



HAL
open science

Contribution à la dynamique d'une situation-système contrôlée par le produit circulant

Frédérique Mayer

► **To cite this version:**

Frédérique Mayer. Contribution à la dynamique d'une situation-système contrôlée par le produit circulant. 2023. hal-03921451

HAL Id: hal-03921451

<https://hal.science/hal-03921451v1>

Preprint submitted on 3 Jan 2023

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.

Document de travail

Frédérique Mayer

Maître de conférences hors classe – 61^{ème} section

Contribution à la dynamique d'une situation-système contrôlée par le produit circulant.

Document de travail

TABLE DES MATIÈRES

Prologue	1
Chapitre I : Activités scientifiques de recherche et d'enseignement.....	4
I.1. Introduction	4
I.2. Activités de recherche	4
I.2.1. Modélisation-système	4
I.2.1.1. Contexte	4
I.2.1.2. Processus de modélisation-système	6
I.2.1.3. Scénario AISIP	7
I.2.1.4. Application à la construction de tutoriels de formation.....	9
I.2.1.5. Mathématisation du mécanisme d'émergence.....	10
I.2.1.6. Synthèse.....	12
I.2.2. Encadrement doctoral	13
I.2.2.1. Modélisation centrée produit d'un système de systèmes d'entreprises	13
I.2.2.2. Modélisation centrée produit d'un système-projet d'innovation technologique	16
I.2.2.3. Modélisation centrée produit d'un système-projet d'innovation de services	19
I.2.2.4. Co-spécification système de modèles multidisciplinaires exécutables	20
I.2.2.5. Spécification d'un modèle de connaissance de situations-systèmes opérationnelles	23
I.2.3. Encadrement de recherche	26
I.2.4. Conclusion	27
I.3. Activités d'enseignement.....	27
I.3.1. Création et responsabilité de formations diplômantes	27
I.3.1.1. DHET GSI et section spéciale GSI.....	27
I.3.1.2. DESS MPIIS	28
I.3.1.3. Spécialité MDI puis MIDI et RICHI du master DG.....	28
I.3.2. Enseignements en cycle L-M.....	29
I.3.2.1. Nature des enseignements.....	29
I.3.2.2. Outils-méthodes de formation	32
I.3.2.3. Collaborations de formation	33
I.3.3. Enseignement en cycle D.....	34
I.3.4. Conclusion	36
Chapitre II : Projet scientifique de recherche et d'enseignement	37

II.1. Introduction.....	37
II.2. Fondement scientifique du projet de recherche.....	38
II.2.1. Préambule.....	38
II.2.2. Corpus scientifique.....	43
II.2.2.1. Relation de modélisation d'une situation-système.....	43
II.2.2.2. Cohérence-énergétique (togetherness) d'une situation-système.....	48
II.2.2.3. Intégrité interdisciplinaire d'une orchestration-système multidisciplinaire.....	56
II.2.2.3.1. Éléments de perception-action intégrative d'une situation-système.....	56
II.2.2.3.2. Éléments d'orchestration multidisciplinaire.....	58
II.2.2.3.3. Éléments d'orchestration interdisciplinaire.....	59
II.2.2.4. Synthèse de penser pour agir « situation-système ».....	64
II.2.3. Cas de recherche.....	65
II.2.3.1. Dynamique d'une situation-système d'un réseau d'entreprises manufacturières.....	65
II.2.3.2. Dynamique d'une situation-système de confort au travail.....	67
II.2.3.2.1. Situation-système existante de confort.....	67
II.2.3.2.2. Situation-système projetée de confort.....	70
II.2.3.2.3. Perspectives d'architecture système évolutive.....	72
II.2.3.3. Dynamique d'une situation-système d'un réseau électrique.....	73
II.2.3.3.1. Situation-système existante.....	74
II.2.3.3.2. Situation-système projetée.....	76
II.2.3.3.3. Éléments de modélisation-système.....	77
II.2.3.3.4. Preuve de concept visée.....	79
II.3. Perspectives scientifiques du projet de recherche.....	81
II.3.1. Opportunités de R&D.....	81
II.3.1.1. Acceptabilité physico-logique du MBSE.....	81
II.3.1.2. Conception collaborative par la matière-énergie circulante.....	82
II.3.2. Perspectives de R&D.....	84
II.3.2.1. Patron formelle de contrôlabilité par le produit circulant.....	84
II.3.2.2. Perspective de contrôlabilité par la matière-énergie circulante.....	85
II.4. Perspectives pédagogiques du projet de recherche.....	88
II.4.1. Formation à l'orchestration interdisciplinaire dirigée par une situation-système multidisciplinaire ciblée.....	88

II.4.2. Formation à l'orchestration interdisciplinaire guidée par des situations-système multi- domaines	89
Épilogue.....	91
Références bibliographiques	92

Document de travail

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Concept de situation-système de mon projet de recherche et d'enseignement	3
Figure 2: Élément technologique en tant que pivot d'intégration-système entre réalité opérationnelle et réalité d'ingénierie	6
Figure 3: Représentation de l'émergence système par le mécanisme d'objectivation	7
Figure 4 : patron de modélisation-système	7
Figure 5: Construction d'un scénario AISIP.....	8
Figure 6: Tutoriel de formation CMMS-IAMS	9
Figure 7 : Atelier OPALE studio	10
Figure 8: Formalisation du mécanisme de substantivation en théorie des catégories	11
Figure 9: Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un Système d'Information en entreprise centré sur le produit (Auzelle 2009).....	14
Figure 10 : Contribution à l'Ingénierie de l'Innovation : Proposition d'un cadre de modélisation pour un système d'innovation centré sur le produit (Castro 2010)	17
Figure 11: Processus de pilotage de projets d'innovation (le Bezvoët M et al, 2010).....	20
Figure 12: Co-spécification système exécutable basée sur des modèles : application à la conduite interactive d'un procédé industriel critique (Bouffaron, 16)	21
Figure 13: Génération des scénarios concrets jusqu'à atteinte du critère d'arrêt (Koné 2020)	24
Figure 14: projection des questions scientifique du projet de recherche et d'enseignement sur le méta-modèle originel d'intégrité-système.....	38
Figure 15 : Interprétation de l'intégrité d'une spécification-système	40
Figure 16: Frontières d'un processus de spécification d'une situation-système (Mayer 2018).....	40
Figure 17: Interprétation des frontières de couplage pour Penser et agir système en ingénierie système	44
Figure 18: Interprétation des frontières de la relation d'encodage/décodage d'un système naturel de (Louie 2009).....	47
Figure 19 : intégrité d'une situation-système à état logique discret	49
Figure 20 : intégrité d'une situation-système à état d'énergie discret	50
Figure 21 : cohérence-énergétique d'une situation-système axée sur la matière-énergie circulante.	50
Figure 22 : Interprétation du paradigme CMMS-IAMS pour un contrôle par la matière-énergie circulante.....	51

Figure 23 : Exploration de la relation de modélisation d'une situation-système axé sur la matière-énergie circulante	53
Figure 24 : Patron de modélisation de la dynamique d'une situation-système axé sur la matière-énergie circulante	56
Figure 25: Ancrage physico-physiologique d'une boucle de conduite sur une situation-système	58
Figure 26: Orchestration interdisciplinaire de la dynamique d'une situation-système.....	63
Figure 27: SoS business-to-consumption situation-systems togetherness issues	66
Figure 28 : dynamique de la situation-système existante de confort	69
Figure 29 : dynamique de la situation-système projetée de confort	71
Figure 30 : Orchestration interdisciplinaire de modélisation multidisciplinaire de la dynamique d'une situation-système axé sur l'oxygène circulant	73
Figure 31: dynamique de la situation-système existante du réseau électrique	75
Figure 32 : dynamique de la situation-système projetée.....	77
Figure 33 : Cadre théorique de modélisation basée sur la cyberneconduction	78
Figure 34 : contrôlabilité d'un réseau électrique examiné comme un $\{S_{\Omega} \wedge S_{\eta}\}$	81
Figure 35 : Cadre méthodologique d'acceptabilité du MBSE (Kosak et al. 2022)	82
Figure 36 : Orchestration interdisciplinaire de modélisation multidisciplinaire de la dynamique d'une situation-système de co-conception axé sur le produit circulant	84
Figure 37 : Différentiation formelle wholeness/togetherness dans le cadre du paradigme de contrôle par le produit	85
Figure 38 : Contrôlabilité d'un $\{S_{\Omega} \text{d} S_{\Omega}\}$ guidée par la cyberneconduction	87
Figure 39 : illustration d'une représentation non formelle d'une situation-système à formaliser	90

PROLOGUE

« Système », « Situation-Système », « Intégrité-Système » : ces trois concepts jalonnent mon parcours d'enseignant-chercheur en ingénierie de systèmes multidisciplinaires.

- « Système et Système de Systèmes technologiques » incarnent dans un premier temps l'intégration de l'outillage multidisciplinaire de « Modélisation-Système » autour d'un référentiel d'informations commun reflétant une « Intégrité-système » à construire pour satisfaire une solution-système visant une certaine « réalité opérationnelle ».
- « Situation-Système » incarne dans un deuxième temps la congruence de cette « réalité construite » avec la « Dynamique-Système » d'un ensemble de situations visant une « réalité opérationnelle » satisfaisant des facteurs technologiques et humains, voire naturels, requis.
- « Intégrité-système » incarne dans un troisième temps ce qui fait la « Cohérence-Énergétique » (togetherness) d'une « intégrité-système » construite (wholeness) par essence multidisciplinaire, mais qui doit résulter d'une « Orchestration Interdisciplinaire » pour cibler une « réalité opérationnelle ».

A l'instar de (Allegro et al. 2014) qui souligne la difficulté de traduire de l'anglais au français la sémantique d'un concept, mon propos est de bien distinguer en termes d'intégrité-système la « *togetherness* » de la « *wholeness* », respectivement dans la *réalité expérientielle* (opérationnelle, expérimentale, ...) et dans la *réalité construite* (imaginale, formelle, ...). Le parti-pris d'ancrage tangible par la physique (énergie) entre ces deux réalités n'est bien entendu pas le seul possible, ce qui m'amène à traduire par « *harmony* » la « *togetherness* » d'un ensemble d'actifs d'un système-projet en regard de leur potentiel individuel d'inférence pour bien mettre en évidence le chaînon de congruence nécessaire entre cohérence du processus (engineering system) et du résultat (engineered system).

En alignement avec (Krob 2009, 2014), deux piliers de modélisation système jalonnent ce parcours:

- « *Émergence-système ... maîtriser la complexité d'un système, c'est fondamentalement être capable de maîtriser son processus d'intégration, autrement dit de sa construction par interconnexion et/ou mise en réseau de systèmes de plus petite taille. Ce processus reste sans doute encore largement incompris dans la mesure où il génère le phénomène mystérieux qu'est*

l'émergence : un système intégré aura en effet toujours des propriétés nouvelles – dites « émergentes » – qui ne peuvent pas facilement s'obtenir ou s'exprimer avec ses briques de base ... »

- *« Architecture-système ... Nous sommes donc là en plein dans l'art de l'architecte et de la modélisation qui consiste à faire un pont entre le réel et le formel : classer un élément d'architecture dans l'une des trois visions, opérationnelle, fonctionnelle et organique, est donc fondamentalement un acte de modélisation en ce sens-là (et donc de caractère non formel) ... »*

Ma quête en recherche et enseignement au cours de ces années et au long de ce mémoire qui en rend compte aura été et est de faire émerger des liens architecturaux tangibles de la réalité expérientielle afin d'orchestrer l'acte de modélisation-système d'une réalité construite pour cibler, via le concept de situation-système, une congruence formelle entre deux frontières (Figure 1) :

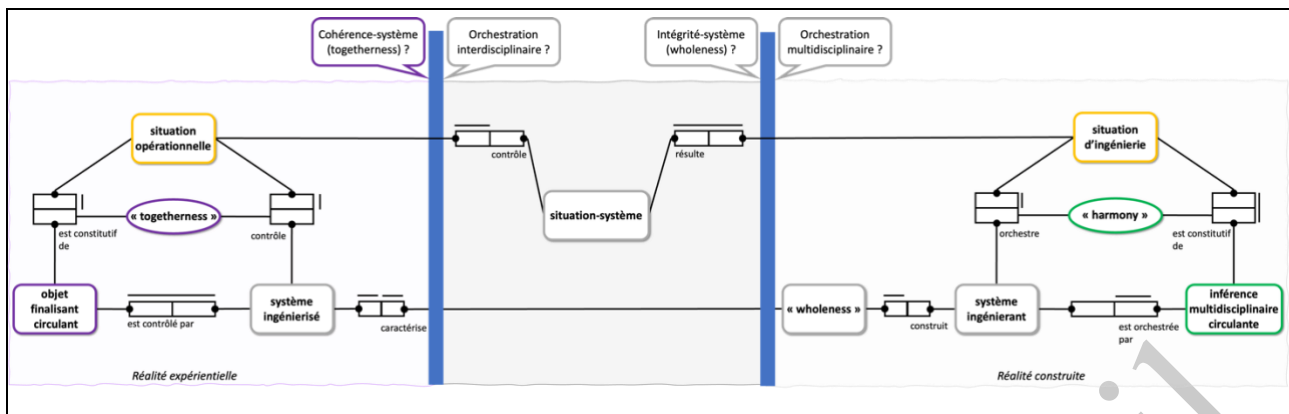
- l'une centrée sur la frontière d'orchestration multidisciplinaire d'une intégrité-système (wholeness) requise par un environnement, que je présente plutôt dans mes activités scientifiques de recherche et d'enseignement dans un premier temps,

- l'autre centrée sur la frontière d'orchestration interdisciplinaire d'une cohérence-système (togetherness) en réponse à la dynamique d'un environnement, que je présente dans mon projet de recherche.

Au cours du temps, se sont combinés :

- Le paradigme de « contrôle par le produit », en productique puis dans le domaine de l'énergie pour tenir compte de la rétroaction que fait un objet circulant (discret ou matière-énergie) sur le contrôle d'un système et en conséquence de son intégrité ainsi que de la situation-système résultante,
- L'évidence de « l'humain dans la boucle système », résultant aussi bien de mon implication dans le domaine de contrôle de systèmes physico-logico-physiologiques ainsi que, de façon plus générale, de mon implication dans la présidence du comité technique « social impact of automation » de l'International Federation of Automatic Control (IFAC).

Cette réflexion scientifique s'est construite de façon individualisée tout en m'appuyant sur des collaborations pertinentes, en continu malgré mes activités multiples d'enseignement et de recherche jalonnant mon parcours lors d'opportunités de projets, de doctorats, etc.



Ce modèle relationnel binaire verbalise les faits de mon univers de discours dans la logique de prédicat de 1^o ordre de la méthode NIAM¹. La simplicité de la notation oblige à caractériser chaque fait par les deux rôles d'une relation binaire (double rectangles) entre deux éléments d'intérêt (rectangles en couleur) et leurs propriétés avec deux symboles de totalité (ronds noirs) et d'unicité (traits noirs) (Habrias 2008). D'autres prédicats (ovales en couleur) contraignent les relations entre faits. Une traduction automatisée de la verbalisation du modèle en langage ORM² (Halpin 1995) permet de vérifier la cohérence formelle avec l'univers du discours informel et d'en fournir une spécification intelligible en langage naturel binaire (LNB). Pour illustration (entre crochets, les éléments des faits) :

Un {objet finalisant circulant} est constitutif d'un ensemble de {situations} qu'un {système ingénierisé} doit contrôler.

L' {intégrité (wholeness)} de ce système résulte d'un {système ingénierant} orchestrant un ensemble d' {inférences multidisciplinaires} dans la réalité construite.

Cette intégrité-système construite n'est pas suffisante pour faire face à la dynamique de situations non prescrites révélées par une défaillance systémique dans la réalité expérimentielle.

Une contrainte de {cohérence-système (togetherness)} est nécessaire entre l'ensemble des éléments ingénierisés en système et l'ensemble des situations à contrôler en système (situation-système).

La congruence entre ces deux réalités résulte d'une {harmonie} interdisciplinaire modulo la {situation-système}.

Figure 1 : Concept de situation-système de mon projet de recherche et d'enseignement

¹ Nijssens information analysis model (Nijssen and Halpin 1989) / Natural Information Analysis Method (Habrias 1988)

² Object Role Modeling

CHAPITRE I :

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT

I.1. INTRODUCTION

Mes activités de recherche et d'enseignement se sont d'abord déroulées de 1990 à 1998 dans le cadre de mes fonctions de boursière MESNR et de contractuelle ATER, IE, IR et MAST à l'université Henri Poincaré ainsi qu'en entreprise (cadre de la société EURILOR-MULTIMEDIA).

En 1998, je suis devenue Maître de Conférences affecté à l'École Nationale Supérieure en Génie des Systèmes et Innovation (ENSGSI) et à l'Équipe de Recherche sur les Processus Innovatifs (ERPI EA n° 3767) à l'issue de mon recrutement par l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), partie prenante ensuite dans la création de l'Université de Lorraine en 2012.

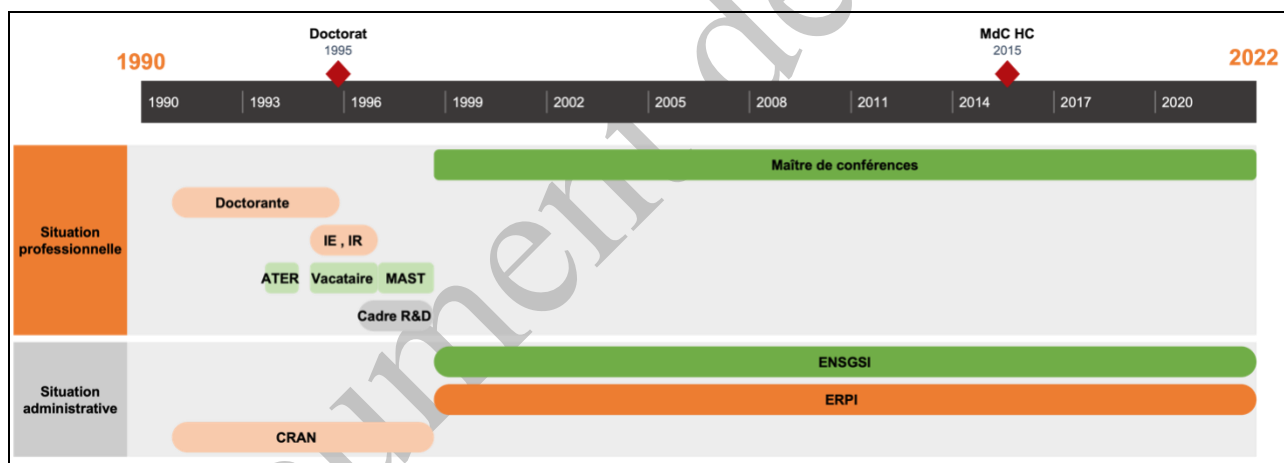


Schéma ligne de vie de ma carrière

I.2. ACTIVITÉS DE RECHERCHE

I.2.1. Modélisation-système

I.2.1.1. Contexte

Au moment de ma thèse (Mayer 1995), le concept Automatisation et Ingénierie de Systèmes Intégrés de Production (AISIP) (Morel 1992) » visait à architecturer en système l'intégration des différentes ingénieries et technologies multidisciplinaires de fabrication automatisée de pièces

mécaniques. Cette intégration technologique dans la réalité opérationnelle avait pour pendant dans la réalité d'ingénierie³ l'intégration d'un ensemble d'outils-méthodes en système d'information autour d'un référentiel commun de données dans la mouvance du projet national Base-PTA (Frachet 1987) ayant pour objectif de fonder le génie automatique (Lhoste 1994), c'est à dire « l'automatisation de l'automatisation ». Le modèle conceptuel de données en formalisme entité/relation résultant reflétait une prestation d'automatisation à l'échelle industrielle.

A notre échelle académique à l'« Atelier Inter établissement de Productique Lorrain⁴ (AIPL) », l'atelier MEGA⁵ (Merise/Gamma) permettait, au sens du Systémographe de (Le Moigne 1977), une projection polymorphique de modèles conceptuels, organisationnels et physiques à partir de méta-modèles génériques pour établir une correspondance homomorphique avec le système ciblé dans la réalité opérationnelle. Un hall central émulait de façon plausible un site de production, entouré d'un centre d'ingénierie multidisciplinaire orchestré au fil du temps par des préceptes d'« Ingénierie-Système » (Figure 2 à gauche). L'enseignement de ce nouveau concept organisationnel en productique impliquant d'acquérir différents savoirs et savoir-faire méthodologiques et techniques, leur seul apprentissage « catalogue » ne pouvait être considéré comme constitutif d'une formation, et encore moins d'une éducation (Laborit 1987), à la modélisation de systèmes intégrés de production. Le caractère excessivement compliqué de cet enseignement a justifié, dans mes travaux de doctorat, de mettre en œuvre une ingénierie pédagogique « AISIP » à l'AIPL.

J'ai alors postulé qu'elle impliquait un savoir-faire de modélisation centrée système me conduisant, dans un premier temps, à en formaliser le processus en vue de sa mise en œuvre pour construire, dans un deuxième temps, un scénario d'apprentissage « AISIP » (Figure 2 à droite), comme recommandé par (Olling et al. 1991) pour supporter une formation spécifique au CIME⁶. Ce scénario pédagogique considéré complexe (D'irribarne 1994) avait pour objectif un principe de la « logification système » des savoirs et savoir-faire pédagogique en génie productique et génies connexes (Morel et al. 1988) par un flux de d'objets-produits de référence pour construire un système intégré de production à partir d'une combinaison de relations d'interopération entre des moyens technologiques autonomes (d'un point de vue de leurs capacités opératoires).

³ Distinction de la communauté d'ingénierie-système entre le système ingénierant (engineering system) et le système ingénieré (engineered system) résultant, ce dernier « le système à faire » étant le prérequis pour l'existence du second « le système pour faire » (Meinadier 2009).

⁴ <https://aip-primeca.univ-lorraine.fr/>

⁵ A l'origine, MEGA est un outillage pragmatique de la méthode Merise. Ses déclinaisons au fil du temps se sont avérées pertinentes pour la modélisation d'entreprise en général. Plus récemment, la version HOPEX offre une déclinaison pour l'ingénierie système.

⁶ Computer Integrated Manufacturing and Engineering

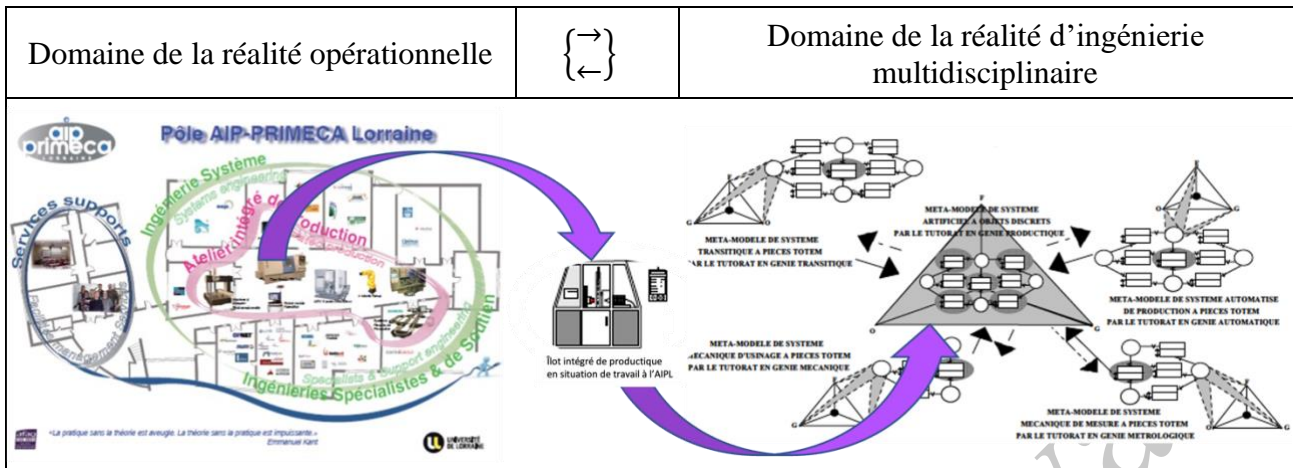


Figure 2: Élément technologique en tant que pivot d'intégration-système entre réalité opérationnelle et réalité d'ingénierie

I.2.1.2. Processus de modélisation-système

J'ai basé le principe de « logification système » sur le mécanisme d'émergence qui est désigné comme celui dominant de construction d'un système (Cariani 1992) dans les sciences des systèmes. Il m'a fallu d'abord « logifier » les éléments essentiels du discours informel de la systémique⁷ sous forme de lemmes en formalisme NIAM/ORM pour guider la modélisation relationnelle binaire d'un système. Dans la mesure où le formalisme entité/relation ou classe-association n'est pas suffisamment robuste pour représenter un modèle relationnel binaire⁸, j'ai choisi d'utiliser ce formalisme ensembliste de logique à prédicat de 1er ordre pour vérifier et valider en langage naturel binaire (LNB) la congruence de la logification système ciblée. De plus, ce formalisme permet formellement de représenter le mécanisme d'émergence par celui d'objectivation, exprimant que d'une relation binaire entre deux objets est généré un nouvel objet pouvant être lui-même source ou puits d'une nouvelle relation (Figure 3). Au cours du temps, j'en ai fait ma logique de spécification d'exigences bien formées (sujet-verbe-complément-prédicat) aussi bien en recherche qu'en enseignement d'ingénierie-système.

