Science avec conscience*. Paris Seuil Points-Sci.
- Morin, M., Paradis, F., Rolland, A., Wery, J., Laviolette, F., Laviolette, F., 2015. Machine learning-based metamodels for sawing simulation, in: *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*. Presented at the 2015 Winter Simulation Conference (WSC), pp. 2160–2171. doi:10.1109/WSC.2015.7408329
- Mourtzis, D., Doukas, M., Bernidaki, D., 2014. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution* 25, 213–229. doi:10.1016/j.procir.2014.10.032
- Nagel, R.N., Dove, R., 1991. *21st Century Manufacturing Enterprise Strategy: An Industry-Led View*. DIANE Publishing.
- Ng, I.C.L., Wakenshaw, S.Y.L., 2017. The Internet-of-Things: Review and research directions. *Int. J. Res. Mark.* 34, 3–21. doi:10.1016/j.ijresmar.2016.11.003
- Noyel, M., Thomas, A., Thomas, P., Castagna, P., Grabot, B., Charpentier, P., 2015. Contrôle intégré du pilotage d'atelier et de la qualité des produits : application à la société ACTA mobilier. 2015.
- O'Connor, M.J., Das, A.K., 2010. A Method for Representing and Querying Temporal Information in OWL, in: *Biomedical Engineering Systems and Technologies, Communications in Computer and Information Science*. Presented at the International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 97–110. doi:10.1007/978-3-642-18472-7_8
- Ōno, T., Mito, S., 1988. *Just-in-time for Today and Tomorrow*. Productivity Press.
- Pach, C., Bekrar, A., Zbib, N., Sallez, Y., Trentesaux, D., 2012. An effective potential field approach to FMS holonic heterarchical control. *Control Eng. Pract.* 20, 1293–1309.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

doi:10.1016/j.conengprac.2012.07.005

Pach, C., Berger, T., Bonte, T., Trentesaux, D., 2014. ORCA-FMS: a dynamic architecture for the optimized and reactive control of flexible manufacturing scheduling. *Comput. Ind.* 65, 706–720. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2014.02.005

Pannequin, R., Morel, G., Thomas, A., 2007. Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production. [Lieu de publication inconnu] : [éditeur inconnu]. 2007.

Pannequin, R., Thomas, A., 2012. Another interpretation of stigmergy for product-driven systems architecture. *J. Intell. Manuf.* 23, 2587–2599. doi:10.1007/s10845-011-0588-3

PATHFINDER, 2014.

Peruzzini, M., Gregori, F., Luzi, A., Mengarelli, M., Germani, M., 2017. A social life cycle assessment methodology for smart manufacturing: The case of study of a kitchen sink. *J. Ind. Inf. Integr., Enterprise modelling and system integration for smart manufacturing* 7, 24–32. doi:10.1016/j.jii.2017.04.001

Plossl, G.W., 1993. La nouvelle donne de la gestion de production. AFNOR, Paris-La Défense, France.

Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D., 2015. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-Pap., 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing* 48, 567–572. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.141

Sallez, Y., 2012. Produit “actif” tout au long de son cycle de vie.

Scholl, A., Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *Eur. J. Oper. Res.* 168, 666–693. doi:10.1016/j.ejor.2004.07.022

Sekine, K., 2005. *One-Piece Flow: Cell Design for Transforming the Production Process.* Taylor & Francis.

Selma, C., Bril El Haouzi, H., Thomas, P., Gaudreault, J., MORIN, mickael, 2017. AN ITERATIVE CLOSEST POINT METHOD FOR MEASURING THE LEVEL OF SIMILARITY OF 3D LOG SCANS IN WOOD INDUSTRY. Presented at the SOHOMA'17, Nantes.

Simon, H.A., 1996. *The Sciences of the Artificial.* MIT Press.

Talibi, Z., Haouzi, H.B.E., Thomas, A., 2013. The relevance study of adaptive kanban in a multicriteria constraints context using data-driven simulation method, in: *Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM).* Presented at the Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), pp. 1–7.

Tharumarajah, A., 1996. Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing system concepts. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 9, 217–226. doi:10.1080/095119296131670

Thomas, A., Guidat, C., Courtois, A., Greif, M., Martin, P., 1993. La connaissance du vécu en atelier de production : pour initier, renforcer ou pérenniser la démarche de progrès permanent. [Lieu de publication inconnu] : [éditeur inconnu]. 1993.