⁷ À partir de (Wiener 1948; Ashby 1958; Forrester 1968; de Rosnay 1975; Morin 1977, 1980; Le Moigne 1977; Coquet 1989; Naslin 1991; Le Gallou and Bouchon-Meunier 1992; Andler 1992)

⁸ Sauf à faire un patron dédié, par exemple dans le formalisme de diagramme de blocs de SysML.

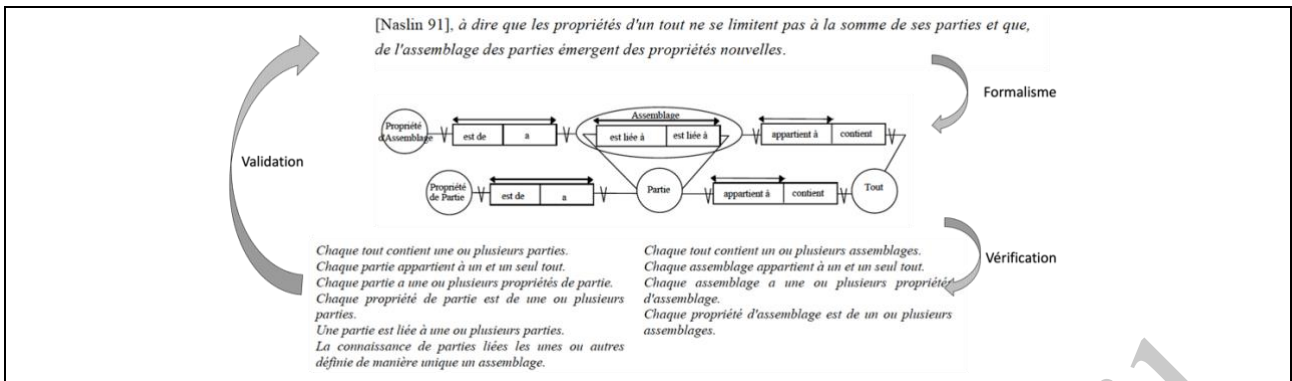


Figure 3: Représentation de l'émergence système par le mécanisme d'objectivation

Le patron de modélisation-système résultant est un atome (Figure 4, à gauche), plus petit objet insécable de représentation de la contrôlabilité et de l'observabilité d'un système mettant en évidence des opérateurs de nature (Le Gallou 1993) transmutant respectivement un flux de données (de contrôle) en un effet d'actionnement physique sur un état discret d'un objet-produit de référence et un effet de mesure physique de celui-ci en un flux de données (d'observation) pour fermer en équilibre la boucle de contrôle d'un système manufacturier. Une molécule (Figure 4, à droite) est la représentation de la dynamique de l'écoulement de ce produit à travers un ensemble d'atomes organisés selon la logique systémique Temps-Espace-Forme-Espace-Temps (Le Moigne 1977) et interagissant entre eux par des échanges informationnels ou à travers des niveaux supérieurs de décision selon la logique systémique de Nature.

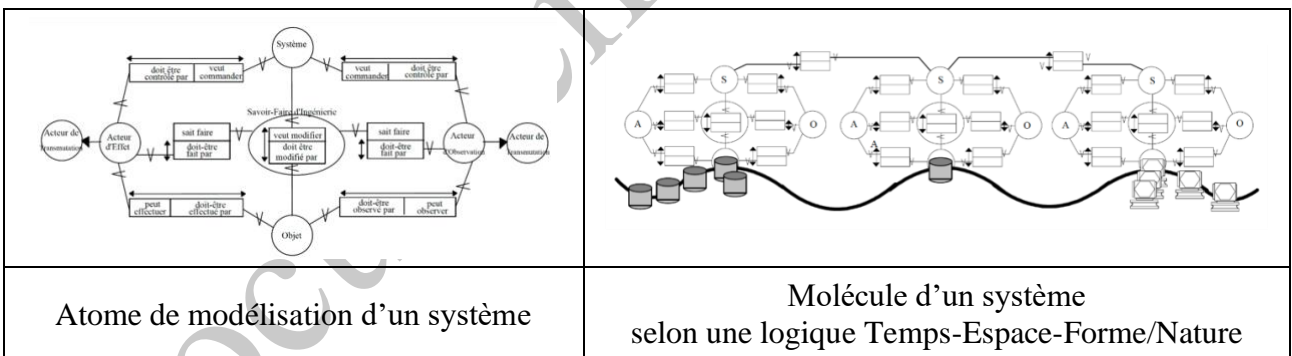


Figure 4 : patron de modélisation-système

I.2.1.3. Scénario AISIP

Le résultat de l'application de ce processus au scénario « AISIP » était un modèle en abstraction d'un système intégré de production en général (Figure 2 à droite) pour « systémographeier « { } » (Figure 2 au milieu) en concrétisation un système d'étude en situation de production à l'AIPL (Figure

1 à gauche). Le patron de modélisation-système permettait de guider de façon faisable⁹ l'émergence progressive des savoirs et savoir-faire au moment de l'objectivation de chacune des interopérations entre les éléments du système intégré de production à faire, à partir de l'objectivation d'une première interopération désignée comme essentielle car reposant sur le flux de produits constitutif de la relation finalisante entre le système et son environnement requérant.

La construction de scénarii AISIP à partir du modèle résultant requérait toutefois de rendre compte de la dynamique de la « logification TOUT-PARTIE » entre la dimension transverse de connaissance-système et la dimension en plan de connaissances-disciplinaires. Au moment de mes travaux de doctorat, la technologie hypertexte s'est avérée suffisamment mature pour transposer le contenu de ce modèle sous forme de rubriques et liens hypertextes (Figure 3 à gauche). La navigation dans cette structure hypertexte résultante permettait aux formateurs et aux apprenants d'être guidés par « émergence » entre savoirs et savoir-faire centrés systèmes et ceux centrés constituants technologiques (Figure 5 à droite).

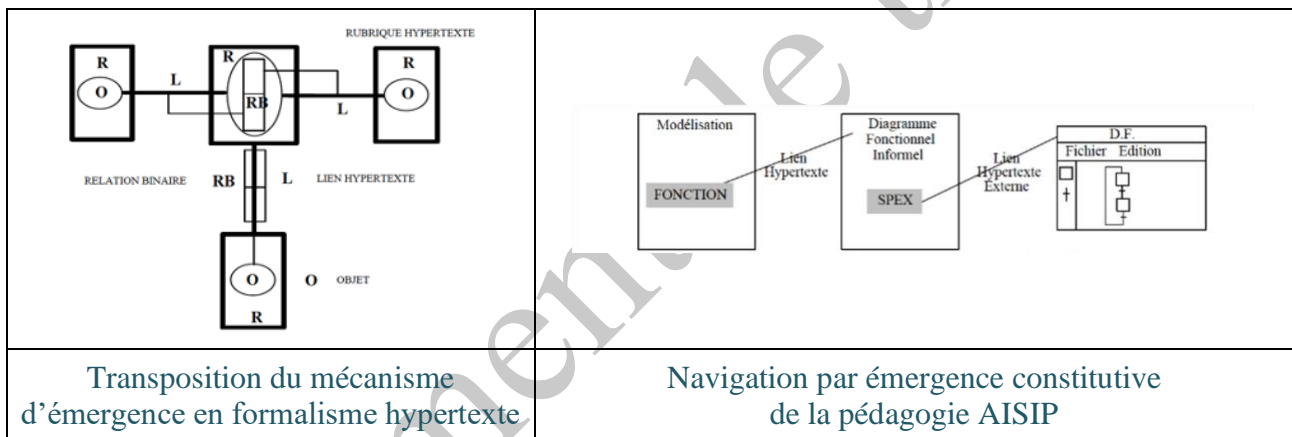


Figure 5: Construction d'un scénario AISIP

En appliquant ce processus à la construction du scénario pédagogique « AISIP », j'ai alors entrepris d'en valider la pertinence par sa mise en œuvre dans la cadre de formations de niveau 5 pour former les étudiants à l'intégration-système à l'issue de leur cursus multidisciplinaire. Au cours du temps, j'ai me suis astreinte à introduire au plus tôt ces préceptes systèmes pour éviter leurs découvertes tardives par les étudiants. Il en est de même dans d'autres situations d'apprentissage dont j'illustre ci-dessous la construction de scénarios.

⁹ A la différence de travaux en conception distribuée qui visaient d'explorer l'espace de créativité de tous les possibles avant de filtrer les viables (Garro 1997).

I.2.1.4. Application à la construction de tutoriels de formation

Une première application à l'échelle industrielle dans le cadre de mes activités de R&D en tant qu'IE/IR avec le CRAN a été faite dans le cadre du projet européen DEFITRA (Development of Fieldbus Training) dont l'objectif était de disséminer, par la formation, les résultats d'un programme de R&D dans le domaine de la production d'énergie visant à distribuer au plus près du procédé une forme d' « intelligence technique » autour d'un bus de terrain. Il s'agissait de répondre aux besoins de formation en Systèmes Intégrés de Contrôle, Maintenance et Gestion Technique basés sur des composants d'actionnement et de mesure intelligents¹⁰.

L'application du processus de modélisation-système (Figure 6 à gauche, a) à la modélisation de ces systèmes particuliers (Pétin 1995) a permis de construire progressivement le scénario pédagogique « CMMS-IAMS » (Figure 6 à gauche, b) généré sous forme d'un tutoriel de formation (Figure 6 à droite) guidant par des liens hypertextes formateurs et apprenants.

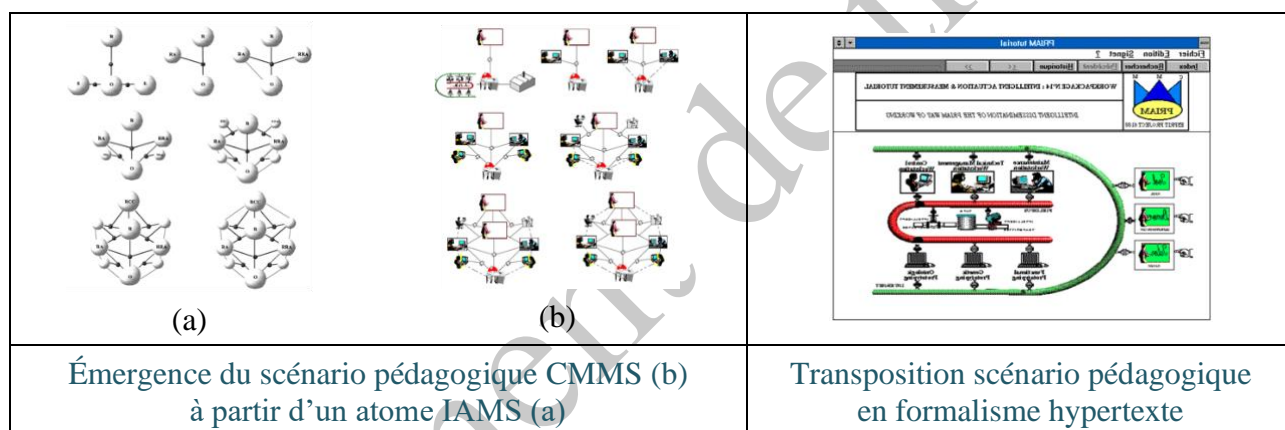


Figure 6: Tutoriel de formation CMMS-IAMS

Appliqué ensuite dans le cadre de mes activités de R&D de MAST avec l'entreprise Eurilor-Multimédia, le processus de construction de scénarios pédagogiques était au cœur du développement d'un outil logiciel permettant la définition, l'utilisation et la spécialisation d'ontologies pédagogiques (Figure 7 à gauche) pour la génération de parcours de formation individualisés par compétences (Figure 7 à droite). La particularité de cet outil logiciel était d'utiliser les technologies multimédia naissantes pour virtualiser une situation de travail pertinente vis à vis d'un parcours de formation à partir de laquelle s'organisaient les ontologies de formation. Ce facilitateur de la construction-

¹⁰ CMMS-IAMS : Control, Maintenance and technical Management System based on distributed Intelligent Actuation and Measurement Systems. ESPRIT II-2172 DIAS "Distributed Intelligent Actuators and Sensors"; ESPRIT III-6188 PRIAM "Pre-normative Requirements for Intelligent Actuation and Measurement"; ESPRIT III-6244 EIAMUG "European Intelligent Actuation and Measurement User Group"; ESPRIT IV-23525 IAM-PILOT "Intelligent Actuation and Measurement Pilot".

système d'environnements de formation a été le résultat d'un projet ANVAR en collaboration avec des équipes en sciences de l'éducation et en psychologie interactionniste de l'université de Nancy 2 pour la spécification d'exigences psychotechnique et pédagogique de mise en situation (Grégori et al. 1998). Le produit résultant de ce projet a été commercialisé par la suite sous le nom de l'atelier OPALE studio (Outil pédagogique d'assistance à l'enseignement à distance) permettant à des formateurs de bénéficier des technologies multimédia pour la pédagogie (Gouyon and Panetto 2007).

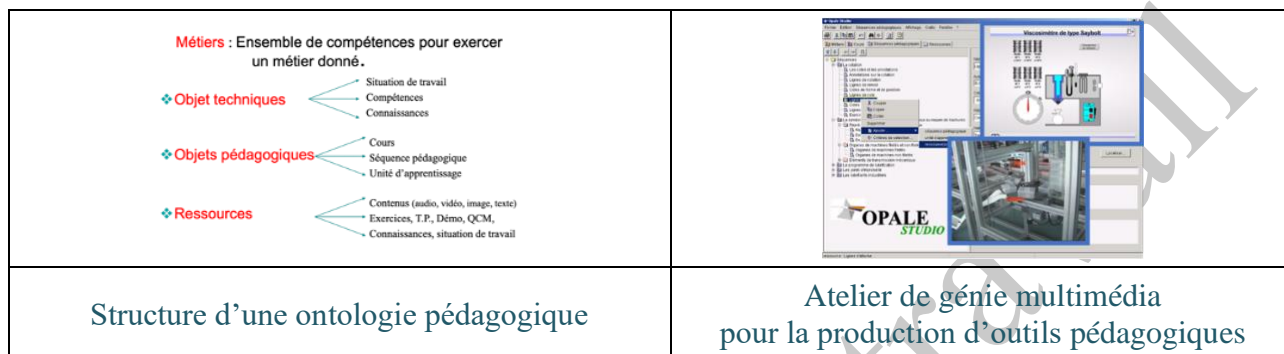


Figure 7 : Atelier OPALE studio

I.2.1.5. Mathématisation du mécanisme d'émergence

Cependant, j'avais acquis la conviction que l'émergence telle que rapportée dans le corpus scientifique de la systémique ne suffisait pas à donner de la cohérence aux relations d'interopération au sein d'un système, bien qu'il lui en doive ses propriétés (Ducrocq 1960). Le mécanisme d'objectivation de NIAM/ORM conférant à son résultat une propriété de filiation obtenue par concaténation, basée sur la notion de produit cartésien, des propriétés des objets source et puits d'une relation d'interopération, ne permet pas non plus la construction de propriétés propres à ce nouvel objet ni la préservation des propriétés de la relation d'interopération d'origine. Je me suis donc interrogée sur la complétude de ce mécanisme de modélisation centrée système pour assurer la cohérence de ces relations d'interopération en regard du système qui en émerge. J'ai alors exploré la théorie mathématique des catégories (TC) afin de vérifier de manière plus fondamentale ce mécanisme d'objectivisation et en conséquence de celui d'émergence.

Introduite par les mathématiciens Eilenberg et Mac Lane en 1942, son intérêt a été souligné, entre autres, par (Grothendieck 1957; Malgoire 2016) pour définir et construire des théories plus générales à un domaine, par (Rosen 1958) pour la modélisation de systèmes complexes dans le domaine de la biologie et par (Ehresmann and Vanbreemsch 1997) pour une formalisation de l'émergence des systèmes évolutifs dans le domaine des systèmes neuronaux humains. Les travaux de (Lavigne 2000; Mayer and Lavigne 2001; Mayer et al. 2003) que j'ai encadrés ont été une première approche d'application de cette théorie (Figure 8). Ils en ont montré la pertinence pour répondre aux limites du

mécanisme d'objectivation de NIAM-ORM, par l'utilisation de la notion de catégorie représentant des objets sources et des objets puits d'une relation d'interopération, de la notion de foncteur comme un morphisme entre ces objets préservant à travers la relation leurs propriétés ainsi que de la notion de limite inductive pour rendre cohérente une intégration-système résultante par émergence de la relation d'interopération concernée. Le résultat de ces travaux concernait l'utilisation de cette notion de limite inductive comme un outil de formalisation d'un objet mathématique que j'ai appelé « wholeness »¹¹, au sens d'une intégrité-système¹², caractérisée par une propriété de connectivité résultante des actions collectives affichées par la relation d'interopération. Une preuve in silico de cette propriété de connectivité a été initiée par exécution avec le langage de programmation fonctionnel SML¹³ (Standard Meta Language) du modèle résultant de la translation en TC de la logique de 1^o ordre du mécanisme d'objectivation. L'approfondissement de cette vérification formelle ainsi que la validation in situ d'émergence de propriétés non spécifiées a priori faisaient partie des objectifs de doctorat que Jean-Pierre Lavigne n'a pu poursuivre pour raisons personnelles sans que le contact sur le sujet soit rompu.

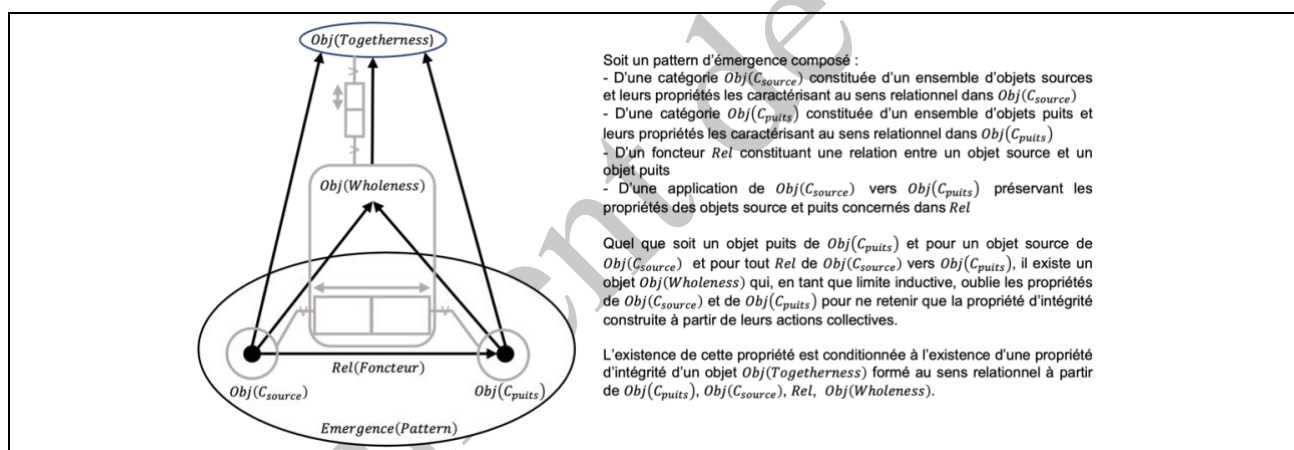


Figure 8: Formalisation du mécanisme de substantiation en théorie des catégories

Le résultat majeur de ces travaux est in fine pour mon projet personnel de recherche mon interrogation quant à la cohérence-système de cette « wholeness » en regard de son environnement. Cette condition implique, dans la TC, de vérifier l'existence d'un autre objet surdéterminant à l'objet wholeness, qui s'est avéré être relatif à ce qui est dénommé « togetherness » dans la quête de l'ADN d'un système par l'équipe Systemics (Sausser et al. 2010) . En effet, j'ai envisagé dans cet objet le

¹¹ « an undivided or unbroken completeness or totality with nothing wanting » dans wordnet, <http://wordnetweb.princeton.edu/>

¹² « État d'une chose, d'un tout, qui est entier, qui a toutes ses parties » dans Le trésor de la langue française, <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>

¹³ Développé et amélioré par R. Milner (Milner 1984) puis appliqué en *Computational Category Theory* par D. Rydeheard et de R. Burstall (Rydeheard and Burstall 1988)

« chaînon manquant » conférant à la wholeness et sa propriété de connectivité une cohérence pour qu'elles forment une unité¹⁴ tangible, en un seul tenant, vis à vis de l'environnement opérationnel dans lequel elle est intégré et qu'elle peut modifier (Meinadier 2009). Dans mon projet de recherche, j'explore dans plusieurs cas d'étude en quoi cette propriété particulière de connexité d'une togetherness maintient énergétiquement la propriété de connectivité de « wholeness » d'un système ou d'un système de système. En ce sens, mes travaux sur ces concepts de propriétés système sont complémentaires de ceux de (Micouin 2008; Chapurlat 2015) qui prônent comme prérequis d'une exigence bien formée la prouvabilité de ses propriétés.

I.2.1.6. Synthèse

Tout en reconnaissant aux éléments technologiques et techniques leurs rôles de concrétisation système, j'ai accordé dans mes travaux une plus grande importance au rôle intégratif des interopérations dans le processus de modélisation-système. Cette attitude m'a conduite à utiliser NIAM-ORM pour les modéliser puis à explorer la TC comme un cadre formel permettant de ne pas se focaliser sur les détails des éléments pour ne se concentrer que sur leurs interopérations. En ce sens, j'ai totalement adhéré à la science des systèmes et à ses sciences fondatrices comme la cybernétique, la biologie, ... qui font des interactions non pas des attributs d'éléments mais ce qui forme la connectivité d'un système à qui il doit ses propriétés (Ducrocq 1996) d'intégrité. Par la suite, je me suis attachée à continuer à lever une partie du voile sur le « mystère » de l'émergence en m'inspirant essentiellement des travaux relatifs à l'impact d'un produit circulant sur le contrôle d'un système dans la communauté « manufacturing » (Van Brussel et al. 1998; McFarlane 2003; Morel et al. 2007b). J'ai ainsi considéré que cette relation d'interopération d'un produit circulant entre des éléments de situations d'état était constitutive d'un invariant de modélisation-système. En congruence avec ma dynamique de recherche individuelle, les travaux doctoraux que j'ai co-encadrés m'ont permis d'approfondir certains aspects conceptuels de ce principe de construction de la connectivité d'une intégrité-système (wholeness). J'en présente la pertinence multi-domaines, multidisciplinaires dans le paragraphe suivant.

¹⁴ « Caractère de ce qui se tient, de ce qui n'est ou ne fait qu'un; caractère de ce qui forme un tout substantiel et cohérent; synonyme: cohérence, cohésion, ensemble, équilibre, harmonie, homogénéité, régularité » dans Le trésor de la langue française, <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>

I.2.2. Encadrement doctoral

I.2.2.1. Modélisation centrée produit d'un système de systèmes d'entreprises

Le passage de l'an 2000 a été l'opportunité pour les entreprises de rénover leur système d'information afin de faciliter l'intégration de la chaîne de production et logistique au sein de l'entreprise en réseau pour contrôler la fabrication sur mesure de biens et gérer les services associés selon les exigences émergeant de la société Internet. En réponse à la solution technologique concrétisée par le développement des « Enterprise Resource Planning » systèmes, une multitude de cadres d'architecture d'entreprise a été proposée visant à faciliter l'intégration bidimensionnelle - synchronique (Business to Manufacturing) et diachronique (Business to Business) - d'une multitude de constituants d'applications spécifiques. Dans le même temps, de façon alternative à cette communauté Integrated Manufacturing System Architecting, la communauté Intelligent Manufacturing System Architecting a visé la distribution de ces constituants en faisant d'un produit interactif, embarquant une technologie d'identification automatique (McFarlane 2003), un élément constitutif d'un contrôle local « en ligne » de ses ressources physiques et logiques de fabrication (Gouyon 2004), permettant d'assurer la cohérence biens et services associés (Morel et al. 2003).

La difficulté de satisfaire la relation d'interopération entre ces « systèmes d'entreprise » a fait du concept d'interopérabilité un objet récurrent de R&D sur le plan national et international¹⁵. Plutôt que d'axer nos travaux sur l'interopérabilité d'artefacts de modélisation (Panetto 2007), j'ai proposé (Mayer and Auzelle 2007) que ces systèmes de fabrication et de logistiques, y compris le produit circulant, soient examinés comme un système de systèmes (SdS) ayant vocation d'interopérer comme tout et partie seulement le temps d'une mission commune (Maier 1998). En concomitance avec les travaux de (Bjelkemyr et al. 2007), ces SdS révèlent ainsi des caractéristiques, notamment celle d'émergence, qui montrent les limites d'une définition classique de système¹⁶ pour rendre compte des multiples dimensions d'un SdS. Notamment, les doctorats qui en résultent, (Bjelkemyr 2009) et (Auzelle 2009) que j'ai encadré, s'appuient sur les travaux de (Kuras 2006) faisant du concept d'Holon (Koestler 1978) une unité de conceptualisation multi-échelles, multi-modèles, multipoints de vue d'un SdS¹⁷.

¹⁵ INTEROP-NoE IST-1-508011; INTEROP (INTEROPERABILITY RESEARCH FOR NETWORKED ENTERPRISES APPLICATIONS AND SOFTWARE) ; Groupe de travail en modélisation d'Entreprise du GRP

¹⁶ 11 sens répertoriés par wordnet (standford) et les nombreuses déclinaisons de la définition de (von Bertalanfy 1968)

¹⁷ (Sausser et al., 2010) feront de la structure TOUT et PARTIE d'un holon l'ADN d'un système.

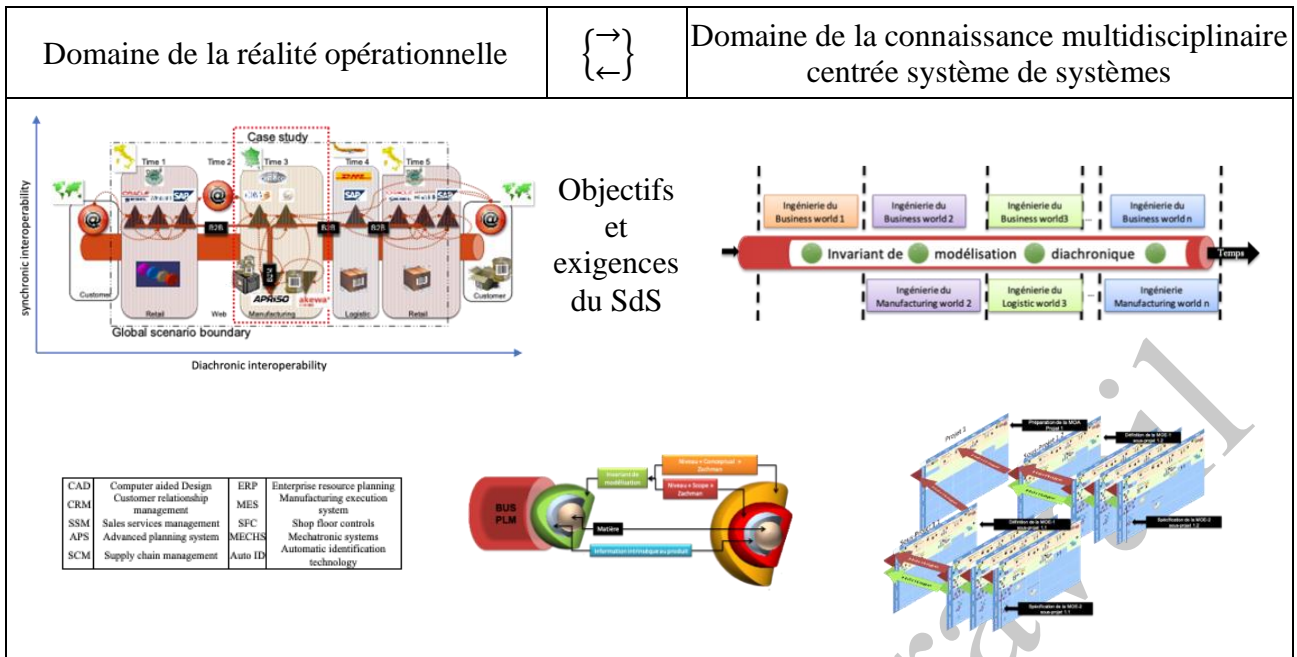


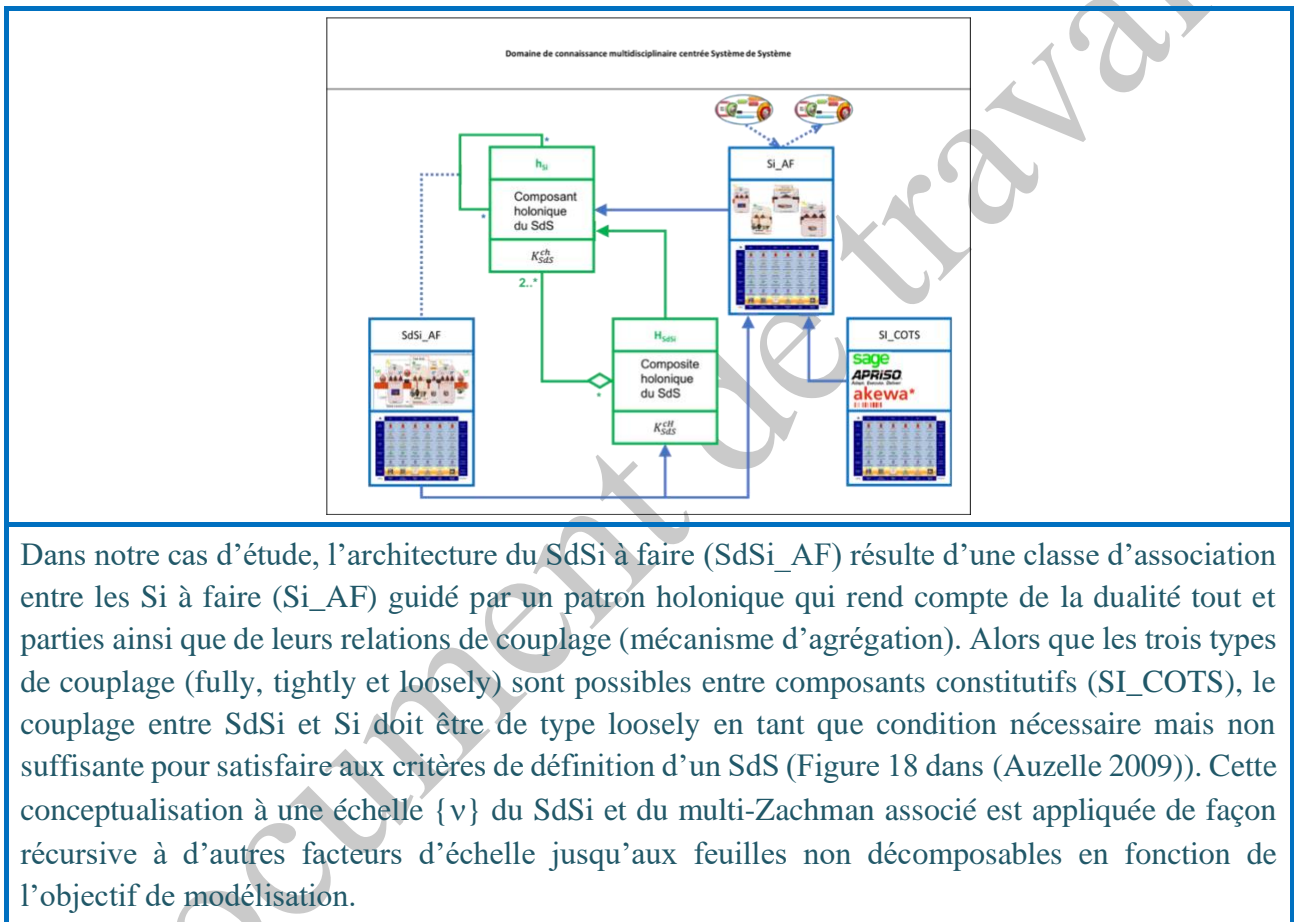
Figure 9: Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un Système d'Information en entreprise centré sur le produit (Auzelle 2009).

Le cas d'étude ci-dessus vise (Figure 9 à gauche) un contexte architectural plausible distribuant géographiquement les éléments constitutifs hétérogène aussi bien de conception (Tursi 2009) que de fabrication (cas d'étude ciblé à l'AIPL) du système de systèmes d'information à faire (SdSi). Le processus de spécification proposé (Figure 9 à droite) architecture un ensemble de cadres de modélisation Zachman autour d'un invariant de modélisation constitutif d'un produit finalisant rendant cohérent le couplage de chacun des systèmes d'entreprises de ce SdS avec le Zachman du projet associé (MOE de rang 1, 2, ...). La relation d'interopération Système de ce SdS spécifie le Zachman du projet principal (MOA) en regard du cycle de vie du produit commun ciblé. Le multi-Zachman centré produit résultant est constitutif du système à faire. Le tableau ci-dessous synthétise les artefacts essentiels de modélisation par un système-projet à chaque niveau de conceptualisation d'un SdS à faire représenter par un multi-Zachman.

(Kuras 2006)	SdSAF	SPF
s	Système à faire	Système pour faire
$\{pattern_k\} \subseteq \{pattern_{k'}\}$	$\{system_k\} \subseteq \{system_{k'}\}$	$\{zachman_k\} \subseteq \{zachman_{k'}\}$
Échelles (de μ à ν) représentées par s^μ invariants dans le temps	SdS, site, atelier, cellule de production, etc.	Zachman du SdS, du site, de l'atelier, de la cellule de production, etc.
À chaque échelle, un ensemble d'objets $\{E_i\}$ et un ensemble de relations $\{REL_j\}$	SdS {sites} ; Site {ateliers} ; Atelier {cellules de production} ; etc.	Objets de modélisation, relations entre les objets de modélisation
H^p	A un SAF correspond un Zachman	A un Zachman correspond un SAF
P_m	Agrégation de propriétés d'un SdS, d'un site, d'un atelier, d'une cellule de production, ...	Agrégation de propriété des objets de modélisations
REL_n	Relations entre les éléments constitutifs SdS, site, atelier, cellule de production, ...	Relation entre les objets de modélisations

D'un point de vue de ma contribution à l'ingénierie-système (Auzelle et al. 2008), cette relation d'interopération architecturale entre un système et ses systèmes constitutifs a fait en outre l'objet d'une caractérisation de leurs degrés de dépendance respectifs par une matrice de couplage N^2 (Autran et al. 2008). Ma contribution à la communauté naissante de « modélisation d'entreprise » a été de dépasser une intégration ad-hoc de systèmes-composants pour en examiner une perspective composite de SdS (Morel et al. 2007a) pilotée par le produit circulant.

A titre explicatif du processus d'ingénierie multidisciplinaire associé de cette relation d'interopération architecturale :



Situation à l'issue de la thèse :

La soutenance de ces travaux a ciblé un cas d'étude archétype, en l'occurrence la construction de l'Université de Lorraine, comme un SdSi centré autour de l'étudiant des Si constitutifs des quatre universités fusionnantes. Jean-Philippe Auzelle s'est vu proposé en conséquence un poste d'ingénieur de recherche attaché à la direction du numérique. L'université de Lorraine s'est néanmoins structurée d'une manière hiérarchique autour d'une solution technologique d'ERP constitutive d'un modèle d'entreprise qui perdure sans management dynamique des différentes propriétés (Gorod et al. 2007) de ce qui s'avère être de fait un SdS-UL, avec pour conséquence au cours du temps des problèmes de

gouvernance (figure 12 dans (Auzelle 2009)) tels que par exemple le degré d'appartenance des universités constitutives (dS) à un même (S).

Publications avec le doctorant :

Mayer, F., Auzelle, J.-P., 2007. Is system of systems a candidate rationale artifact for enterprise information-intensive system modeling ?, in: 9th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprise, MITIP 2007. Florence, Italy.

Morel, G., Panetto, H., Mayer, F., Auzelle, J.-P., 2007. System of Enterprise-Systems Integration Issues: an Engineering Perspective, in: IFAC (Ed.), IFAC Conference on Cost Effective Automation in Networked Product Development and Manufacturing, IFAC-CEA'07. Elsevier, Monterrey, Mexique, p. CDROM.

Auzelle, J.-P., Morel, G., Panetto, H., Mayer, F., 2008. Using Systems of Systems Engineering to Improve the Integration of Enterprise-Control Systems. Insight Journal of INCOSE 11, 13–14.

Autran, F., Auzelle, J.P., Cattan, D., Garnier, J.L., Luzeaux, D., Mayer, F., Peyrichon, M., Ruault, J.R., 2008. Coupling Component Systems towards Systems of Systems. Presented at the 18th Annual International Symposium of INCOSE, 6th Biennial European System Engineering Conference INCOSE, Utrecht, The Netherlands

I.2.2.2. Modélisation centrée produit d'un système-projet d'innovation technologique

En poursuite des travaux de Jean-Philippe Auzelle, j'ai approfondi la relation d'interopération entre les éléments constitutifs d'un système-projet d'innovation en la centrant sur le produit individualisé requis par un client comme invariant architectural de modélisation-système.

La proposition de normalisation des pratiques de management de l'innovation (AFNOR FD X50-271 2013) souligne la difficulté récurrente (Lenfle 2004; Fernez-Walch and Romon 2006) de concilier le management stratégique de l'innovation avec le management opératoire des tâches allouées aux phases de projets innovants. Pour surmonter cette difficulté, souvent présentée comme due à la spécificité d'un projet d'innovation en entreprise, de nombreuses réponses sont proposées pour identifier la nature d'une innovation (Rothwell 1992) et pour en manager ses activités par des méthodes comme celle du stage-gate (Cooper 2000) ou du « fuzzy » front-end (Koen 2004) ou par des démarches intégrées comme celle d'une ingénierie de l'innovation (Boly 2004). Remarquons que cette problématique rejoint celle de l'ingénierie-système différenciant les activités séquentielles du management des phases d'un projet des activités concourantes du management opératoire des tâches contribuant au jalonnement de l'avancée des phases (Figure 109 dans (Meinadier 2009), Figure 143

dans (Faisandier 2015)). Pour les deux sociétés techniques concernées, l'INCOSE¹⁸ et le PMI¹⁹, cette différenciation récurrente a conduit par la suite à la nécessité d'une alliance stratégique (Langley et al. 2011) entre ces deux visions de management d'un système-projet (Sage and Rouse 2011; Ruault 2014). Une des bonnes pratiques proposées est de manager cette relation d'interopération à partir du partage d'une vision commune des exigences des parties prenantes du projet dans le but de mieux organiser leurs activités spécifiques.

A l'ERPI, pour mieux prendre en compte ces activités opératoires dans les processus innovatifs, j'ai avancé l'idée que cette vision commune soit sous la forme d'un invariant architectural du produit à innover comme un élément constitutif de la diachronicité de la relation d'interopération entre ces managements, sous l'assertion que les tâches soient des ajustements de cette interopérabilité vis à vis de ce produit tout au long du cycle de vie du projet. J'ai proposé de formaliser ce produit, qu'il soit un bien et/ou un service, comme un système afin d'être le moteur des relations d'interopération à partir desquelles est architecturé un système-projet d'innovation. Les travaux de doctorat de (Castro 2010) ont mis en œuvre cette proposition pour son application à un cas d'étude (Figure 10 à gauche) de pilotage d'un projet de transfert de technologie relatif à un nouveau procédé de brasage dans le cadre du pôle de compétitivité Materialia²⁰ (dans (Kooli-Chaabane 2010)).

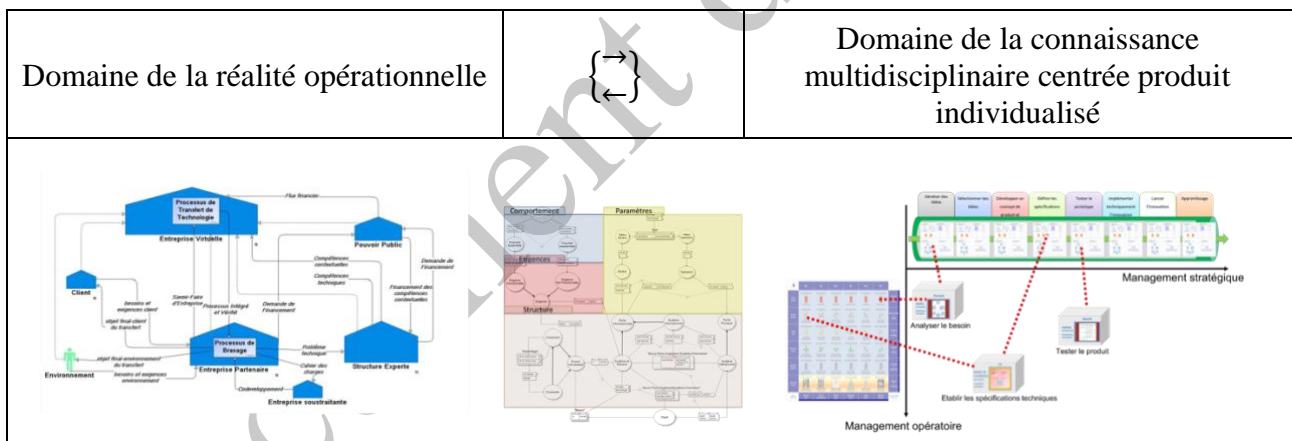


Figure 10 : Contribution à l'Ingénierie de l'Innovation : Proposition d'un cadre de modélisation pour un système d'innovation centré sur le produit (Castro 2010)

Ce produit-système a été désigné dans les travaux de doctorat de (Castro 2010) comme le produit individualisé par analogie avec le concept d'objet individualisé . Ce concept est utilisé pour mieux cerner des besoins utilisateurs, entre autres, en ingénierie système (van Gaasbeek 2000), en sciences

¹⁸ INCOSE, International Council on Systems Engineering, www.incose.org

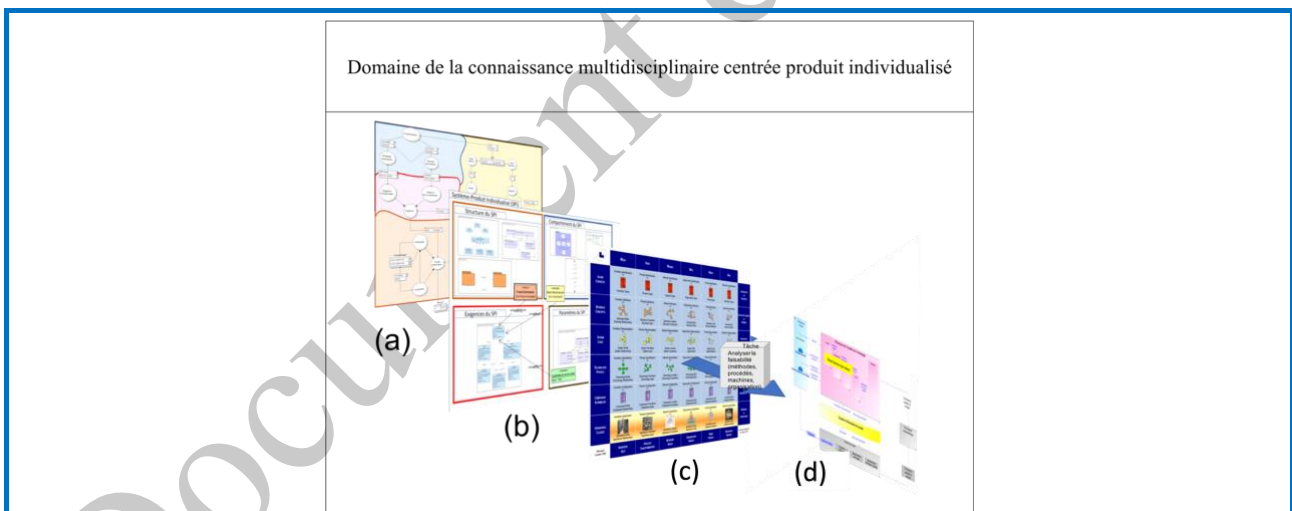
¹⁹ PMI, Project Management Institute, www.pmi.org

²⁰ Materialia: pôle de compétitivité en innovation collaborative en matériaux et procédés, www.materialia.fr

économiques (O. Rosenberg dans (Piller 2004); Muther 1999; Blecker et al. 2004) ou en sciences du génie logiciel (Beuche et al. 2004). Il permet de rendre compte de moments durant lesquels un produit est identifié de manière unique par ses propriétés requises par ses parties prenantes ainsi que par la structure et les comportements d'objets intermédiaires de conception jalonnant les phases d'un projet au cours du cycle de vie-produit et l'exécution des tâches y contribuant. Nous avons proposé de modéliser l'essentiel de ce qui désigne le produit individualisé et ce qui le définit par les 4 piliers (exigences, structure, comportement et paramètres) du langage SySML en les couplant par un modèle relationnel binaire (Figure 10 au milieu) reflétant l'insécabilité du produit (Castro Espiritu et al. 2008).

Ma contribution à la modélisation processive (Dulmet and Lhote 2001) en innovation a consisté à coupler ces 4 piliers visé avec les cellules adéquates d'un cadre architectural intégratif, en l'occurrence celui de modélisation d'entreprise Zachman (Figure 10 à droite) pour en définir les tâches organisant progressivement la relation d'interopération entre les managements stratégique et opératoire du système-projet transfert de technologie ciblé (Castro et al. 2009).

A titre explicatif du processus architectural associé à cette relation d'interopération du produit individualisé avec un système-projet :



Notre interprétation du concept d'objet individualisé nous a permis de différencier pour un produit ce qui est de l'ordre de la « mass production » et de la « customization » à l'origine du besoin d'individualisation d'un produit. La catégorisation de l'essentiel (MUST) et de l'inessentiel (CAN) d'un produit permet de déterminer la capacité de variabilité d'un produit en combinant l'ensemble de modules « must » obligatoires pour faire fonctionner ce produit avec l'ensemble de modules « can » optionnels pour individualiser ce produit. Le module « must » traduit les exigences fonctionnelles de base du produit pour satisfaire son utilisateur. Le module « can » traduit plutôt des exigences non fonctionnelles du produit attendu, par exemple une propriété de confort demandée par l'utilisateur qui n'altère pas la fonction principale du produit, mais qui le rend peut-être moins attractif.

Nous avons formalisé à l'aide de la méthode NIAM/ORM ces modules « must » et « can » pour construire l'invariant architectural à instancier d'un produit individualisé à innover (a) que nous avons traduit en langage SysML pour chacun des piliers (b) pour décrire puis prescrire l'architecture du système-projet ciblé (d) en termes de niveaux de responsabilité de parties prenantes (MOA, MOE, Concepteur, ...) ainsi qu'en terme de conduite d'un projet (Quoi, Comment, Où, Qui, Quand, Pourquoi) (c).

Situation à l'issue de la thèse :

Évaristo Castro a été recruté à l'issue de sa thèse comme manager de projet chez Ceraver²¹. Il y applique notamment l'invariant architectural du produit individualisé pour piloter ses projets de développement dans le domaine de la prothèse médicale. Un référentiel propre à l'entreprise remplace le cadre Zachman mis en œuvre dans la thèse.

Publication avec le doctorant :

Castro Espiritu, E., Mayer, F., Lhoste, P., 2009. Contribution to Innovation Engineering: modelling the innovation process, in: 8ème CIGI Congrès International de Génie Industriel. Bagnère de Bigorre, France.

Castro Espiritu, E., Mayer, F., Lhoste, P., 2008. Contribution to the Formalization of Individualized Processes during Product Innovation, in: 3rd European Conference on Management of Technology, EUROMOT. Nice, France, p. 200.

I.2.2.3. Modélisation centrée produit d'un système-projet d'innovation de services

Le résultats des travaux de Évaristo Castro ont été appliqué dans le domaine de l'industrie financière, dans la cadre des travaux de doctorat de (David Le Bezvoët 2013) en partenariat avec le groupe d'assurances banque Groupama. Le contexte de ces travaux était relatif à la mise œuvre d'un système de pilotage du processus d'innovation au sein de l'entreprise devant développer des nouveaux services (NSD) pour satisfaire les nouvelles exigences de ses clients en matière d'assurance et de banque.

Un premier résultat de ces travaux a été le constat d'un manque de méthodes de pilotage de projets NSD du fait du caractère subjectif de la notion de services contrairement à celles consacrées aux projets de développement de nouveaux produits (NPD) décrivant les invariants requis pour les conduire.

²¹ <https://www.ceraver.com/>

J'ai alors proposé d'étendre la notion de produit individualisé à celle de service individualisé en définissant ses propriétés essentielles et inessentiels sous forme d'invariants de pilotage de projets. Ces invariants nous ont permis de construire le modèle d'un système d'information à l'aide de l'outil MEGA dans la perspective du développement d'un logiciel devant être mis à disposition des différents chefs de projets afin de décrire et suivre les projets d'innovation de l'entreprise Groupama dans l'optique d'une part, d'en capitaliser les résultats et d'autre part, d'en faciliter le management (Figure 11).

Le caractère stratégique de ces projets d'innovation ainsi que le souhait professionnel de Monica David le Bezvoët ont restreint nos possibilités de publications sur ces travaux.