Toni, A.D., Tonchia, S., 1998. Manufacturing flexibility: A literature review. *Int. J. Prod. Res.* 36, 1587–1617. doi:10.1080/002075498193183

Trentesaux, D., 2002. *Pilotage hétérarchique des systèmes de production (thesis).* Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.

Trentesaux, D., Millot, P., 2016. A Human-Centred Design to Break the Myth of the “Magic Human” in Intelligent Manufacturing Systems, in: *Service Orientation in Holonic and Multi-*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agent Manufacturing, *Studies in Computational Intelligence*. Springer, Cham, pp. 103–113. doi:10.1007/978-3-319-30337-6_10

Tursi, A., Panetto, H., Morel, G., Dassisti, M., others, 2007. Ontology-based products information interoperability in networked manufacturing enterprises.

Ueda, K., 1992. A Concept for Bionic Manufacturing Systems Based on DNA-type Information, in: *Proceedings of the IFIP TC5 / WG5.3 Eight International PROLAMAT Conference on Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, pp. 853–863.

Valckenaers, P., 2001. Editorial of the Special Issue on Holonic Manufacturing Systems. *Comput. Ind., HOLONIC MANUFACTURING SYSTEMS* 46, 233–234. doi:10.1016/S0166-3615(01)00131-2

Valckenaers, P., Saint Germain, B., Verstraete, P., Van Brussel, H., others, 2006. Emergent short-term forecasting through ant colony engineering in coordination and control systems. *Adv. Eng. Inform.* 20, 261–278.

Valckenaers, P., Van Brussel, H., 2016. Chapter Six - The ARTI Reference Architecture – PROSA Revisited, in: *Design for the Unexpected*. Butterworth-Heinemann, pp. 77–127. doi:10.1016/B978-0-12-803662-4.00006-0

Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bonneville, F., Bongaerts, L., Wyns, J., 1994. IMS test case 5: holonic manufacturing systems. *IFAC Proc. Vol.* 27, 31–36.

Véjar, A., Charpentier, P., 2012. Generation of an adaptive simulation driven by product trajectories. *J. Intell. Manuf.* 23, 2667–2679. doi:10.1007/s10845-011-0504-x

Wenzel, S., Jessen, U., Bernhard, J., 2005. Classifications and conventions structure the handling of models within the Digital Factory. *Comput. Ind.* 56, 334–346.

Wery, J., Marier, P., Gaudreault, J., Thomas, A., 2014. Decision-making framework for tactical planning taking into account market opportunities (new products and new suppliers) in a co-production context. Presented at the 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14.

Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D., Zühlke, D., 2016. Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. *IFAC-Pap., 12th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 2016* 49, 97–102. doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.168

Wiendahl, H.P., ElMaraghy, H., Nyhuis, P., Zäh, M., Wiendahl, H.H., Duffie, N., Brieke, M., 2007. Changeable manufacturing-classification, design and operation. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 56, 783–809.

Wiendahl, H.-P., Lutz, S., 2002. Production in networks. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 51, 573–586.

Womack, J.P., Jones, D.T., 2003. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, Revised and Updated, 2nd edition. ed. Productivity Press, New York.

Yoshikawa, H., 1995. Manufacturing and the 21st Century -- Intelligent Manufacturing Systems and the Renaissance of the Manufacturing Industry. *Technol. Forecast. Soc. Change* 2, 195–213.

Zamfirescu, C.-B., Pirvu, B.-C., Gorecky, D., Chakravarthy, H., 2014. Human-centred Assembly: A Case Study for an Anthropocentric Cyber-physical System. *Procedia Technol., 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering* 15, 90–98. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.038

Zimmermann, E., Bril El Haouzi, H., Thomas, P., Pannequin, R., Noyel, M., Thomas, A., 2017a. A Case Study of an Intelligent Manufacturing Control Based on Multi-Agents' System

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

to Deal with Batching and Sequencing on Rework Context. Presented at the SOHOMA'17, Nantes.

Zimmermann, E., Bril El Haouzi, H., Thomas, P., Thomas, A., Noyel, M., 2017b. A hybrid manufacturing control based on smart lots in a disrupted industrial context, in: 20th IFAC World Congress, IFAC 2017. Toulouse, France.

Zimmermann, E., Haouzi, H., Thomas, P., Thomas, A., Noyel, M., 2017c. A batching and scheduling optimisation for a cutting work-center: Acta-Mobilier case study. SciRate.

Zimmermann, E., Noyel, M., Thomas, P., Bril, H., Thomas, A., 2016. K-means clustering based method for production flow management facing rework disturbances, in: International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS'16. Bordeaux, France.