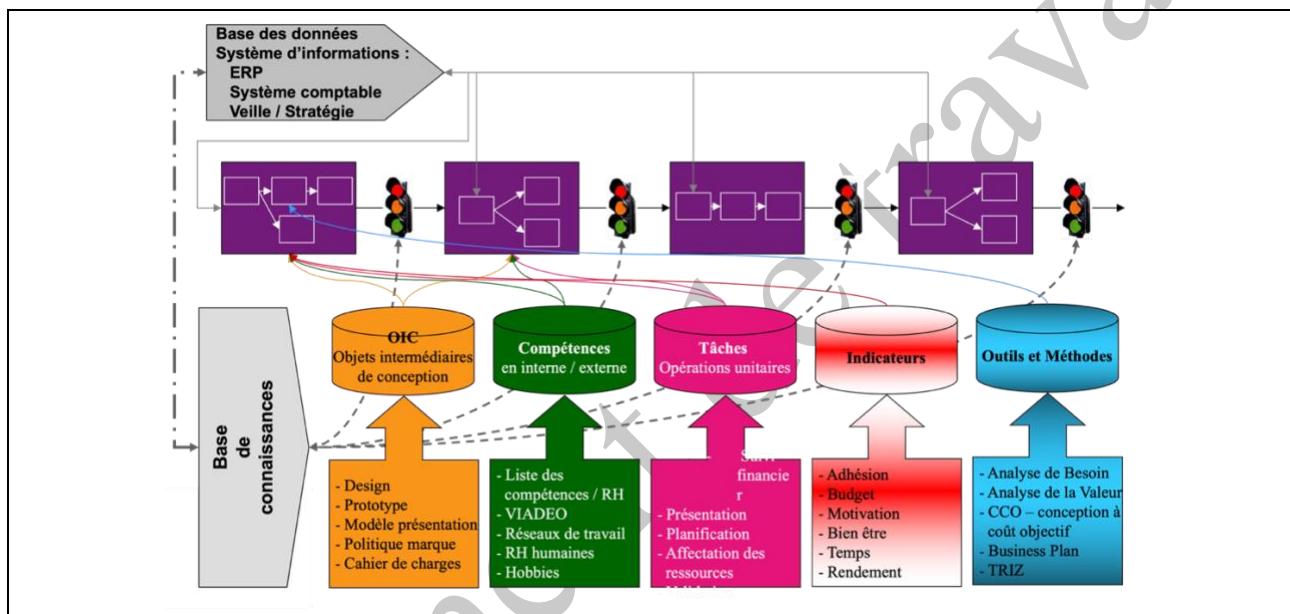


Figure 11: Processus de pilotage de projets d'innovation (le Bezvoët M et al, 2010)

Situation à l'issue de la thèse :

Monica David le Bezvoët est devenue autoentrepreneur dès la fin de son doctorat afin de développer sa propre activité de consultante en innovation.

Publication avec le doctorant :

David le Bezvoët M., Mayer F., Boly V., 2010. Proposition de modèle du processus d'innovation in : Confere 2010. Sousse, Tunisie.

I.2.2.4. Co-spécification système de modèles multidisciplinaires exécutables

Les travaux de doctorat de (Bouffaron 2016) auquel j'ai participé s'inscrivent dans une collaboration de longue date du CRAN avec la DER-EDF dans le domaine d'automatisation

« intelligente » distribuée CMMS-IAMS dans lequel j'ai été immergée (cf. I.2.1.4). L'intention architecturale visée (Devic 2014) rompt avec la technique courante du PLM (Product Lifecycle Management) pour tirer parti de la technologie digitale afin de distribuer l'ensemble des actifs-système d'exploitation et d'ingénierie (Figure 2.2, (Galara et al. 2012)) autour d'un bus collaboratif pour assurer un continuum d'information de conduite et de soutien.

La maturité des technologies de simulation et d'exécution de modèles a fourni dans ces travaux l'opportunité d'un changement de paradigme de MBSE exécutable, avec pour différence avec les travaux orientés discret de (Garcia Jr 2009), un environnement de co-spécification-système multidisciplinaire (Ingénierie-Système en gris, Automatique en bleu, Physique en rouge, Physiologie en vert, Figure 12 à droite). La situation d'exploitation émulée (Figure 12 à gauche) par cette étude de cas avait pour objet de réaliser une fonction élémentaire de secours d'alimentation en eau. Cette situation de conduite (Bouffaron et al. 2014) est mise en service au déclenchement d'une alarme sonore locale $\{R_1^{CS}\}$ prévenant d'une situation d'exploitation dégradée dans le circuit d'eau secondaire de générateurs de vapeur (GV). Elle doit assurer une des trois fonctions de sûreté du procédé industriel critique étudié requérant le maintien du refroidissement du combustible en toute circonstance, par évacuation de la puissance produite, y compris après l'arrêt du réacteur.

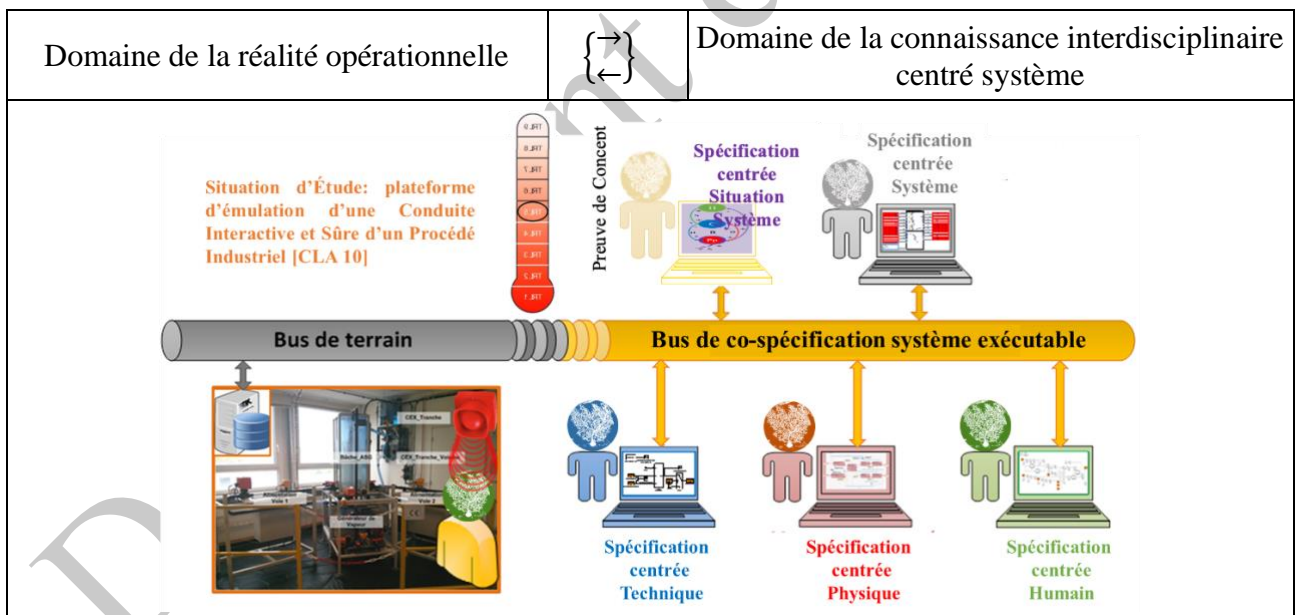


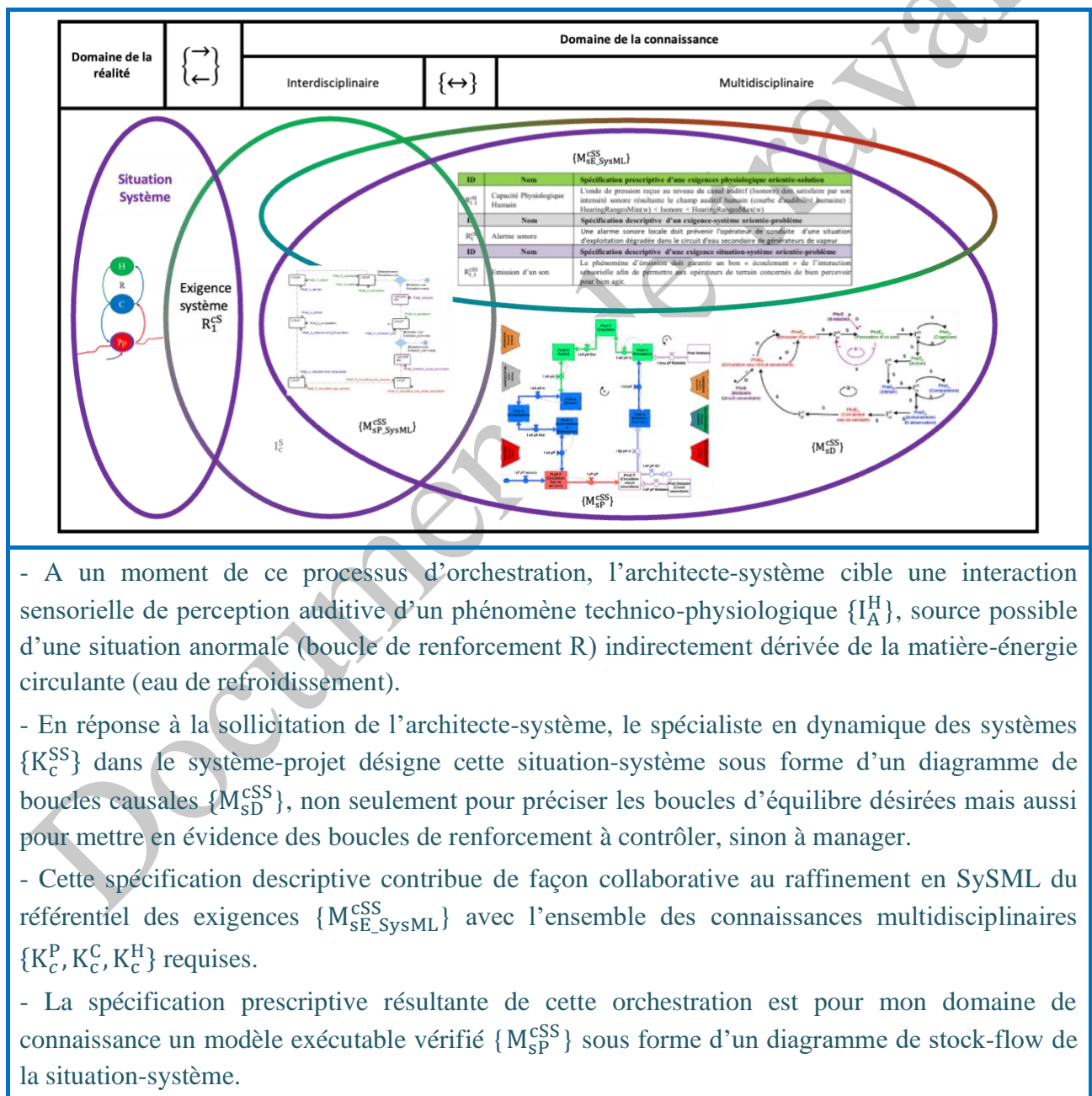
Figure 12: Co-spécification système exécutable basée sur des modèles : application à la conduite interactive d'un procédé industriel critique (Bouffaron, 16)

Ma contribution (Dynamique des systèmes en violet, Figure 12 à droite) à ces travaux a porté sur le processus d'orchestration multidisciplinaire de la spécification-système de la situation ciblée par la plate-forme d'expérimentation. De façon générale (Lieber 2013), y compris pour la formation (Morel et al. 2014), le processus de spécification-système combine un ensemble d'artefacts de

l'approche des Problem-Frames en Génie Informatique (Jackson 98) avec le paradigme de situation-système de (Lawson 2010) en généralisant un ensemble de prédicats de couplage $\{\vec{\leftarrow}\}$ entre un espace-problème requérant et un espace-solution développés en II.2.2.3.3.

Il est important de noter que la différence entre la connaissance requérante d'une source vers un puits et la connaissance répondante d'un puits vers une source sera un élément de réflexion de mes travaux d'approfondissement du concept de situation-système.

A titre explicatif du processus d'orchestration multidisciplinaire associé à cette relation d'interopération exploitation/ingénierie-système :



- A un moment de ce processus d'orchestration, l'architecte-système cible une interaction sensorielle de perception auditive d'un phénomène technico-physiologique $\{I_A^H\}$, source possible d'une situation anormale (boucle de renforcement R) indirectement dérivée de la matière-énergie circulante (eau de refroidissement).
- En réponse à la sollicitation de l'architecte-système, le spécialiste en dynamique des systèmes $\{K_C^{SS}\}$ dans le système-projet désigne cette situation-système sous forme d'un diagramme de boucles causales $\{M_{SD}^{CSS}\}$, non seulement pour préciser les boucles d'équilibre désirées mais aussi pour mettre en évidence des boucles de renforcement à contrôler, sinon à manager.
- Cette spécification descriptive contribue de façon collaborative au raffinement en SysML du référentiel des exigences $\{M_{SE_SysML}^{CSS}\}$ avec l'ensemble des connaissances multidisciplinaires $\{K_C^P, K_C^C, K_C^H\}$ requises.
- La spécification prescriptive résultante de cette orchestration est pour mon domaine de connaissance un modèle exécutable vérifié $\{M_{SP}^{CSS}\}$ sous forme d'un diagramme de stock-flow de la situation-système.

- L'essentiel de cette spécification prescriptive est translaté en langage SysML (Cloutier et al. 2015) sous forme d'un diagramme d'activité $\{M_{SP_SysML}^{CSS}\}$ afin de guider l'architecte-système pour statuer sur la faisabilité de cette interaction technico-physiologique $\{I_A^H\}$.

- Par défaut d'une technologie de simulation pour valider par co-exécution la spécification multi-modèle ciblée, la complétude système de $\{M_{SP}^{CSS}\}$ est validée en regard du patron architectural « conceptagon » (Boardman et al. 2009) (triades attachées à $\{M_{SP}^{CSS}\}$).

Ainsi, cette spécification sert de référence de situation-système (as-is) vers la conception d'une nouvelle architecture-système (to-be) dans la situation réelle (Dupont et al. 2019a).

Situation à l'issue de la thèse :

Fabien Bouffaron a été recruté comme architecte système chez Airbus. Il y prône notamment l'intérêt du MBSE pour architecturer la connaissance multidisciplinaire pour satisfaire les projets internes commandités.

Publication avec le doctorant :

Morel, G., Dupont, J.-M., Lieber, R., Bouffaron, F., Méry, D., Mayer, F., Marty, J.-L., 2013. Spécification d'exigences physico-physiologiques d'interaction homme-machine en ingénierie système. Génie logiciel Mars 2013, 29–39.

Bouffaron, F., Dupont, J.-M., Mayer, F., Morel, G., 2014. Integrative construct for model-based human-system integration: a case study, in: 19th IFAC World Congress, IFAC'14. Cape Town, South Africa.

Morel, G., Bouffaron, F., Nartz, O., Mayer, F., Marangé, P., Levrat, E., Panetto, H., 2014. Towards an iterative learning of systems engineering based on models, in: 10ème Conférence francophone de modélisation, optimisation et simulation, MOSIM'14. Nancy, France.

Dupont, J.-M., Mayer, F., Bouffaron, F., Lieber, R., Morel, G., 2019. Spécification centrée système d'interactions physico-physiologiques de perception sensorielle, in : Défis de l'automatisation Des Systèmes Sociotechniques, Systèmes et Génie Industriel. Frédéric Vanderhaegen, Choubeila Maaoui, Mohamed Sallak, Denis Berdjag, London, United Kingdom.

I.2.2.5. Spécification d'un modèle de connaissance de situations-systèmes opérationnelles

Les travaux de doctorat de Florence Kone auxquels j'ai participé ont fait l'objet d'un contrat CIFRE avec Stellantis et le CRAN en co-encadrement avec ERPI. Ils portaient sur la spécification et la démonstration de sûreté du véhicule autonome, basées sur les situations et scénarios d'usage et leurs évaluations probabilistes (Figure 13).

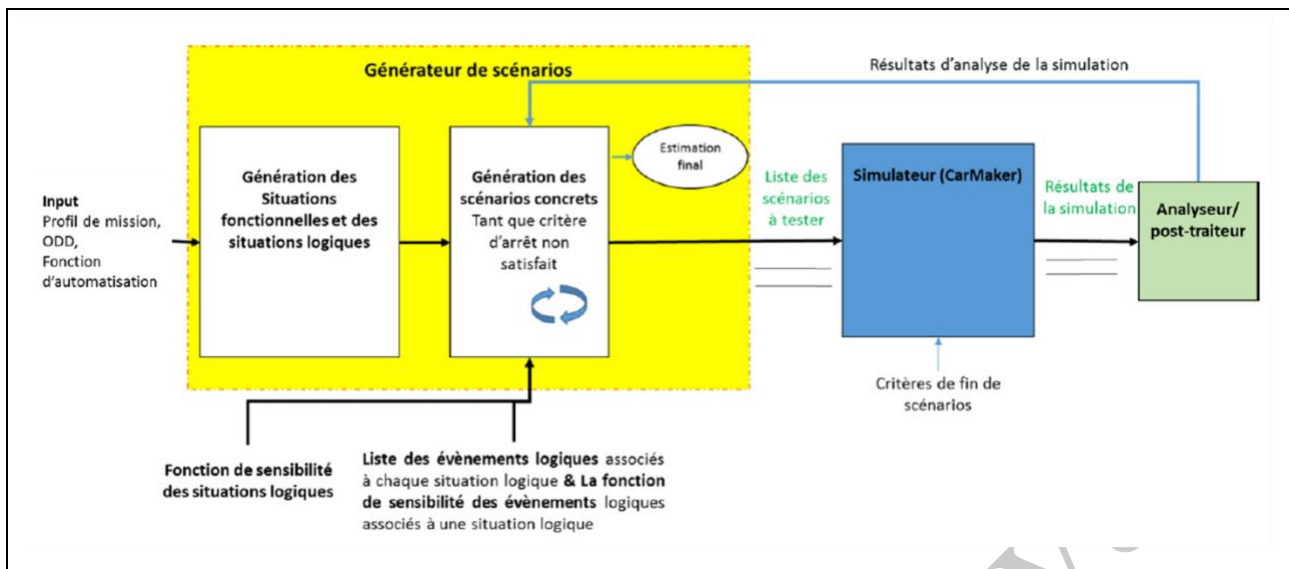


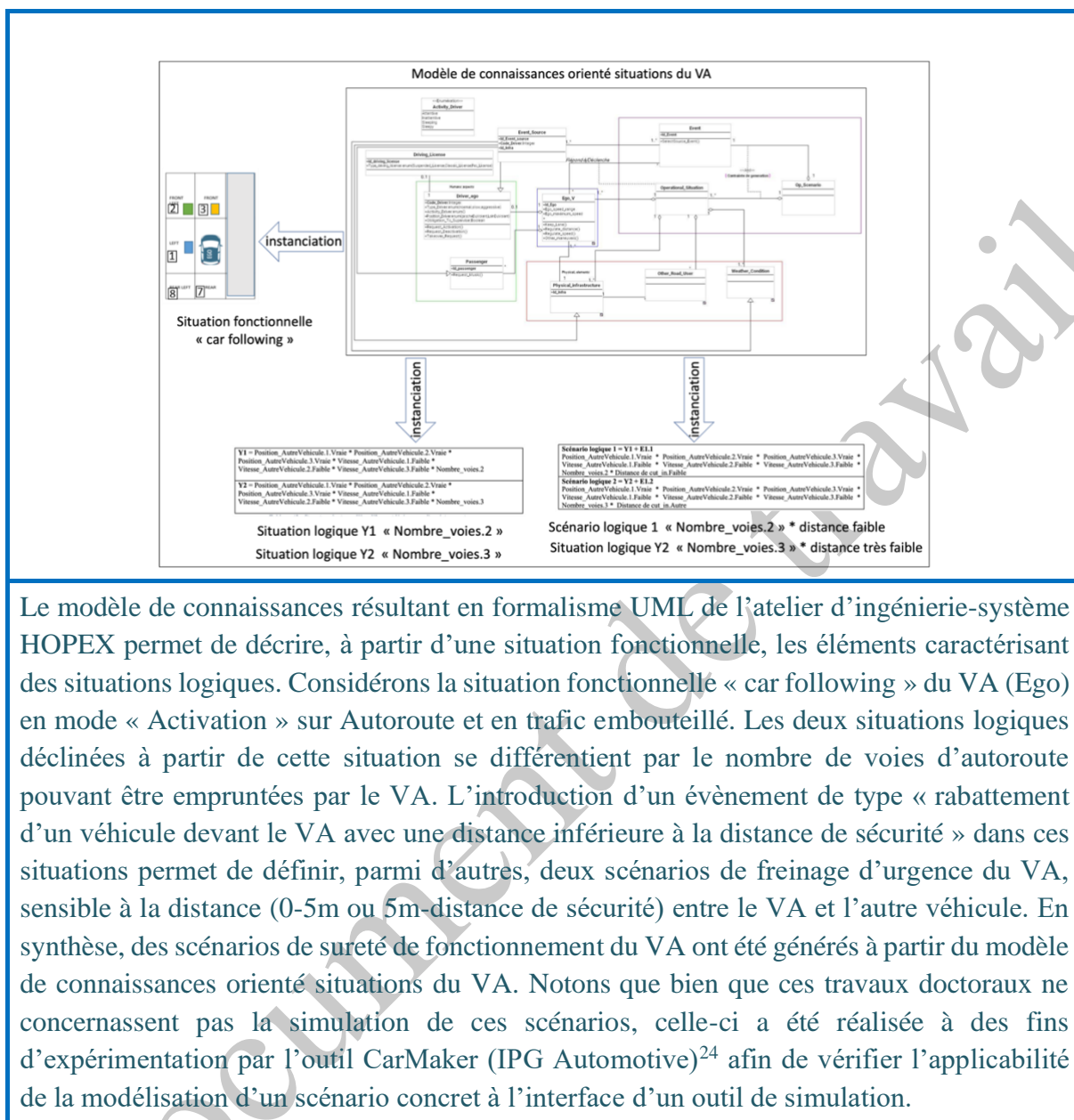
Figure 13: Génération des scénarios concrets jusqu'à atteinte du critère d'arrêt (Koné 2020)

En fonction de son degré d'autonomie visé, les performances de sûreté attendues d'un véhicule autonome (VA) doivent être alignées sur celles d'un humain afin de l'assister partiellement ou totalement dans ses décisions²² en regard de situations de conduite difficiles ou dangereuses. Ce travail doctoral a contribué à cet objectif par l'établissement de tests de fonctionnalité d'un véhicule autonome dans le cadre de la norme internationale SOTIF²³. Une des difficultés majeures rencontrées a concerné la génération de scénarios pour évaluer les situations opérationnelles d'un VA (Koné et al. 2019a, b). En effet, leurs définitions doivent tenir compte d'une part, de l'explosion combinatoire de ces situations et d'autre part, des incertitudes qui peuvent y être rencontrées sous certaines conditions extrêmes ou de fait de la combinaison de facteurs externes défavorables pouvant souligner l'insuffisance des performances d'un VA. Un premier résultat de cette thèse a été de proposer un échantillonnage fini de situations par classes de situations qui soit acceptable pour évaluer la fiabilité d'un VA. Un deuxième résultat était la proposition d'une métrique de niveau de confiance que l'on peut accorder à une évaluation de sûreté de chaque classe de situations pour faire face aux incertitudes (Koné et al. 2020). Ma contribution à ces travaux a porté sur la modélisation centrée situation-système de l'ensemble des éléments (infrastructure, conditions de circulation, météo, événements, ...) caractérisant ces situations sous forme d'un modèle de connaissances à partir duquel des scénarios de fonctionnement d'un VA peuvent être générés à des fins de simulation pour évaluer le comportement de celui-ci dans des conditions opérationnelles telles que définies par le SOTIF.

²² Ces travaux ont été pour moi l'opportunité d'introduire en enseignement la « moral machine » pour interpellier les étudiants sur la problématique de décision en situation (Awad et al. 2018),

²³ SOTIF (Safety of The Intended Functionality), ISO/PAS 21448 Véhicules routiers - Sécurité de la fonction attendue

A titre explicatif du processus de spécification centrée situation du domaine opérationnel d'un VA circulant :



Situation à l'issue de la thèse :

Tchoya Florence Koné a été recrutée comme ingénieur système chez Valéo. Elle continue à développer la génération de scénarios d'usage de véhicules autonomes dans le cadre de la SOTIF.

²⁴ <https://ipg-automotive.com/en/applications/autonomous-vehicles/>

Publication avec la doctorante :

- Koné, T. F., Bonjour, E., Levrat, E., Mayer, F., & Géronimi, S. (2019). Challenges for autonomous vehicles (AVs) engineering: Safety validation of functional performance limitations. *INSIGHT – International Council on Systems Engineering (INCOSE)*, 22 (4), Wiley.
- Koné, T. F., Bonjour, E., Levrat, E., Mayer, F., & Géronimi, S. (2020). Safety assessment of scenarios for the simulation-based validation process of AV with regards to its functional insufficiencies. *30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, ESREL 2020 PSAM 15*
- Koné, T. F., Bonjour, E., Levrat, E., Mayer, F., & Géronimi, S. (2019). Safety demonstration of autonomous vehicles: A review and future research questions. *10th International Conference on Complex Systems Design & Management CSD&M, Paris, France.*

I.2.3. Encadrement de recherche

Les travaux de DEA et de master de recherche m'ont permis d'éclairer certains aspects du mécanisme de modélisation-système centrée produit :

- Construction d'un tutorial hypertexte centré système d'aide à la décision (Morel 1995; Morel et al. 1996),
- Application du tétraèdre de Paynter à un système d'actionnement et de mesure intelligent (Drapier 1996),
- Réingénierie d'un ERP pour assurer sa conformité à un modèle d'un système d'entreprise particulière (Laroche 1999; Mayer and Laroche 2000),
- Intégration système d'éléments d'une filière pharmaceutique (Fréchin 1997), de recyclage de ferrailles (Golinelli 1997; Golinelli et al. 2000), de documentation technique (Godfrin 1999), de maintenance d'éléments de réseaux de télécommunication (Bignon 2003),
- Formalisation en théorie des catégories (Lavigne 2000; Mayer and Lavigne 2001; Mayer et al. 2003),
- Formalisation sémantique de modalités linguistiques pour désigner, définir et « pragmatiser » les éléments source et puits pour devoir-faire, savoir-faire, pouvoir-faire et vouloir-faire une architecture de processus (Robert 2001; Mayer and Robert 2003),
- Construction d'un référentiel de connaissance de normes techniques (Auzelle 2005; Auzelle et al. 2006b, c, a),

- Construction d'un cadre de référence suivant une approche proactive pour la gestion du cycle de vie des produits (Marchetta 2009; Marchetta et al. 2009, 2010, 2011),
- Structuration de systèmes-projet complexe de transfert de technologie (Casorzo 2011),
- Application de la théorie des graphes pondérés pour concrétiser le système émergent d'un système de systèmes (Adam 2011)

I.2.4. Conclusion

Mes travaux ont principalement répondu à différents aspects de ce qui fait l'intégrité-système (wholeness) avec une situation reflétant ou émulant une certaine réalité opérationnelle, y compris l'intégrité multidisciplinaire du système-projet associé.

Mon projet de recherche vise à répondre à ce qui fait la « Cohérence-Énergétique » (togetherness) de cette intégrité-système en situation opérationnelle, y compris pour assurer la congruence de l'intégrité interdisciplinaire du système-projet multidisciplinaire associé.

I.3. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

I.3.1. Création et responsabilité de formations diplômantes

I.3.1.1. DHET GSI et section spéciale GSI

Lors de mon arrivée à l'ENSGSI en 1998, il m'a été demandé par la direction de l'école d'assurer, dans le cadre des activités administratives inhérentes à mon poste de maître de conférences, la responsabilité de la formation DHET (Diplôme des Hautes Études Technologiques) en Génie des Systèmes Industriels de l'INPL ainsi que de la section spéciale en Génie des Systèmes Industriels dispensées toutes deux au sein de l'école. Cette responsabilité consistait en diverses tâches dont la coordination et l'évolution des enseignements de ces formations ainsi que le renforcement du recrutement d'étudiants tant en formation initiale qu'en formation continue. Ce dernier aspect m'a amené à poser les bases d'un nouveau service de formation continue au sein de l'ENSGSI avec l'arrivée au sein de l'école d'une personne spécialisée dans ce domaine très particulier. Nous avons alors mis en place les différents processus et procédures de recrutement de professionnels dans les formations de l'ENSGSI.

I.3.1.2. DESS MPIIS

En 2000, dans le cadre du développement de l'ENSGSI, j'ai proposé, en accord avec la direction, de substituer ces deux formations par une nouvelle formation de type DESS afin d'y faire évoluer les différentes compétences pédagogiques de l'école. Ainsi, j'ai conçu l'organisation tant administrative que pédagogique de ce DESS intitulé « Management de Projet et Innovation en Industries et Services » (MPIIS) en m'appuyant sur mon expérience en matière de modélisation centrée produit d'un système pour en définir le scénario pédagogique architecturant, à travers l'évolution et la conception de modules d'enseignement, cette nouvelle offre de formation. J'ai alors suivi toute la procédure d'habilitation de ce DESS MPIIS qui a été accordée à l'INPL au cours du premier semestre 2001. Dès septembre 2001, la formation a été ouverte aux étudiants de la formation initiale et continue. Jusqu'en 2005, j'ai assuré la responsabilité tant administrative que pédagogique de ce DESS.

I.3.1.3. Spécialité MDI puis MIDI et RIC I du master DG

En 2005, dans le cadre de la réforme LMD des universités, j'ai été sollicité par la direction de l'école pour concevoir une des spécialités professionnelles (P) du master « design global » de l'INPL, en cohérence avec une de ses spécialités recherche (R) pour laquelle l'école avait été également sollicitée, afin d'harmoniser les spécificités pédagogiques des enseignants-chercheurs de l'ENSGSI et de l'ERPI à ce niveau de formation. Ainsi, j'ai conçu et animé la spécialité professionnelle M2 « Management de l'Innovation » (MDI) du Master devenue « Management de l'innovation et du Design Industriel » (MIDI) lors des réhabilitations de la mention en 2009 et 2013 que j'ai également réalisées.

Le Master ainsi que ses spécialités ayant été habilités par le ministère courant 2005, j'ai pu procéder à son ouverture en septembre de la même année et dès lors, j'ai assuré son animation pédagogique jusqu'en 2013, incluant les tâches administratives de gestion de la formation, le recrutement d'étudiants en formation initiale et continue, l'évolution des enseignements dans le cadre des réhabilitations de la mention du master design global.

À la suite d'une évolution de l'organisation de l'ENSGSI, j'ai assuré également de septembre 2007 à septembre 2009 l'animation pédagogique et administrative de la spécialité recherche M2 « Recherche en Innovation et Conception Intégrée » (RIC I) du Master Design Global. Étant donné ma responsabilité de ces spécialités, j'ai également participé à la mise en œuvre des échanges

d'étudiants dans le cadre du projet d'échanges « franco-sud-américain »²⁵ en ingénierie de l'innovation appliquée aux produits, aux processus et à la stratégie d'entreprise » de l'ENSGSI.

Ce n'est qu'en 2013 que la nomination d'un Professeur à l'école m'a permis de transférer une partie de cette lourde charge administrative puisqu'elle couvre aussi bien l'ensemble des niveaux LMD que la formation professionnelle (VAP, VAE) avec des implications fortes au niveau local (CEVU) et international (séjours chez les différents partenaires).

I.3.2. Enseignements en cycle L-M

Avant ma nomination en 1998 comme maître de conférences à l'ENSGSI de l'INPL, j'ai pu acquérir une expérience en matière d'enseignement en génie automatique et génie productique dans le cadre de mes fonctions d'ATER à l'université Henri Poincaré. En devenant vacataire en 1994 puis maître de conférences associé de 1996 à 1998, j'ai contribué à promouvoir le raisonnement de modélisation centrée produit développé dans mes travaux doctoraux en participant à la conception de nouveaux modules d'enseignements en génie systémique appliqué à la modélisation d'entreprise pour le compte de formations du 2^o cycle telles que le DESS « productique et automatisation intégrée » de l'université Henri Poincaré, du DESS « Sûreté des Systèmes Industriels » de l'INPL mais aussi du DESS « génie mécanique et productique » de l'université Paul Verlaine de Metz. Cette compétence en génie systémique m'a identifiée auprès de l'équipe pédagogique de l'ENSGSI en raison de son « essence » (Bréas 1993) ce qui m'a amenée dès 1995 à participer à l'enseignement de la 2^o année de son cycle ingénieur ainsi que du DEA en Génie des Systèmes Industriels de l'INPL.

I.3.2.1. Nature des enseignements

Génie systémique

Mon corpus de recherche en modélisation-système m'a permis de créer et de dispenser un enseignement en génie systémique afin de sensibiliser les étudiants au penser système pour l'ingénierie en leur faisant acquérir les concepts, théories, modèles, méthodes, langages et outils issus des grands courants scientifiques de l'approche système. Le principe pédagogique de ce cours est de faire apprendre aux étudiants à construire leur propre boîte à outils de modélisation-système à partir de la formalisation du discours de la systémique en phrase naturelle binaire à l'aide la méthode NIAM.

²⁵ Ce projet, avec l'Universidad Nacional de Cuyo (Mendoza- Argentina) et l'Universidad de Santiago de Chile (Chili), a été obtenu par l'ENSGSI de 2008 à 2012 dans le cadre des programmes FITEC (France Ingénieurs TEChnologies) soutenus par le ministère des Affaires étrangères et européennes et le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et mis en œuvre par la Conférence des Directeurs des Écoles Françaises d'Ingénieurs.

Intégration- systèmes d'information

A mon arrivée à l'ENSGSI, en compliance avec le thème porteur de l'école en « ingénierie organisationnelle », j'ai proposé une nouvelle unité d'enseignement dans le domaine du génie productique pour supporter méthodologiquement et technologiquement les unités concernées par le pilotage de projets d'innovation de produits et de services, de « l'idée au marché ». Ces modules d'enseignement que j'ai créés dont le dénominateur commun était la « modélisation d'entreprise » avait pour objectif de sensibiliser les étudiants aux outils-méthodes de modélisation et de conception d'un système d'information tout en les amenant à une vision systémique de l'ingénierie qui a toujours constitué le fondement original de l'école. La déclinaison des modules de cette unité d'enseignement sur les trois années du cycle ingénieur a permis aux étudiants d'acquérir de manière progressive des compétences en méthode de conception de systèmes d'information comme MERISE et en méthode d'analyse fonctionnelle de système comme SADT ainsi qu'en méthode de modélisation d'entreprise comme BPMN. L'autre objectif affiché de ces modules d'enseignement était que les étudiants mettent en œuvre ces compétences de manière accompagnée dans leurs projets industriels en 1^o et en 2^o année ingénieur puis seuls dans le cadre de leurs missions industrielles, stages de fin de formation ingénieurs.

Ingénierie-système

Ma participation à un groupe de travail de l'AFIS et l'évolution du référentiel emploi/compétence de l'ENSGSI ont été des opportunités pour proposer à l'équipe pédagogique de l'école de renforcer le thème d'« ingénierie organisationnelle » par la création d'un nouveau pôle d'enseignement en ingénierie-système. Cette thématique se justifiait par la proximité de ce qui fonde l'ingénierie-système en termes de pensée système et de projets multidisciplinaires avec ce qui est le cœur de métier de l'ENSGSI en termes de vision systémique et de pilotage de projets complexes. Tout en assurant l'animation de ce nouveau pôle avec mes collègues, j'ai conçu et mis en œuvre en complément des modules déjà existants un module dédié spécifiquement aux concepts, méthodes, modèles, normes et outils de l'ingénierie système basée sur les modèles (ISBM) avec le même objectif de déploiement par les étudiants de cette compétence dans les projets et missions industrielles. A l'issue d'une formation de formateurs à l'ingénierie de systèmes multidisciplinaires²⁶, j'ai choisi d'intégrer le langage SysML (System Modeling Language) dans les compétences à acquérir par les étudiants pour unifier et partager des connaissances multidisciplinaires. Afin de rendre cette formation collaborative plus participative, j'ai choisi de diminuer significativement la part de cours

²⁶ Formation dispensée par Alain Faisandier de MAP système, <https://www.sinergycom.net/>

magistraux en amphithéâtre afin de privilégier la pratique par des travaux dirigés ponctués de cours « flash » portant sur les fondamentaux de l'ingénierie système et la modélisation d'entreprise dont la durée n'excède pas une demi-heure.

En 2015, cette formation à l'ingénierie système a permis à l'ENSGSI tout comme au master ISC d'être intégré au répertoire international des universités et établissements d'enseignements de l'INCOSE reconnaissant ainsi la qualité de leurs formations en « ingénierie système ».

Dynamique des systèmes

En complément de cours en génie systémique, j'ai récemment introduit la dynamique des systèmes pour faire un pont entre le penser système et l'ingénierie-système. L'objectif de cet enseignement est d'ouvrir l'esprit des étudiants au concept de situations au-delà de la frontière a priori prescrite en ingénierie de projets, voire circonscrite, par exemple en SysML au sujet d'étude. La capture de la dynamique de situations progressivement complexifiées s'appuie largement sur un patron de modélisation systématisant la recherche d'une boucle de renforcement (déséquilibre) moins visible à partir d'une boucle d'équilibre plus visible à partir de ce qui désiré (exigences).

Ateliers pédagogiques

Je m'implique chaque année dans les ateliers d'appréciation du potentiel par simulation qui ont pour objectif de mettre les étudiants en situation plausible de projets afin d'observer puis évaluer leurs aptitudes managériales. Leur restitution leur permet de mesurer l'évolution de leur démarche personnelle de développement et de leurs acquis. Je suis également sollicitée depuis quelques années pour participer à l'équipe d'animation du challenge de créativité « 48 heures pour faire vivre des idées® » qui est un dispositif pédagogique spécifique à l'ENSGSI avec pour objectif principal de favoriser l'ouverture à l'innovation et son déploiement en entreprise, tout en initiant les étudiants aux outils et méthodes stimulant la créativité et les étapes amont de l'innovation.

Projets industriels

Enfin, conjointement à mes enseignements, j'assure, chaque année, le tutorat pédagogique de projets industriels effectués par les étudiants de la 1^o année et de la 2^o année du cycle ingénieur ENSGSI. Je participe également au suivi pédagogique des élèves de 3^o année ingénieur lorsqu'ils effectuent pendant huit mois leur mission industrielle en entreprise.

I.3.2.2. Outils-méthodes de formation

En tirant parti de mes activités au sein de l'AIPL, je me suis efforcée d'outiller tous mes enseignements, non seulement en termes de technicité de l'outil-méthode lui-même mais aussi par rapport à son usage en modélisation-système. Pour illustration :

- Orchis : Au-delà de la méthode SADT sous-jacente de management de projets, un accent particulier a été mis sur l'appel à mécanisme d'une fonction pour assurer la cohérence d'une décomposition à partir d'un modèle de contexte selon la démarche préconisée par (Lhoste 1994).
- Hopex : l'outil-méthode initial MEGA pour MERise-GAMMA et ses déclinaisons technico-commerciales successives a permis de « systémographier » une situation applicative par projection à des niveaux conceptuels, logiques et physiques d'un méta-modèle de référence d'un système d'information. Dans les faits, l'utilisation par projection isomorphique de ce méta-modèle pour faire un modèle applicatif a permis de bien illustrer la relation homomorphique entre une situation visée et la représentation ciblée de sa faisabilité.
- Norma : Outre le mécanisme de substantivation aidant à concrétiser le principe d'émergence-système, la méthode NIAM sous-jacente permet de bien former des exigences sous forme sujet-verbe-complément pour lever les ambiguïtés linguistiques d'un langage naturel non binaire (par exemple, les conjonctions de lieu, de temps, etc.).
- Adonix : Pour satisfaire la demande croissante de sensibilisation des étudiants aux progiciels de gestion d'entreprise de type ERP, une action collective de formation de formateurs autour de cet outil a permis de développer une compétence de formation interuniversitaire en modélisation d'entreprise.
- IBM Rhapsody : l'objectif est de relier via des scénarios exécutables sous forme principalement de diagrammes de séquences les multi-diagrammes (d'exigences, de cas d'utilisation, de state-charts, ...) d'une spécification SysML.
- Stella : l'objectif est de vérifier par exécution la dynamique d'un modèle de situation sous forme d'un diagramme de stock-flow à partir d'une relation essentielle désignée par le produit circulant afin de confiner l'explosion combinatoire des faits concernés.

I.3.2.3. Collaborations de formation

A l'université de lorraine

ISIAL

Mon implication dans le DESS MPIIS m'a conduit à participer à des enseignements dans le cadre des séminaires en modélisation d'entreprise de l'ISIAL (Institut d'Informatique et d'Automatique de Lorraine) fédérant 13 DESS des quatre Universités lorraines dont le DESS MPIIS de l'INPL. Cette collaboration m'a amené à intervenir dans l'unité d'enseignement « ingénierie intégration système » de la spécialité professionnelle « Mesure Information Certification » du master « Information Numérique en Entreprise » cohabilité par l'université Henri Poincaré et l'université de Nancy 2.

Ingexys

La reconnaissance, en 2012, d'une compétence en ingénierie écosystémique dans la stratégie de formation du contrat quadriennal 2013-2017 de l'université de Lorraine a conduit à la conception et la mise en œuvre des Ateliers Ingexys pour former des étudiants de spécialités de master à une vision systémique de conception-ingénierie-usage de produits (biens et/ou usages) dans une dimension projet et une dimension environnementale forte. La spécificité de ces Ateliers Ingexys implique de constituer une équipe pédagogique multidisciplinaire à laquelle je participe depuis le début pour sa conception et pour son animation conjointe, de par ma compétence en pensée système et en ingénierie système. Parce que le pilotage de projets en milieu multi-acteurs, multi-échelles est perçu comme complexe, l'objectif de ces ateliers est de faire travailler de manière collaborative des étudiants de disciplines différentes (ingénierie, design, QSE, procédés, territoires, ...) sur des situations concrètes avec des partenaires sociaux-économiques. En 2013, lors de la réhabilitation de la spécialité MIDI du master design global, j'ai intégré ces ateliers comme une EC multidisciplinaire de la formation à laquelle ce sont associées le master ISC et le master INDD de l'université de Lorraine. En 2017, j'ai pris la responsabilité de l'EC Atelier Ingexys dans le cadre de l'évolution de la spécialité MIDI vers la spécialité IDEAS du master Design (anciennement Design Global).

A l'international

Erasmus-mundus

Cette collaboration a vu le jour en 2013 lors de création et de l'enseignement du module « systems engineering » dans le cadre du master PERCCOM puis GENIAL, crée et dirigé par Éric Rondeau puis Jean-Philippe Georges, professeurs à l'université de Lorraine. Outre l'application du génie

systemique à l'économie circulaire²⁷, ma collaboration avec mes collègues du master ISC m'a amenée à faire d'un cas d'étude sur le confort au travail appelé HUMIDEX, la situation d'apprentissage collaboratif à l'ingénierie-système et en parallèle un cas de recherche.

Programme d'échange

Le projet « franco-sud-américain »²⁸ de l'ENSGSI en ingénierie de l'innovation appliquée aux produits, aux processus et à la stratégie d'entreprise » a été une opportunité de concevoir et animer un enseignement en « systems engineering and integration » pour les étudiants de l'université nationale de Cuyo à Mendoza en Argentine dans le cadre de leur formation de master en génie industriel. Dans ce même projet, j'ai également participé à l'animation du challenge de créativité « 48 heures pour faire vivre des idées® » dans sa version internationale, respectivement à l'université nationale de Cuyo (Professeur Raymundo Forradaella) et l'université de Santiago do Chile, Chili (Professeur Miguel Alfaro).

I.3.3. Enseignement en cycle D

En 2000, j'ai été sollicitée par l'École Doctorale 410 RP2E à l'INPL pour mettre en place un module scientifique ciblé (MSC 9) « modélisation des systèmes » devenu MS22 « modélisation de systèmes complexes » dans le cadre de la formation des doctorants inscrits dans cette école, intégrée désormais dans la nouvelle école doctorale 608 SIMPPÉ (Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie) de l'Université de Lorraine.

Cette formation à la recherche présente trois particularités majeures qui m'ont amené à la concevoir de manière « innovante » à partir de mes activités de recherche en « pensée système » et « modélisation centrée système » :

- D'une part, cette formation est destinée à des étudiants essentiellement en 2^o année de doctorat, possédant de ce fait une bonne connaissance de leur sujet de thèse mais aussi du contexte dans lequel s'inscrivent leurs travaux. La formation que j'assure doit donc leur apporter une vision différente de leurs recherches sans pour autant en perturber leurs déroulements. Cette formation ne doit pas être non plus une vulgarisation de la « pensée système » et de la « modélisation centrée système » puisque son objectif est de permettre aux étudiants d'acquérir une connaissance

²⁷ A l'origine avec la fondation Ellen MacArthur, <https://ellenmacarthurfoundation.org>

²⁸ Ce projet, avec l'Universidad Nacional de Cuyo (Mendoza- Argentina) et l'Universidad de Santiago de Chile (Chili), a été obtenu par l'ENSGSI de 2008 à 2012 dans le cadre des programmes FITEC (France Ingénieurs TEChnologies) soutenus par le ministère des Affaires étrangères et européennes et le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et mis en œuvre par la Conférence des Directeurs des Écoles Françaises d'Ingénieurs.

multidisciplinaire centrée système en termes de concepts, théories, modèles, méthodes, langages et outils,

- D'autre part, le public de cette formation est de-facto multidisciplinaire à l'image des mentions de doctorat de l'école doctorale RP2E puis SIMPPÉ : énergie et mécanique, génie des procédés et des produits et des molécules, génie des systèmes industriels, procédés biotechnologiques, sciences du bois et des fibres. De plus, de manière récurrente, des doctorants d'autres écoles doctorales comme l'école doctorale IAEM (Informatique, Automatique, Électronique-Électrotechnique et Mathématiques) viennent suivre cette formation du fait de la spécificité de leur sujet de doctorat dans un contexte, par exemple d'industrie 4.0 ou de systèmes automatisés,
- Enfin, les cadres dans lesquels se déroulent les études doctorales de ces étudiants sont soit ceux d'une entreprise dans le cadre de thèse CIFRE possédant ainsi une expérience industrielle de leur recherche, soit ceux d'un laboratoire de recherche dans le cadre de thèses financées par des institutions possédant alors une expérience académique de leurs travaux.

Ainsi, au fil des années de cette formation, j'ai pu conforter par la pratique ma conviction que la notion de système est utilisée comme un modèle commun de compréhension d'une certaine complexité de la réalité (au sens de (von Bertalanffy 1968)) partagée par différentes parties prenantes d'un même domaine de connaissance multidisciplinaire ou de domaines interagissant entre eux. Ainsi, les objets d'étude des doctorants sont variés qu'ils soient relatifs à l'extraction de pétrole offshore ou à celle de l'uranium, aux smart-cities ou à la conception de systèmes automatisés de production, à la compréhension des écosystèmes dans lesquels vivent certaines faunes et/ou flores mais aussi à leur pollution par l'homme, ...

J'ai ainsi architecturé la formation autour de cette notion de système afin de permettre aux étudiants d'explorer le penser système et de le mettre en pratique par une modélisation centrée système visant leur sujet particulier. Pour cela, le patron de conception d'un système complexe, enrichi par la progression de mes activités de recherche, agit comme une colonne vertébrale du procédé de modélisation du contenu de mon enseignement, qui lui-même devient la colonne vertébrale permettant aux doctorants d'appliquer la modélisation centrée système à leurs cas particuliers. Pour cela, j'ai utilisé dès le lancement de cette formation particulière les ressources de l'AIPL. Tout en leur faisant acquérir scientifiquement des compétences transverses en méthodes, modèles, langages et outils de modélisation centrée système, l'objectif de ce module depuis son début jusqu'à aujourd'hui est de sensibiliser les étudiants à l'autre vision scientifique qu'est la science des systèmes.

En 2017, à la suite de la labellisation par la CDEFI d'un parcours de formation "compétences pour l'entreprise" (CPE) du Collège Lorrain des Écoles Doctorales (CLED) de l'université de Lorraine, j'ai été sollicité pour développer et enseigner un module supplémentaire intitulé « Approches globales de modélisation ». Cette formation favorisant un rapprochement entre doctorat et formation d'ingénieurs est un nouveau défi puisqu'elle est destinée à des doctorants de domaines de connaissance relatifs aux sciences humaines. Les étudiants de la première promotion de ce parcours ont soutenu leurs demandes de label en juillet 2018 devant le jury CPE auquel je participe.

I.3.4. Conclusion

Mon activité pédagogique a été en moyenne de 1,25 équivalent service au cours des années. Ce tableau synthétise une cartographie récente par nature et niveau d'enseignement. Une partie d'ingénierie dédiée aux systèmes d'information a migrée en ingénierie-système au fil des réhabilitations. A cela s'ajoute ma participation chaque année au jury de recrutement, pour le cycle ingénieur de l'ENSGSI, d'élèves issus du Concours Communs Polytechniques (GPGE, PSI, PC, PT, TSI) ainsi que pour le master Erasmus-mundus.

Nature	Niveau			Volume
	L	M	D	
Génie systémique		X	X	40
Intégration-systèmes d'information	X			60
Ingénierie-système		X		60
Dynamique des systèmes		X	X	40
APS	X	X		10
Projets et missions industriels	X	X		40

CHAPITRE II :

PROJET SCIENTIFIQUE DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT

II.1. INTRODUCTION

J'ai été immergée dès mes études supérieures en MST ACN (1987) dans le paradigme d'intégration par les technologies d'un système productique à l'AIPL. Cet écosystème qui demeure le socle de mon métier m'a permis d'acquérir un certain nombre de compétences en modélisation-système dans le domaine productique puis au fil du temps de prendre conscience d'autres limites dès lors que l'on s'intéresse, au-delà de situations d'état logique discret, à des situations d'état d'énergie discret d'autres domaines liés notamment à la plateforme LF2L²⁹. D'autant plus, que certains travaux (Bouffaron 2016; Koné 2021) m'ont sensibilisée aux limites d'une intégrité logique de contrôle en regard d'une conduite d'un système par un humain, en d'autres termes de la place du système non seulement dans la boucle d'ingénierie mais aussi dans la boucle de son environnement naturel.

En conséquence, cette intégrité-système (wholeness) m'est apparu trop subordonnée au seul processus d'ingénierie multidisciplinaire d'un système-projet pour rendre compte de la dynamique environnante des situations avec lesquelles un système s'intègre.

(Grothendieck 1986) ... Ce qui fait la qualité de l'inventivité et de l'imagination du chercheur, c'est la qualité de son attention, à l'écoute de la voix des choses. Car les choses de l'Univers ne se lassent jamais de parler d'elles-mêmes et de se révéler, à celui qui se soucie d'entendre.

Sans aller aussi loin, la question de ce qui fait la cohérence-système (togetherness)³⁰ de l'intégrité d'un système ou d'un SdS^{31,32} dans un ensemble de situations examinées comme un système, dénommé situation-système par (Lawson 2010), est devenue le fil conducteur de mon projet de recherche en continuité des travaux précédents.

²⁹ Lorraine Fab Living Lab, plateforme du laboratoire ERPI et de l'école ENSGSI, <https://lf2l.fr/fr/>

³⁰ « a feeling of being intimate and belonging together » dans wordnet, <http://wordnetweb.princeton.edu/>

³¹ Labex Maîtrise des systèmes de systèmes technologiques (MS2T), <https://www.labexms2t.fr>

³² Système réfère dans la suite du mémoire aussi bien à un système conventionnel qu'à un système de systèmes puisque ce n'est plus le management par l'information tel que présenté précédemment ou par les technologies qui est le vecteur d'intégration dans cette partie.

Cette question soulève celle complémentaire de l'orchestration interdisciplinaire d'un système-projet en regard de la dynamique d'une situation-système entre deux réalités, l'une d'exploitation et l'autre d'ingénierie.

Je m'attache à répondre à ces question scientifiques (Figure 14) en distinguant mon apport direct à des travaux collaboratifs en cours qui, par essence « ingénierie-système », sont à des niveaux de maturité TRL³³ 2-3 et TRL 3-4. A titre individuel, ma perspective TRL 1-2 est de formuler ce concept de cohérence-système dans la cadre de la théorie des catégories.

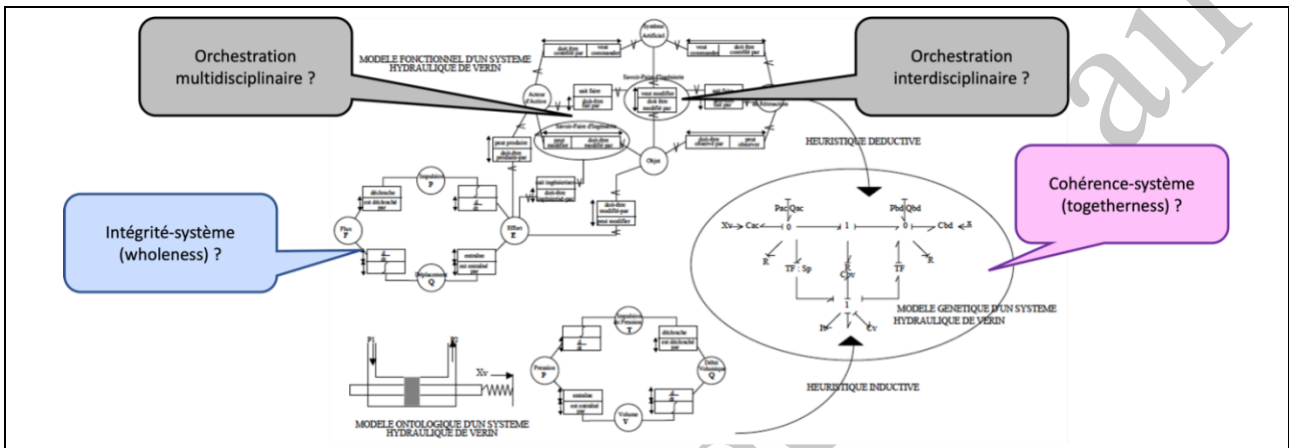


Figure 14: projection des questions scientifique du projet de recherche et d'enseignement sur le méta-modèle originel d'intégrité-système.

II.2. FONDEMENT SCIENTIFIQUE DU PROJET DE RECHERCHE

II.2.1. Préambule

Les recherches « Design for resilience » (Levalle and Nof 2017) et « Design for the unexpected » (Valckenaers and Van Brussel 2015) soulignent la difficulté à capturer ce qui ancre de manière tangible des systèmes à grande échelle tels que les systèmes de production et de logistique dans leur réalité opérationnelle.

(Levalle and Nof 2017) ... Therefore, design for resilience is becoming essential to enable systems to maintain an acceptable level of performance, even when challenged by unexpected events, and continuously adapt to a dynamic environment

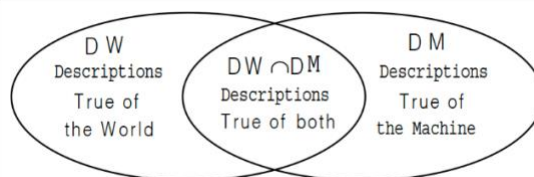
...

³³ Technology readiness level, <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/Defis-du-CEA-infographie-echelle-trl.pdf>

(Valckenaers and Van Brussel 2015) ... Overall, research results allow to develop systems while facing uncertainty about the future requirements that they will need to cope with. It provides guidelines for the design of complex systems that can deal with unexpected disturbances and presents a decentralized control methodology that goes far beyond the traditional hierarchical control approach that currently prevails. ...

S'étendant au-delà du champ de vision courant de l'ingénierie au sens « known-knowable » du cadre Cynefin (Kurtz and Snowden 2003), la réalité naturelle environnante d'un système devient trop vaste pour que nous en connaissions de manière directe ses influences sur les conditions opérationnelles, avec pour conséquence de ne pas pouvoir se prononcer sur la réalisation complète de leur intégrité-système (Kuras 2006). Ce qui souligne la limite de la description courante en « isolation » du contrôle de cette wholeness à priori en regard de futures exigences de maintien de celle-ci vis à vis de l'incertitude et de l'inattendu, impliquant d'autres paradigmes hétérarchiques de contrôle d'un système, comme ceux du « decentralized holonic control » (Van Brussel et al. 1998), du « viable system model » (Beer 1984) ou du « product-driven control » (McFarlane 2003; Morel et al. 2007b; Herrera 2011). Il importe de remarquer que ce dernier paradigme change la logique de contrôle courante, par le produit circulant, d'un système à état logique discret (Zaytoon and Riera 2017) et, comme nous le développons dans cette partie, d'un système à état d'énergie discret par la matière-énergie circulante.

J'interprète en conséquence l'intégrité d'une spécification-système dans le cadre de l'approche des « problems frames » en génie logiciel (Figure 15) en considérant ce qui n'est pas suffisamment partagé *Togetherness* {*eh, sh*} de ce qui est couramment partagé *wholeness* {*sv ∩ ev*}.



(Jackson 1995) ... The requirement is in the world ; the machine is the solution we construct ... Specifications are concerned solely with the shared phenomena by both the world and the machine Optative requirement expresses what we desire to be true, the effect that our system is to bring about in the world... ... Indicative requirement expresses what we assert to be true of the world, regardless of the behavior of the system we are building ...

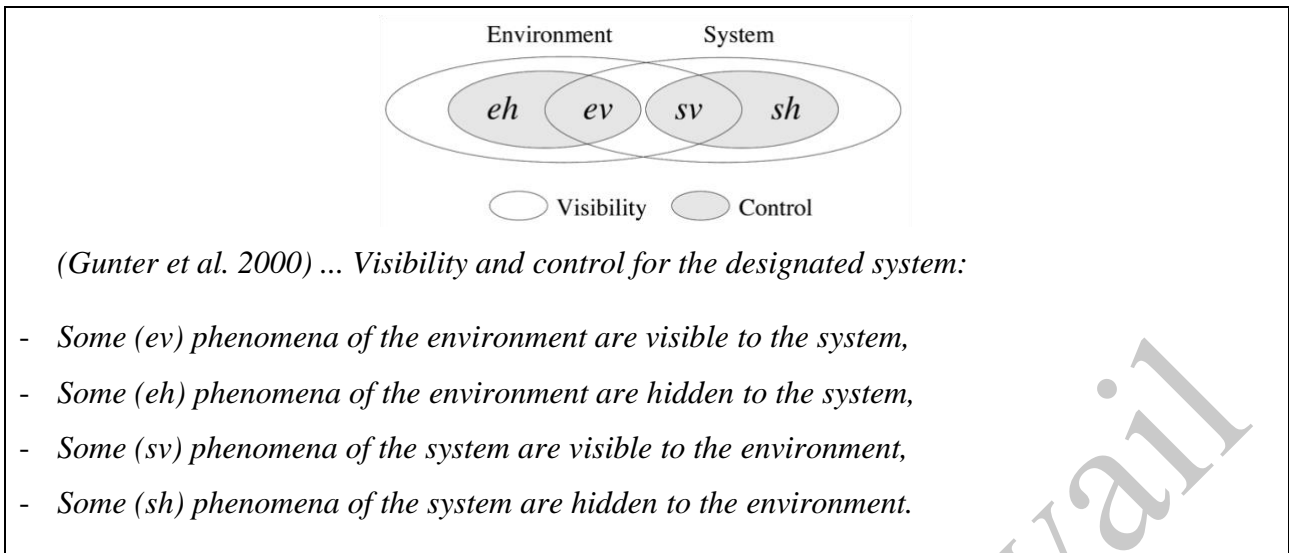


Figure 15 : Interprétation de l'intégrité d'une spécification-système

Ce qui souligne que ce sont les phénomènes physiques qui déterminent la tangibilité de l'intégrité-système en tant que sources primaires de mesurabilité des propriétés d'exigences pour vérifier et valider une spécification d'exigences (Figure 16). Et que le concept d'interaction entre objets d'intérêt d'une situation-système ne suffit pas à en spécifier la cohérence-système en regard d'autres objets de moindre intérêt à priori.

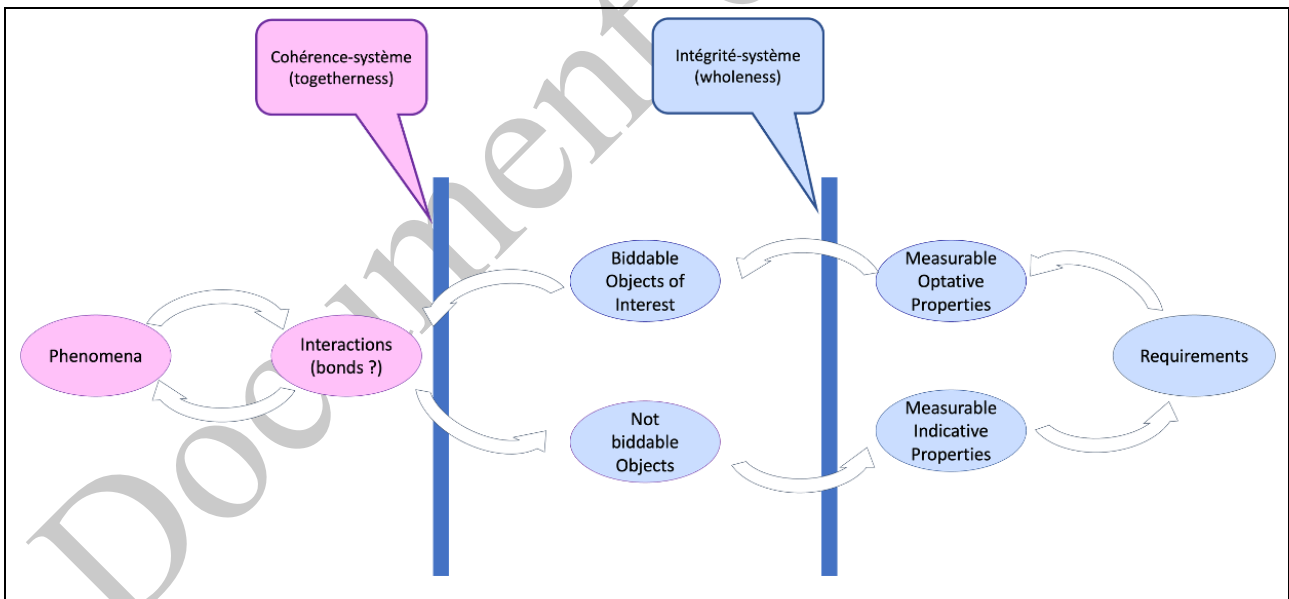


Figure 16: Frontières d'un processus de spécification d'une situation-système (Mayer 2018)

Ces travaux révèlent à mon sens la limite d'un processus d'orchestration multidisciplinaire se focalisant sur le pilier d'architecture-système orientée solution au détriment de ce qui fait le pilier de cohérence-système visé en exploitation.

(SEBoK Editorial Board 2020) ... Perhaps the most fundamental concept in systems modeling is abstraction, which concerns hiding unimportant details in order to focus on a few vital characteristics in order to be computationally and intellectually tractable. The model's depth indicates the coverage of system decomposition from the system context down to the system components ...

Dans le cadre d'une logique d'analyse et de conception de systèmes et de leurs effets (Ducrocq 1960; Paynter 1961) dans le domaine de la physique, l'examen de cet ancrage permet d'argumenter qu'il est entièrement déterminé par la connexité³⁴ résultante des liens entre objets (« bond ? » en Figure 16) induits par l'énergie transférée entre l'environnement et un système, formant de fait une cohérence-énergétique d'une situation-système. En ce sens, mon projet scientifique d'ancrage d'une intégrité-système (wholeness) dans la réalité d'une cohérence-énergétique (togetherness) m'a conduit à considérer la relation de modélisation-système comme une relation de congruence, au-delà de l'acte courant.

(Louie 2009) ... Modelling is the art of bringing two entailment structures into congruence ...

En conséquence, je postule que la réalité tapissée de situations dans laquelle réside un système et le système-projet multidisciplinaire associé sont congrus par l'existence d'une situation-système cadrant et modélisant d'un seul tenant interdisciplinaire :

- La « Cohérence-Énergétique » (togetherness) d'un ensemble de situations dans la réalité opérationnelle que je nomme désormais réalité expérientielle au sens perçue et vécue de manière tangible,
- L'intégrité-système (wholeness) d'un système résultant de la réalité d'ingénierie que je nomme désormais réalité construite au sens conçue par un système-projet.

(Claeys 2013)... Le réel vécu ... Son existence est consciemment partagée, mais il ne peut être appréhendé qu'indirectement à partir des règles phénoménologiques. Le réel est à distinguer des réalités, dans le sens où il est indifférent à toutes les (re)présentations élaborées par le (co)concepteur qui gère celles-ci à travers les filtres cognitifs et autres réductions qui les affectent inévitablement

³⁴ Que je distingue de connectivité, voire d'interopérabilité, à connotation plutôt architecturale.

... La réalité conçue ... un niveau de réalité augmentée qui émerge à partir d'une boucle pro/inter/rétroactive activée par les opérations cognitives de projétation et d'interprétation entre le contexte et l'esprit (culture) qui met en jeu des concepts. À partir de l'(in)conscient, cette boucle est productrice de sens : c'est le niveau conception du réel augmenté de l'individu ...

Le corpus scientifique de mon projet vise à translater pour l'ingénierie-système (Berthoz 2014) la capacité humaine de simplicité à trouver des alternatives, par détour de règles simples, pour faire face à des situations-système que les modèles n'ont pas saisies (Fraisopi 2014; Fliess 2022).

(Fraisopi 2014) ... Ce que les modèles n'arrivent pas à saisir, c'est la dimension phénoménologique dans laquelle le vivant « habite » et « décide » au sein même de la complexité (une complexité concrète, incarnée, et toujours excédentaire par rapport à la dimension épistémique de sa modélisation).

(Fliess 2022)... Les systèmes sont trop complexes pour être décrits avec des équations ...

Il s'est construit au gré d'éléments essentiels de la littérature scientifique concernée et d'éléments applicatifs d'un travail collaboratif dont des extraits pertinents sont issus de trois documents :

- System-centered Specification of Physico-physiological Interactions of Sensory Perception (Dupont et al. 2019b),
- System control of situations perceived by their simplicity: case-study and open-issues (Mayer et al. 2020),
- Outline on situation-system energy togetherness: case-studies and open issues (Mayer et al. 2022).

Imprégnée de l'esprit de la TC et pour illustration de ma démarche, une première règle simple est d'oublier les détails de l'intégrité-système (wholeness) qui était le crédo de mes activités scientifiques pour ne me concentrer que sur la relation de modélisation de ce qui fait la cohérence-énergétique (togetherness) d'un ensemble de situations. Une deuxième règle simple est d'adopter un raisonnement d'abduction (Marquis 1991) à partir de convictions de membres des groupes de travail nous conduisant à formuler l'hypothèse que l'objet circulant (produit discret ou matière-énergie) est la source de cette cohérence-énergétique.

II.2.2. Corpus scientifique

II.2.2.1. Relation de modélisation d'une situation-système

Notion de situation

Dans ses travaux, (Penalva 1997) fait à juste titre remarquer qu'il vaudrait mieux considérer un système comme perçu en situation complexe. J'ai pris plus particulièrement conscience de la nécessité de formaliser cette notion de situation à l'occasion de l'organisation des conférences plénières invités du symposium IFAC ASBoHS³⁵ en 2006, notamment celle de (Galara 2006), qui nous avait alertés dans les projets européens dès 1998, sur la difficulté pour les opérateurs de percevoir à un certain moment des situations d'état logique résultantes de séquences de causalités à travers le temps.

Cette unité de conceptualisation d'une portion tangible de la réalité, à l'instar de système, fait l'objet de nombre de débats non décidables sur ce qui la caractérise. J'en retiens :

(Zask 2008) ... Appelons « situation » tous les moments au cours desquels l'interaction entre un vivant et un milieu s'effectue sous la forme d'une action réciproque. En revanche, réservons le mot « contexte » aux moments menant à la conformation passive du premier aux conditions du second. Au plan organique, la distinction entre milieu et environnement fait écho à tout ceci : un milieu « entoure » l'individu mais n'est pas défi ni de sorte à inclure les modifications que les organismes lui font subir. En revanche, un environnement est constitué par l'ensemble des conditions qui interviennent dans le développement des capacités de l'individu au titre de moyen ou de ressources. Un environnement relève donc d'une situation ...

L'ingénierie système fait de la notion de situation une recommandation-clé pour faire prendre conscience des conditions opérationnelles (CONOPS) ainsi que des facteurs humains (Endsley et al. 2003; Millot et al. 2011; Boy 2017; Vanderhaegen et al. 2021; Camara Dit Pinto 2022).

Notion de situation-système

Dans cette perspective, (Lawson 2010) fait de la notion de situation-système un artefact de modélisation-système pour coupler (Figure 17 en haut) l'intégrité d'une situation visée à contrôler

³⁵ 9th IFAC ASBoHS'06 symposium on Automated Systems Based on Human Skill and Knowledge, Nancy, France, 2006

dans la réalité opérationnelle pour satisfaire une intention humaine (Searle and Willis 1983; Lhote et al. 1999) et l'intégrité d'un système-projet de réponse organisant dans la réalité d'ingénierie un ensemble d'actifs multidisciplinaires.

(Lawson 2010) ... A situation system arises when two or more elements become related together resulting in a problem or an opportunity. Alternatively, an objective or end state that defines a desirable situation is established ...

Dans cette perspective, l'arbre du penseur système (Allegro et al. 2014)³⁶ (Figure 17 en bas à gauche et au milieu) ainsi que le conceptagon (Boardman et al. 2009) (Figure 17 en bas à droite) sont deux outils efficaces pour respectivement penser système une situation-système et construire en regard de cette réalité la complétude-système du système d'intérêt ciblé par le système-projet dans la réalité d'ingénierie (Kapsali 2013; Baron and Daniel-Allegro 2020).

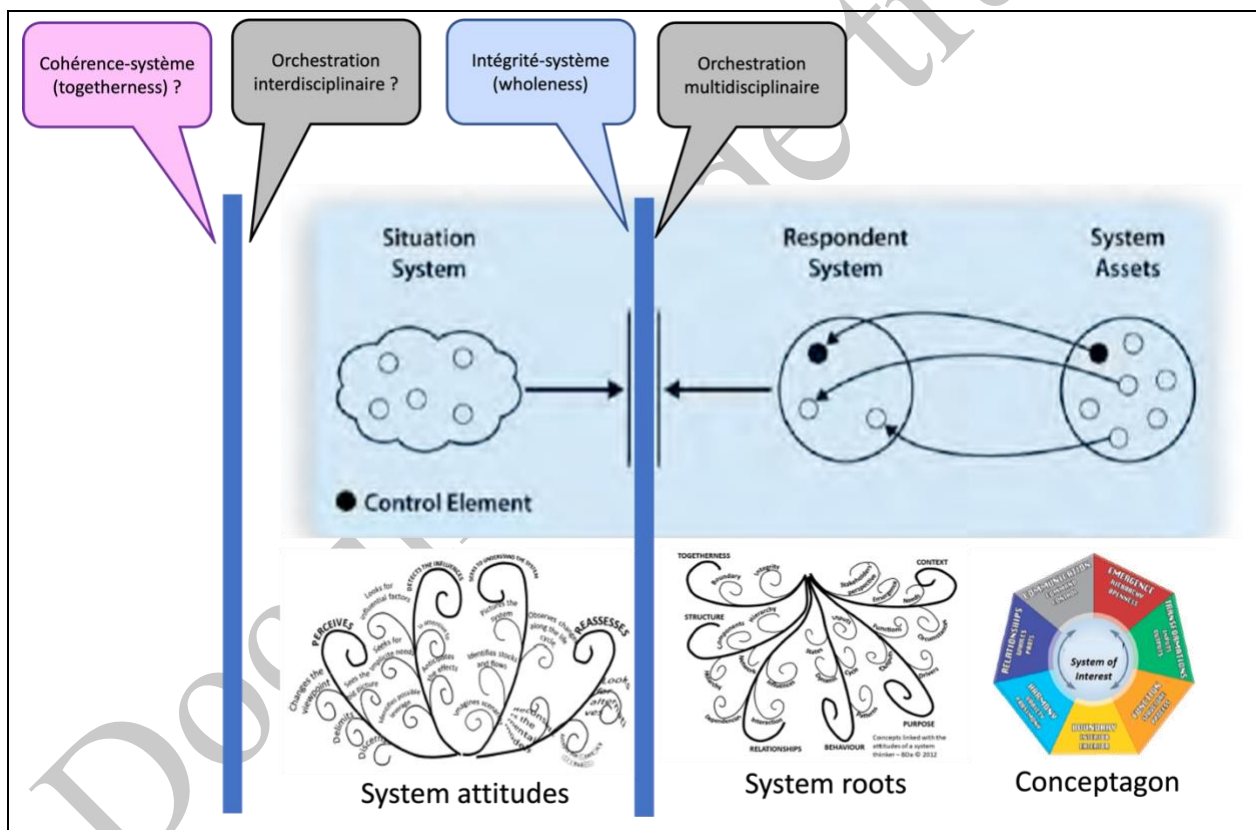


Figure 17: Interprétation des frontières de couplage pour Penser et agir système en ingénierie système

³⁶ Entretien avec l'auteur

Intégrité-système

Il n'en reste pas moins, et la tangibilité des situations de « systemic failures » (Kappenman 2003; Boardman and Sauser 2008; Hollnagel and Fujita 2013; Martin et al. 2017) sont là pour nous le rappeler, que la subordination de l'expression des exigences à la frontière délimitant couramment de façon binaire un système de son environnement masque d'autres phénomènes physiques, qui non anticipés, ne sont plus contrôlés.

(Giré 1988) ... il s'agit plutôt d'une logique quaternaire qui lie les concepts d'intérieur d'extérieur et de frontière par celui d'espace référentiel, le total, qui les réunit ...

De fait, l'intelligence humaine reste au final toujours la seule capable de contenir à posteriori ce qui n'a pas été anticipé a priori pour recouvrer un fonctionnement admis comme normal (Montmain and Penalva 1998). En ce sens, j'ai adhéré à la vision de (Bomble 2014) de faire de ces émergences l'essence du travail d'ingénierie de systèmes multidisciplinaires car, pour certaines, elles suscitent de l'innovation voire de l'invention pour ... la modélisation de nos systèmes... malgré les dégâts qu'elles peuvent occasionner.

(Bomble 2014)... Le travail de ces accoucheurs d'émergences transforme le « chien fou » potentiel et dangereux en une « machine » dont la complexité domestiquée n'est cependant pas éteinte et se trouve toujours prête à s'exprimer à partir de causes internes ou externes trop peu contraintes. Cette domestication se fait par une gestion pointilleuse de toutes les émergences se produisant à tous les niveaux de l'organigramme fonctionnel où l'on distingue quatre types d'émergences :

- *Celles voulues construites par l'intégration de celles des niveaux inférieurs grâce à l'organisation des interfaces,*
- *Celles tolérées car inévitables, dont on contient l'amplitude à un niveau jugé tolérable,*
- *Celles redoutées rendues peu probables grâce aux redondances et barrières de sécurité,*
- *Celles nouvelles qui n'apparaissent que lors des essais et qu'il faut subir et corriger si elles sont réhébilitaires.*

Il faut donc affirmer que les systèmes à dominance technique sont constitutivement complexes, mais que les bases physiques et la rigueur méthodologique des hommes leur permettent de fonctionner - même de façon autonome - de manière très prédictible, et de produire leurs émergences de façon fiable.

Ces constats ainsi que cette vision positive de la haute qualité d'une émergence, défendue entre autres par (Morin 1977), qui s'oppose à celle dans laquelle toute émergence doit être éteinte pour en éviter les contraintes (Bar-Yam 2004), m'a conduite à approfondir cette relation de couplage d'une situation-système.

Relation de modélisation-système

J'ai trouvé dans les travaux de Robert Rosen sur la biologie relationnelle, des premiers éléments pour fonder la relation de modélisation pour la Cohérence-Énergétique (togetherness) d'une intégrité-système (wholeness).

(Louie 2011)... Robert Rosen discusses and answers the question "What are the defining characteristics of a natural system for us to perceive it as being alive?". His answer, in a nutshell, is that an organism—the term is used to mean an 'autonomous life form', i.e., any living system—admits a certain kind of closure that makes it self-sufficient in a relational sense ...

(Rosen 1985) ... And once complexity is accounted for, anticipatory processes, corresponding to a comprehension of causality that transcends determinism, can be accounted for as a characteristic of the dynamics of the living ...

L'originalité des travaux de Robert Rosen est son utilisation de la notion de causalités pour caractériser les influences de causes-effets entre les éléments formant l'intégrité d'un système naturel et de la notion de causalité efficiente exprimant une fermeture à une cause « première » à partir de laquelle s'organise la dynamique d'autres causalités qui, obéissant aux lois de la physique (Paty 2004), fera de cette intégrité une unité cohérente perceptible à son environnement par sa tangibilité.

(Rosen 1985) ... Roughly speaking, a natural system comprises some aspect of the external world which we wish to study. A stone, a star, the solar system, an organism, a beehive, an ecosystem, are typical examples of natural systems; but so, too, are automobiles, factories, cities, and the like. Thus, natural systems are what the sciences are about, and what technologies seek to fabricate and control. We use

the adjective “natural” to distinguish these systems from the formal systems which we create to represent and model them; formal systems are the vehicles for drawing inferences from premises and belong to mathematics rather than science. There are of course close relations between the two classes of systems, natural and formal, which we hope to develop in due course ...

Pour cela, il faut du principe d'anticipation un modèle dont l'essence est une relation de modélisation (Figure 2.1 dans (Rosen 1985)) encodant les causalités biologiques observables et mesurables du système naturel sous la forme d'une structure mathématique d'un système formel à partir duquel des règles d'inférence pourront être elles-mêmes des prédictions de causalités non observées ou mesurées initialement sous l'assertion que décodées, elles soient vérifiées par l'observation du comportement du système naturel.

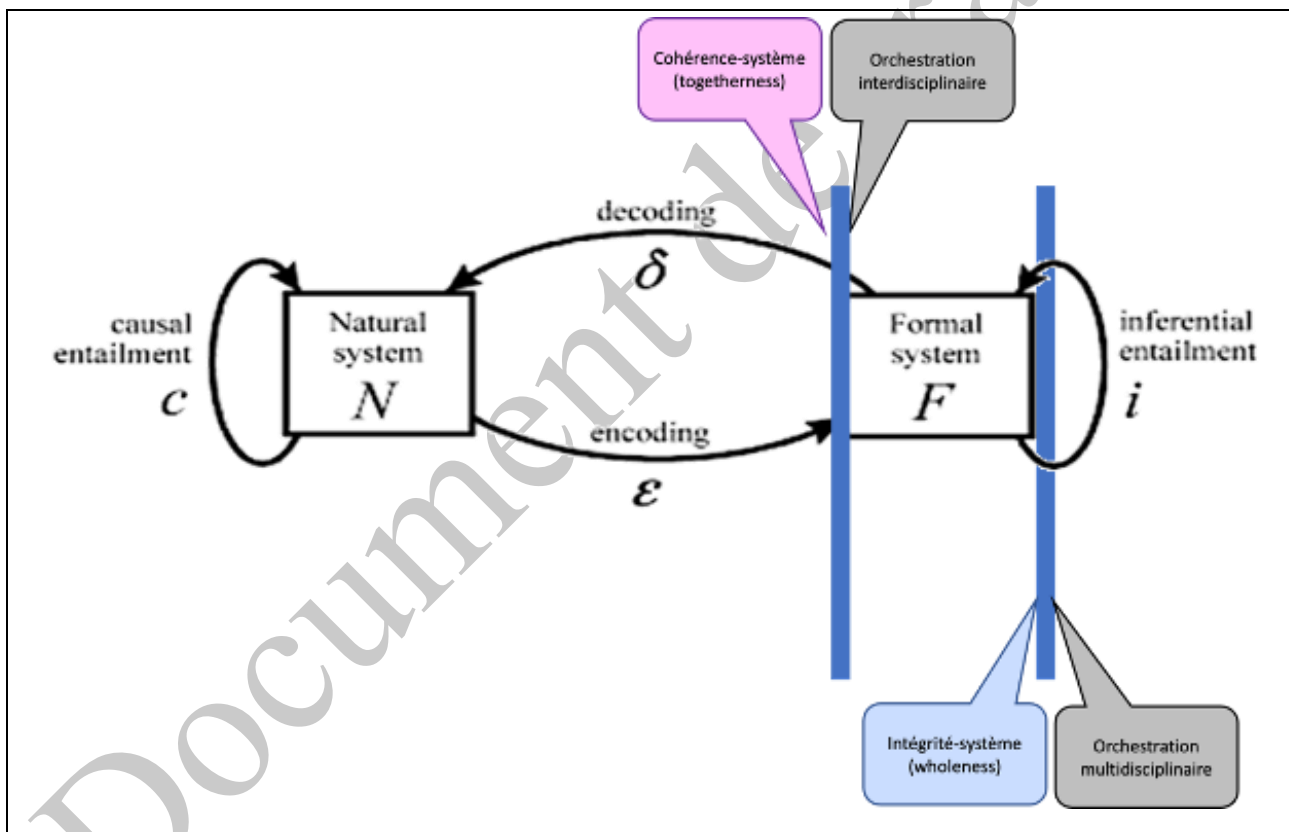


Figure 18: Interprétation des frontières de la relation d'encodage/décodage d'un système naturel de (Louie 2009)

Formalisation de la relation de modélisation-système

Robert Rosen fait de la théorie des catégories l'outil mathématique de formalisation de la relation de modélisation et en particulier de l'élément foncteur, la construction orientée préservant au sein de la relation la fermeture causale du système naturel, établissant ainsi une correspondance d'encodage

avec la structure mathématique exhibée par le système formel. Remarquons que (Luzeaux 2015), pour expliquer formellement la nature intuitive de l'ingénierie système, considère le foncteur comme un outil mathématique de traduction entre deux vues architecturales différentes, et de façon plus générale, la {TC} comme un outil de théorisation abstraite des systèmes en vue de leur ingénierie. J'ai considéré moi-même le foncteur comme l'outil de formalisation mathématique du mécanisme de substantivation mis en œuvre en (Figure 6).

La théorisation de la relation de modélisation par (Louie 2009) (Figure 18) complète la notion de causalité avec celle d'implication pour spécifier la cohérence de la fermeture causale d'un système naturel *N* (*natural system*) par une structure d'implications causales. Son encodage de manière functorielle permet de garantir que la structure d'implications inférentielles (*inferential entailment*) du système formel *F* (*formal system*), résultantes des règles d'inférence, est équivalente à la première. Une relation de modélisation existe lorsqu'il y a une congruence formelle entre les deux structures d'implication (*entailment structures*) de telle sorte que l'intégrité du système formel est congrue de la cohérence du système naturel.

Congruence-système

La transposition de ces travaux dans mon corpus consiste :

- en une première analogie entre la fermeture causale d'un système naturel et la « Cohérence-Énergétique » (*togetherness*) d'un ensemble de situations, et dans lequel réside l'intégrité d'un système (*wholeness*),

- en une deuxième analogie entre les connaissances préalables à la réalisation des règles d'inférence (Fayol 2003), et l'ensemble des actifs multidisciplinaires d'un système-projet de réponse dans la réalité construite,

- en une troisième analogie entre le système formel et la notion de situation-système résultante de l'encodage d'un ensemble de situations consistant à cadrer puis à modéliser d'un seul tenant ces unités de la réalité expérientielle et de la réalité construite.

Ce qui me conduit désormais à approfondir la question de quoi est fait la Cohérence-énergétique (*togetherness*) et comment en orchestrer l'interdisciplinarité des actifs multidisciplinaires pour que la relation de congruence puisse être établie.

II.2.2.2. Cohérence-énergétique (*togetherness*) d'une situation-système

J'ai construit avec les bonnes pratiques systémiques une représentation d'un système d'état logique discret, centrée sur l'élément de transmutation (en gris) (Mayer 1995) assurant l'intégrité-système (*wholeness*) de contrôle d'un procédé (Figure 19, à gauche). Cette intégrité-système de

contrôle est complétée dans le domaine des procédés discrets par la prise en compte de l'influence instrumentée qu'exerce directement l'intégrité {bien \wedge service} de l'élément circulant sur elle (Figure 19, à droite flèche bleue). Dans les deux cas, c'est ce flux circulant qui donne « vie » à la dynamique d'une situation-système, dépassant en cela la seule modification de l'environnement par l'intégration d'un système (Meinadier 2009).

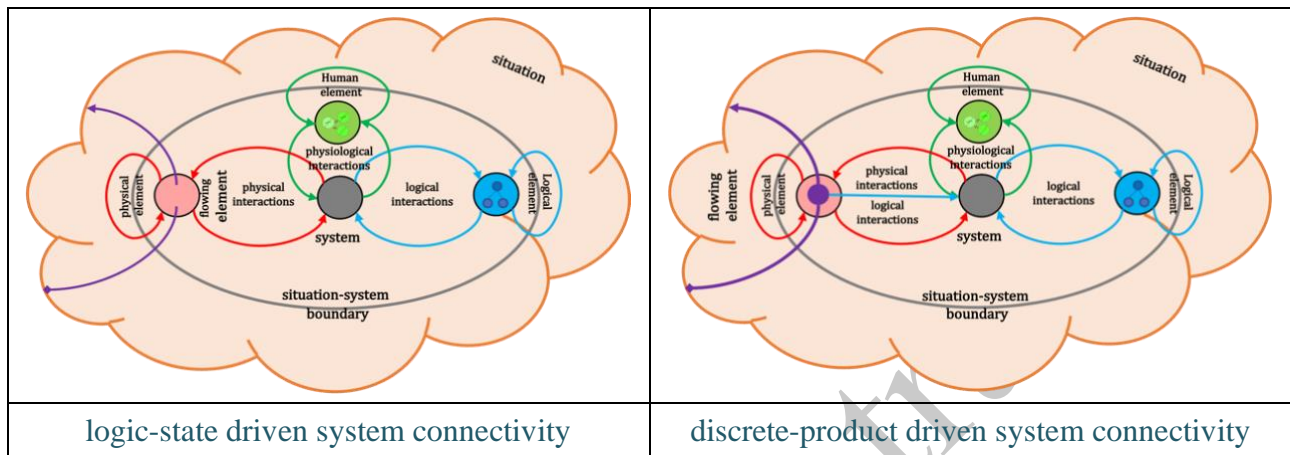


Figure 19 : intégrité d'une situation-système à état logique discret

L'opportunité m'a été donné ces dernières années de m'intéresser à ce qui fait la cohérence-énergétique d'un réseau électrique à grande échelle examiné comme un système de systèmes énergétiques dont l'intégrité-système est à synchroniser en puissance-action par la matière-énergie circulante en tant qu'élément circulant. Ce qui m'a conduit à substituer la propriété de connectivité par celle de connexité construite à partir de la réticulation de liens d'énergie (Ducrocq 1960; Paynter 1961) constitutifs naturellement de la cohérence-énergétique d'un système et à revisiter ma connaissance systémique antérieure en adoptant celle proposée par Henry M. Paynter (page 35 dans (Paynter 1961)) pour prendre en compte la dynamique de la frontière système-environnement. La partition système-situation tient ainsi compte des transactions énergétiques exogènes depuis le milieu extérieur (ports en rouge) ou endogènes (au milieu, dissipation, stockage) dans le milieu intérieur (Figure 20, à gauche « astéroïde » en croisillons rouges). Une conséquence importante est que l'intégrité-système de l'architecture en tant que concept central de l'ingénierie système est évolutive en fonction de mouvements d'énergie, déclenchés par la matière-énergie circulante (flèche en violet) qui forment ou déforment la connexité d'un système. Bien que ces liens d'énergie soient constitutifs de la modélisation d'un procédé physique (Rahmani et al. 1997), l'implémentation d'une intégrité-système (wholeness) complétée par les éléments humains et logiques, voire même par l'élément circulant, dans cet « astéroïde » ne garantit pas une cohérence-énergétique (togetherness) d'un système comme développé en II.2.3.3. (Figure 20, à droite).

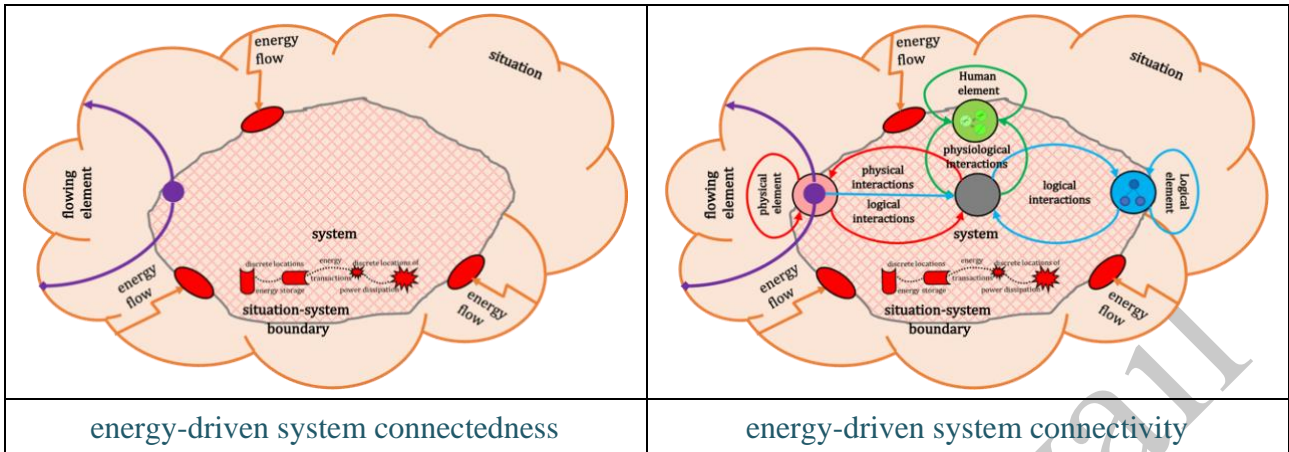


Figure 20 : intégrité d'une situation-système à état d'énergie discret

Ce qui revient à dire que l'élément de transmutation, précédemment vecteur des interactions d'une intégrité-système, doit être vecteur des liens d'énergie de sa cohérence-système (Figure 21, à gauche). En conséquence, en regard de mon interprétation de la relation de modélisation (Figure 18), j'en fais la source de l'orchestration interdisciplinaire d'inférences multidisciplinaires (Figure 21, à droite) pour cadrer une situation-système et en modéliser la dynamique dont le contrôle implique des éléments logiques, humains et physiques qui sont eux-mêmes sources-puits de causalités endogènes ou exogènes.

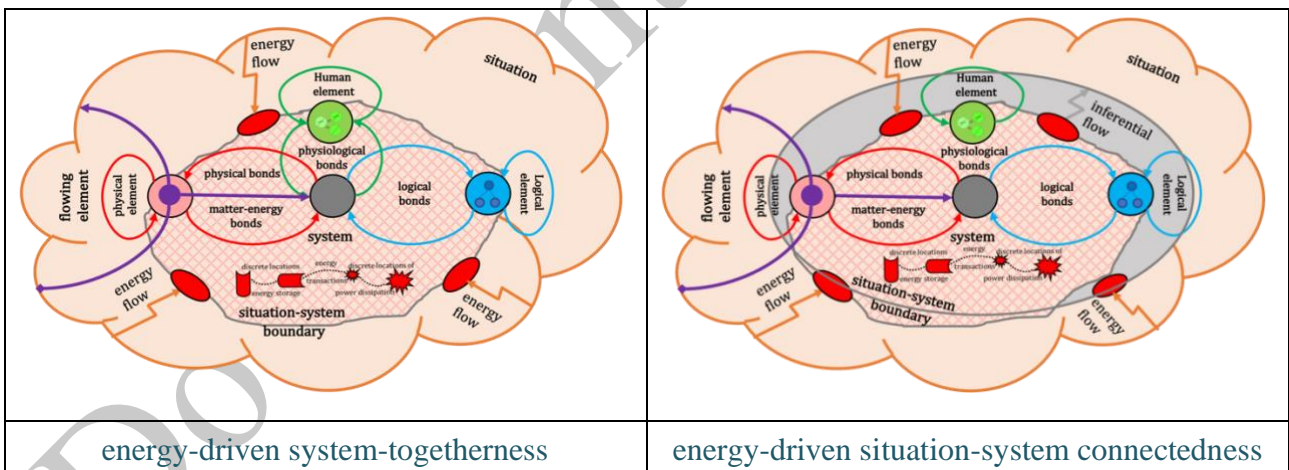


Figure 21 : cohérence-énergétique d'une situation-système axée sur la matière-énergie circulante

Il a été montré dans le domaine de l'énergie l'intérêt d'embarquer dans des composants-système (IAMS) une certaine « intelligence technique » pour filtrer les interactions physico-physiologico-logiques entre un procédé et une organisation-système de contrôle, de maintenance et gestion technique (CMMS) distribuée autour d'un bus de terrain. Bien qu'abouti dans les travaux de doctorat de (Bouffaron 2016), ce patron architectural CMMS-IAMS ne prend qu'indirectement en compte le « comportement » de la matière-énergie circulante (en violet) à certains moments « synchroniques »

d'états logiques d'un situation-système (Figure 22), par exemple un son dans un tuyau ou une cavité par un opérateur de terrain. En effet, cette « intelligence technique (nuage gris) » construite (wholeness) ne représente cependant qu'une partie de la situation-système à contrôler (togetherness) en regard du comportement d'« intelligence naturelle (nuage violet) » que la matière-énergie circulante peut manifester par elle-même (cf. II.2.3.3). Il est envisagé qu'une propriété dite {cyberneconduction Ω }³⁷ de la matière-énergie circulante soit estimée $\{\Delta\Omega/\Delta t\}$ en raison de son action informante pour calculer la commande $\{u_\Omega\}$ d'une boucle d'équilibre $\{B_\Omega\}$ à partir d'une consigne prévisionnelle $\{u^*\}$. Cette boucle reflète la dynamique énergétique de la situation-système ciblée à travers le bus numérique (en bleu), soit en conduite de la fonction de contrôle-commande CMMS, soit en commande directe de la fonction d'actionnement et de mesure intelligent IAMS qui a une action formante sur la matière-énergie circulante en plus de celle qu'elle a sur le procédé. De façon plus générale, cela contribue à refléter la dynamique du monde d'intérêt environnant au sens « intelligence » d'(Albus 1991; Valckenaers and Van Brussel 2015).

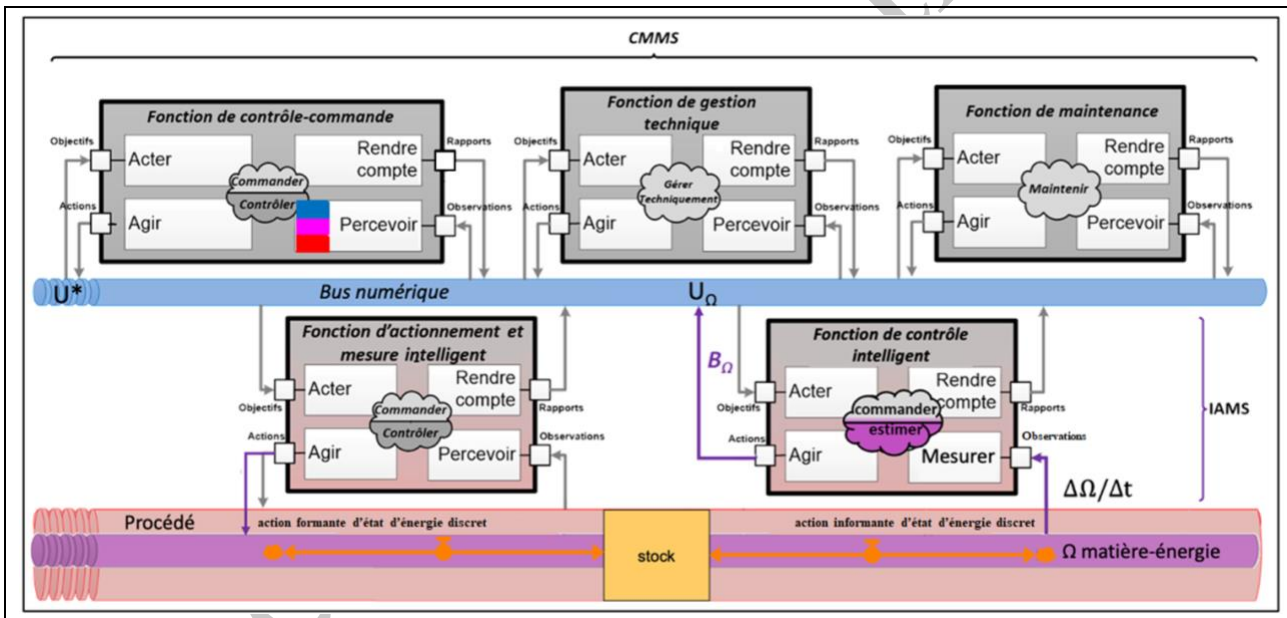


Figure 22 : Interprétation du paradigme CMMS-IAMS pour un contrôle par la matière-énergie circulante

³⁷ Sous-tendant un outillage mathématique en cours de cyberneconduction intégrative (MTIC) à partir du terme enregistré {la cyberne conduction} par (<https://marques.expert/hennebicq-jean-pierre/la-cyberne-conduction-3698283.html>)

Cadrage d'une situation-système

Cette description (Figure 23) consiste à encoder une situation-système sous la forme informelle (Jackson 1997; Jin 2006) d'un diagramme de boucles causales (Figure 23, au milieu) rendant compte de la dynamique des éléments formant la cohérence-énergétique d'un système (Figure 23, à gauche). Pour cela, j'ai construit des règles d'inférence multidisciplinaire (Figure 23, à droite) à partir des éléments de modélisation définis par (Rosen 1985; Louie 2009) mais aussi d'éléments de la littérature.

La frontière système-environnement telle que proposée par (Paynter 1961) permet de déterminer la fermeture causale (Figure 23, au milieu, carré gris) faisant référence à la nature énergétique du système du fait de la combinaison des transactions énergétiques exogènes et endogènes. Au sein de cette fermeture causale, ses éléments constitutifs logiques, humains et physiques (ronds en vert, bleu et rouge) dépendent les uns des autres à travers la connexité de leurs liens contribuant ainsi à déterminer le mécanisme causal par lequel la cohérence-énergétique se forme. Il est important de noter que ce mécanisme résulte de causalités qui sont de nature phénoménologique car elles sont ontologiques (Pearl 2009). Leurs dynamiques causales renvoient ainsi aux comportements manifestés par des phénomènes (causes) sources d'influences (effets) produisant d'autres phénomènes devenant eux-mêmes sources d'autres influences et ainsi de suite. Au sens causal, c'est cette propagation qui construit la connexité d'un système, en qui il faut voir une propriété dynamique (Ducrocq 1960) conférant une complétude causale à sa cohérence-énergétique.

Une analogie avec la mécanique quantique vulgarisée par (Gell-Mann 1995) permet de mettre en évidence qu'au sein de cette fermeture causale, la matière-énergie circulante joue le rôle de causalité « énergétique » efficiente (flèches en violet) car par sa capacité à « gluer », elle est à l'origine de la dynamique de la boucle de régulation ($B_{\Omega}^H, B_{\Omega}^L, B_{\Omega}^P$) des causalités (flèches en vert, bleu et rouge) de l'équilibre de la connexité de la cohérence-énergétique. Les causalités mises en jeu par les éléments de transmutation (ronds en gris) sont les vecteurs de boucles de contrôle (B_H^L, B_P^L, B_P^H) entre les éléments, requises pour maintenir dans le temps cet équilibre. Car soumis à des conditions externes (Zask 2008; Girin 2011; Declerck and Lenay 2018), il peut être altéré avec pour conséquence d'endommager la cohérence-énergétique voire la détruire. Il faut noter que les dommages que peut subir cette boucle d'équilibre sont de facto la preuve de l'existence de la causalité efficiente dont le rôle peut nous rester caché parce que même si nous en avons plus ou moins conscience, il est difficile d'en mesurer l'effet ou parce que ne la connaissant pas, nous ne la percevons pas.

Le patron résultant ci-dessous a une double fonction : d'une part de fournir une représentation abstraite d'une situation-système au processus d'orchestration interdisciplinaire en regard des

causalités (boucles de contrôle en vision « boîte blanche ») à percevoir dans la réalité et d'autre part, de guider mon propre processus de modélisation d'une situation-système en retour de mes requêtes d'expertise (boucles de contrôle en vision « boîte noire »).

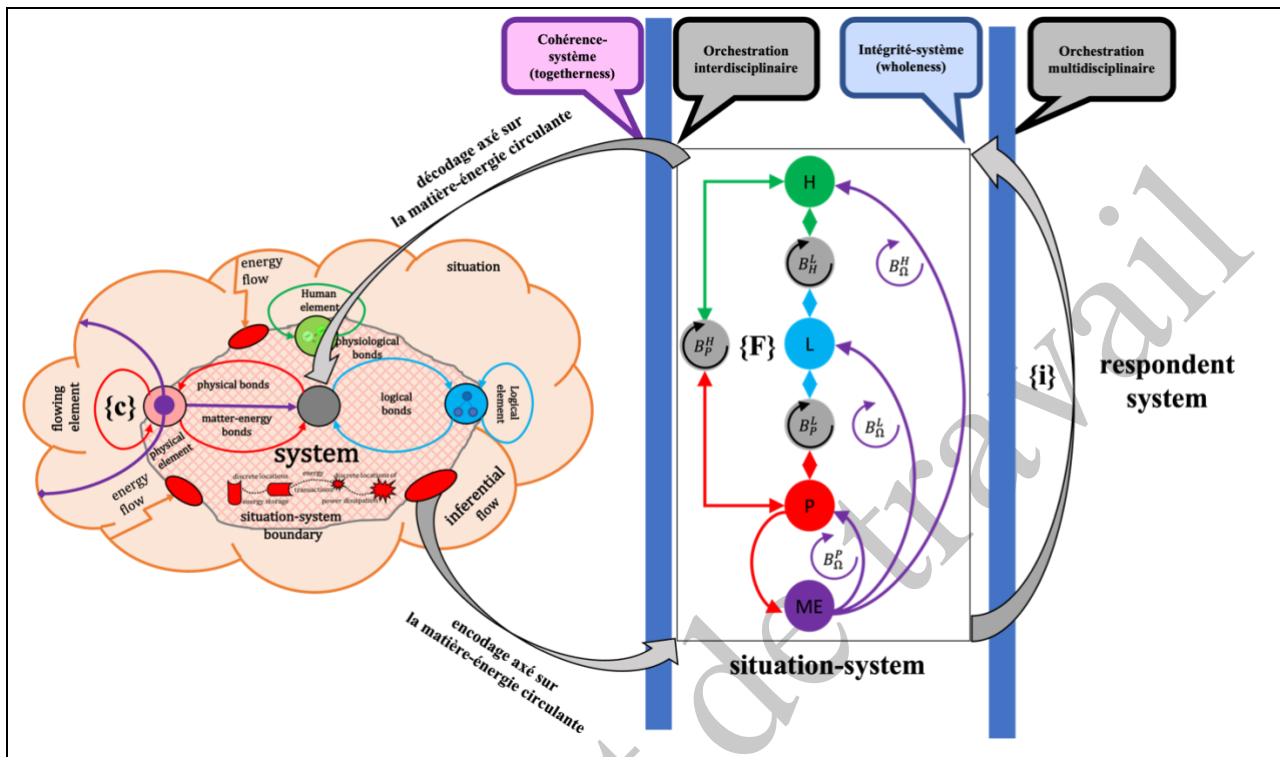


Figure 23 : Exploration de la relation de modélisation d'une situation-système axé sur la matière-énergie circulante

Modélisation de la dynamique d'une situation-système

Cette étape consiste à définir de manière formelle (Jackson 1997; Jin 2006) le résultat du cadrage de la situation-système afin de la rendre prouvable. Il est important de noter qu'elle ne doit rien ajouter à la relation de modélisation et ne doit pas non plus être source de nouvelles assertions sur la cohérence-énergétique (togetherness). Elle a pour objectif de fournir une description formelle de la dynamique de la situation-système sous forme de diagrammes de stock-flow spécifiés et simulés au moyen d'un outil d'architecture dédié³⁸ dont l'utilisation dans mes groupes de travail a prouvé que son formalisme est aisément compréhensible par l'ensemble des actifs multidisciplinaires du système-projet. Rappelons que ces diagrammes sont structurés à partir de principes de la théorie de la dynamique des systèmes (Forrester 1961) fondée pour promouvoir une systémique directement issue de la cybernétique. Elle s'appuie sur des méthodes quantitatives et sur la technologie informatique pour comprendre la dynamique de l'équilibre d'un système d'intérêt, se différenciant

³⁸ Stella Architect, outil de modélisation et simulation architectural de la dynamique d'un système, <https://www.iseesystems.com/>

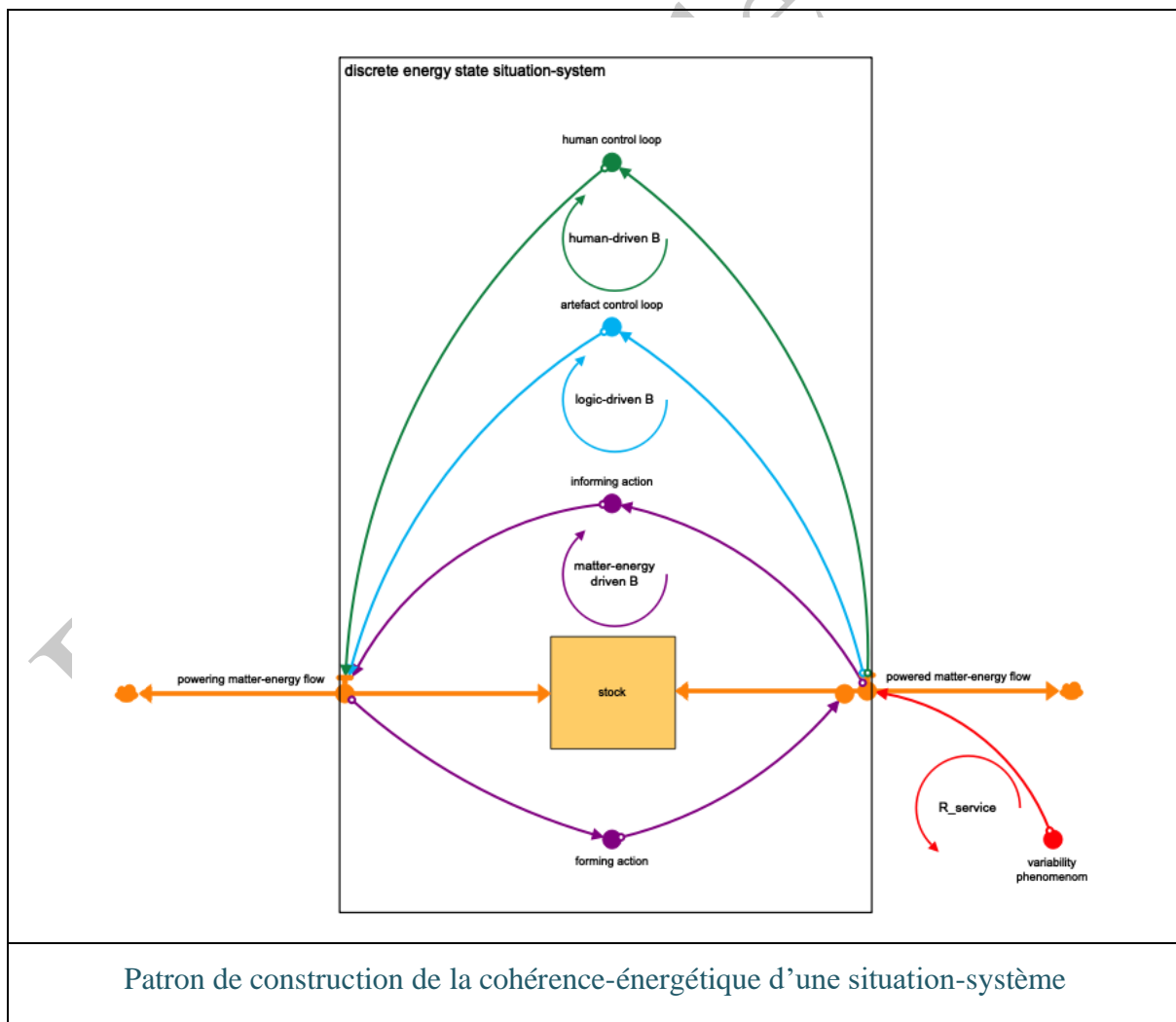
ainsi d'une systémique issue de la pensée système promouvant l'intelligibilité d'un système à faire (Cambien 2007). Le résultat de la modélisation est le mécanisme causal de la situation-système représenté par des stocks, des tuyaux et des vannes, des convertisseurs et des connecteurs. Les stocks, illustrés par des boîtes, modélisent l'accumulation et le stockage d'éléments caractéristiques des situations constitutives de la réalité expérientielle. Le principe d'un stock est de collecter tout ce qui y rentre, moins ce qui en sort. Les flux, illustrés par des tuyaux orientés, représentent la dynamique des écoulements des éléments entre des stocks. Le principe d'un flux est de mettre à disposition d'un stock une quantité d'éléments disponibles dans un autre stock. Cette quantité est pondérée par des vannes attachées aux tuyaux. Cette pondération est fonction de convertisseurs associés à des connecteurs, illustrés par des cercles et des flèches, significatives de constantes et de variables exerçant des influences sur la dynamique des stocks et des flux ainsi que d'une continuité de circulation entre deux flux.

Cependant, le principe de modélisation en dynamique des systèmes ne m'est pas apparu suffisant par la pratique pour assurer la cohérence-énergétique de l'intégrité de la situation-système résultante. Je l'ai alors complété par un principe d'analyse dimensionnelle (Sonin 2001). Il me permet de vérifier de manière interdisciplinaire qu'au sein de la situation-système résultante, la continuité en puissance est préservée afin d'assurer la cohérence-énergétique entre les multiples domaines (physique, physiologie, logique, ...) des situations interconnectées (Figure 24 en bas). Ce principe m'a permis de construire un patron de modélisation de la dynamique d'une situation-système (Figure 24 en haut) qui s'appuie sur une règle simple consistant à faire d'une quantité de matière-énergie circulante (tuyaux et vannes en orange foncé) le synchronisateur des causalités induites par l'énergie formant la cohérence-énergétique (togetherness) ancrant la dynamique du contrôle (commande et conduite) de l'intégrité-système (wholeness) (convertisseurs et connecteurs en bleu et vert) de lieux discrets pertinents. L'objectif est de révéler leur dynamique que la seule considération à des moments d'états spatio-temporelles stables ne permettrait pas. Ce principe s'appuie sur des analogies physiques (figure 12 dans (Fuchs 2010)) pour vérifier l'équation de continuité de puissance $\{P = \Delta X / \Delta T \times \Delta \phi\}$ ³⁹ résultant d'une variation d'une observable intensive $\{\phi\}$ et d'une dérivée temporelle d'une observable extensive $\{X\}$ jouant respectivement le rôle de la {force induite par l'énergie} et le rôle de la matière-énergie circulante. Une autre règle $\{P = \Delta \eta / \Delta T\}$ est retenue pour mieux prendre en compte l'intrication $\{matter \wedge energy\}$ dans les cavités de conversion énergétique où il est difficile de discriminer variable intensive et extensive (par exemple, un domaine magnétique).

³⁹ <https://www.showme.com/sh/?h=r2BYfBI>

La simulation à temps discrets de ce patron permet de révéler d'une part, une boucle de renforcement ($\{R\}$ en rouge) décrivant le déséquilibre de la cohérence-énergétique provoqué par le phénomène de variabilité de la consommation et de la production d'énergie électrique (EnR) (convertisseurs et connecteurs en rouge) de la réalité expérientielle qui affectent le rôle de synchronisation de la matière-énergie circulante et d'autre part, une boucle d'équilibre ($\{B\}$ en violet) qui contrecarrerait la première par des actions formantes et informantes (convertisseurs et connecteurs en violet) relatives à la propriété de cyberneconduction de la matière-énergie circulante de telle sorte que la cohérence-énergétique recouvre son équilibre.

Le patron résultant ci-dessous a pour fonction de mettre à disposition une représentation formelle d'une situation-système à l'ensemble des actifs impliqués dans le processus d'orchestration interdisciplinaire. Cette abstraction s'est avérée puissante dans les projets développés en II.2.3 pour fédérer par simpléxification la « fermeture » des représentations expertes. A titre illustratif, SysML ne s'est pas avéré suffisamment pertinent pour fédérer un spécialiste en physique (Figure 23, P en rouge) avec un spécialiste de facteurs humains (Figure 23, H en vert).



Systems Dynamics	Dimension	Designation	Illustration
pipe and valve	[ML²T⁻³]	{Δη/Δt}	dark orange flows
force to action	[ML²T⁻¹]	energy-driven	purple converters purple connectors
cavity	[NT⁻²]	matter converting	light orange stock

Principe de vérification de la cohérence-énergétique d'une situation-système

Figure 24 : Patron de modélisation de la dynamique d'une situation-système axé sur la matière-énergie circulante

II.2.2.3. Intégrité interdisciplinaire d'une orchestration-système multidisciplinaire

En gardant à l'esprit que ces boucles d'équilibre physico-logiques (figure 22, à gauche) sont en outre sous contrôle humain (en vert, élément humain), j'ai considéré que la congruence de l'ancrage de ces boucles cognitives sur la réalité expérientielle en exploitation devrait être examinée physiquement (« togetherness »), y compris à travers une instrumentation (en bleu, élément logique), voire directement (en violet) ou pas (en rouge, élément physique) sur la matière-énergie circulante. Certaines situations, même circonscrites en situation-système, exigent en effet qu'un opérateur perçoive bien pour bien agir ce qu'un élément matériel ou technique peut lui offrir⁴⁰ (Gibson 1977), peut-être au-delà de ce qui est acquis sur le plan procédural ou de tout ce qui est suggéré (Lahlou 2008; Masoudi et al. 2019). En ce sens, les facteurs humains sont couramment considérés dans la communauté « human in the system loop » d'ingénierie-système (Fass 2006; Luzeaux et al. 2013; Boy 2020) comme un élément du système opérationnel ou du système-projet. Il m'a semblé alors qu'il devait en être de même pour mon interprétation de congruence interdisciplinaire (« harmony ») de la relation d'encodage/décodage multidisciplinaire d'une situation-système axé sur la matière-énergie circulante (Figure 23 à droite).

II.2.2.3.1. Éléments de perception-action intégrative d'une situation-système

Je rappelle les préceptes essentiels de la théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP) (Chauvet 2002) et de la théorie de la perception-action (Berthoz and Petit 2006) qui ont

⁴⁰ L'application du concept d'affordance a été popularisé dans la vie courante par les travaux de Norman, D. (1988).

permis de fonder sous l'expertise de Jean-Marc Dupont, membre actif de notre groupe de travail, une *condition nécessaire mais non suffisante d'ancrage physique* du système sensoriel humain sur des situations perçues comme un ensemble (situation-système) pour toute logique de décision (Dupont et al. 2019b).

A savoir qu'une source de stimulus dédiée à la nature de la sensation doit envoyer une certaine quantité physique au système sensoriel humain, par exemple un signal visuel d'une étiquette émettant un flux d'énergie (photon) informant vers le système oculaire pour permettre le bon contrôle {bien \wedge service} d'un produit. Dans notre corpus, il s'agit du vecteur de congruence entre les intégrités des deux réalités modulo la situation-système.

En effet, un précepte important, entre autres, est l'hypothèse que tout mécanisme physiologique est un ensemble de mécanismes élémentaires constitués du triplet {source, interaction, puits} avec un puits qui peut potentiellement devenir une source (Figure 25 à droite). L'interaction qualifiée de fonctionnelle représente une causalité événementielle portant une quantité physique entre une structure et une autre à travers d'autres structures, appelées discontinuités structurelles. Cette propagation à une vitesse finie avec une certaine transmutation (électro-chimique) dépend des potentiels d'action disponibles à un moment impliquant à un niveau spatial inférieur ce qui est dénommé un propagateur structurel. Le formalisme mathématique originel de la théorie des champs vise à représenter la complexité multi-échelle de la hiérarchie tridimensionnelle (niveau espace-temps) d'un système biologique⁴¹ afin de permettre une simulation comportementale.

L'analogie, à notre facteur d'échelle applicatif, avec un circuit électrique, en l'occurrence un thyristor, permet une compréhension simplexe du comportement non linéaire d'un processus physiologique. Le patron comportemental résultant met ainsi en évidence la nature physique préalable (en orange) d'une source $\{\Psi_P\}$ déclenchant une première « porte » (1er potentiel de perception $\{\Psi_P\}$) puis une seconde pour propager physiologiquement une information de détection pour percevoir et comprendre $\{\Psi_{PU}\}$ une situation-système à partir des connaissances acquises (2ème potentiel de compréhension $\{\Psi_U\}$). Il en va de même avec la propagation non locale de la compréhension à la résolution $\{\Psi_{UR}\}$ et de la résolution à la solution $\{\Psi_{RS}\}$ pour l'action $\{\Psi_A\}$. En regardant vers l'intérieur, un tel patron illustratif de {perception-action} met en évidence que $\{\Psi_P\}$ peut provenir d'une autre source physiologique (Figure 25 en vert) et entraîner une action physique (en orange) ou physiologique. Il est donc possible d'admettre le rôle du potentiel d'entrée d'ancrage $\{\Psi_P\}$ que la réalité de la situation-système (Figure 25 en orange) peut exercer sur une équipe de contrôle pour

⁴¹ The goal of an integrative biology (www.admiroutes.asso.fr/gilbertchauvet/en/index.htm)

focaliser physiquement (ontologiquement) les nombreux détours cognitifs individuels avec une certaine harmonie (intégrité-système construite) afin de satisfaire la solution la plus faisable en sortie $\{\Psi_A\}$ (intégrité-système expérimentielle en gris). La Figure 25 (à gauche) illustre dans une certaine mesure la dynamique d'une boucle de contrôlabilité (conduite) pilotée par l'humain pour souligner les nombreux détours impliquant des interactions fonctionnelles de {décodage}, {prise de décision} et {encodage} dont l'intégrité-système ontologique dépend d'abord d'un ancrage physique sur la situation-système pour être conscient de son potentiel d'offre.

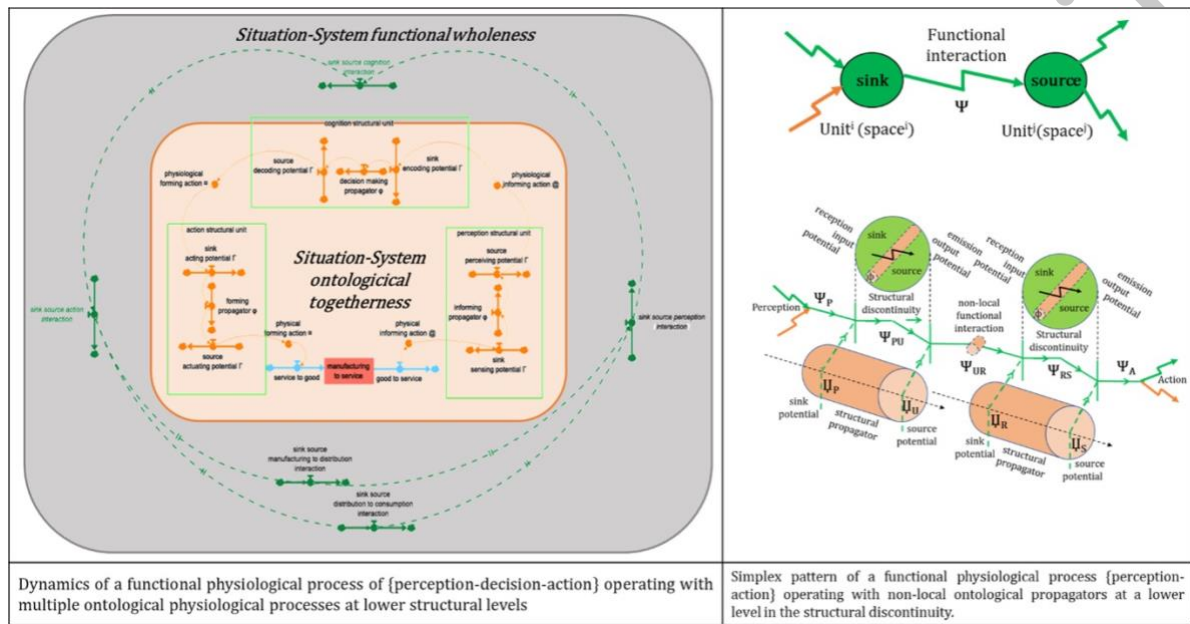


Figure 25: Ancrage physico-physiologique d'une boucle de conduite sur une situation-système

II.2.2.3.2. Éléments d'orchestration multidisciplinaire

La métaphore d'orchestration rend compte dans la pratique que la « partition système », c'est-à-dire penser et agir pour l'intégrité-système, s'écrit au fil du déroulement du processus d'ingénierie multidisciplinaire lui-même. Il faut aussi garder à l'esprit que l'information en tant que « ce qui nous change » ou « différence qui fait une différence » (Bateson 1984) dépend de multiples effets intrinsèques et extrinsèques dont les influences infèrent des trajectoires individuelles cognitives « par détour » pour prendre la décision la plus probable (Berthoz 2009). En conséquence, il est possible d'admettre la contingence de ce processus multidisciplinaire, orchestré de plus par un humain, à des blocs de connaissances acquis individuellement pour atteindre collectivement une solution faisable $\{\Psi_A$, Figure 25 en orange} à partir de multiples percepts informels $\{\Psi_P\}$. D'autant plus qu'un autre Humain est la première source de conscience d'une situation-problème (Figure 5, chapitre 10, (Millot et al. 2011)) (Wilber, « sentient being » du paradigme holonique dans (Mella 2009)) pour requérir

auprès d'un orchestrateur-système la situation-solution dont il n'a pu résoudre par lui-même l'intégrité-système.

Dans divers ateliers de l'AFIS et documents ((Meinadier 2009), Figure 109) ((Faisandier 2015), Figure 143), il a été porté attention sur l'articulation entre les processus de management séquentiel des phases d'un projet (en principe par un expert-senior) et les processus opératoires de management des tâches (par un expert-junior) qui concourent en parallèle à la prise de décision aux jalons pertinents. Avec, en corollaire, la mesurabilité au plus tôt d'une exigence, ce qui ramène à la matérialité du processus d'ingénierie, y compris basé sur des modèles⁴² si on ne substitue pas simplement un document-modèle à un document-texte tout en ne le confondant pas avec le résultat (Lamsweerde 2000) (le cahier des charges qui a, de fait, autant de composants que d'intégrité-disciplinaire entre actifs-système). J'ai pu constater, dans mon métier, que ce n'est pas vraiment le cas en pédagogie par projet mais aussi, par exemple dans les projets d'innovation urbaine, où les actifs-projets sont cooptés à l'image de la connaissance du « manager » alors que la réussite finale va dépendre de l'aptitude de ce dernier à coopter de façon opératoire au fil du projet ce qu'il ne peut pas percevoir ... puisqu'il ne le sait pas.

II.2.2.3.3. Éléments d'orchestration interdisciplinaire

Le dilemme à orchestrer est que la connaissance requise d'un actif-disciplinaire telle que perçue par le requérant est différente de la réponse que celui-ci est capable de fournir s'il on le laisse agir dans ses « détours ». La réponse que j'apporter m'a amenée à adopter le principe de {simplicité} d'inspiration biologique suggéré par (Berthoz 2014) en prônant des règles abstraites-concrètes facilitant des échanges intelligibles pour former l'intégrité-énergétique d'une situation-système. En pratique (Mayer 2018), j'ai combiné ce processus simplexe de perception-action, notamment le fait que {Krequisite \neq Krépondante}, avec le processus de spécification de l'approche des « problem frames » (Jackson 1997) en faisant de l'ancrage-énergétique { Ψ_p } sur une {réalité expérientielle} la congruence interdisciplinaire d'un processus d'orchestration multidisciplinaire de spécification d'une situation-système { Ψ_A } dans la « réalité construite ».

La notion de situation, même si elle n'est pas explicitement nommée dans l'approche des « problem-frames » relative à l'intégrité-système en génie logiciel et, dans une large mesure, au contrôle coopératif et à l'ingénierie-système, est liée au monde d'intérêt {W} en tant que source d'exigences {R} pour exprimer des conditions sur des phénomènes qui doivent être contrôlés par un

⁴² En ayant conscience du caractère tautologique du MBSE () puisque tout processus d'ingénierie est basé sur une relation de modélisation homomorphe avec la réalité expérientielle, au sens de (Le Moigne 1977).

artéfact connexe $\{A\}$ sous spécification. Ces exigences d'intérêt (Équation 1) contiennent des propriétés optatives pour exprimer ce que l'artéfact doit faire sous l'affirmation que d'autres propriétés indicatives sont contrôlées dans une certaine mesure par la situation elle-même ou qui doivent être contenues en cas d'effets non-dociles (Hall and Rapanotti 2005). Une preuve peut ainsi être donnée (Gunter et al. 2000) que le résultat de la spécification des exigences $\{S\}$ ne peut être formellement validé que lorsque l'artéfact résultant est testé avec des connaissances pertinentes $\{K\}$ dans des conditions réelles par rapport aux propriétés mesurables partagées (Équation 2). Il convient de noter que ces travaux soulignent que les exigences contiennent une partie de la désignation informelle pour capturer les phénomènes flous et ou imprévus de $\{W\}$ avant d'être formellement fondés pour une spécification. Plus tard, (Jin 2006) souligne l'intérêt du paradigme holonique pour penser-système (tout-partie) afin de bien énoncer phénoménologiquement les problèmes à résoudre dans $\{W\}$ pour la description de la spécification orientée problème $\{SD\}$ selon la relation d'implication faible \vdash (« entailment ») :

- $W, S \vdash R$ (Equation 1); $K, S \vdash R$ (Equation 2); $K, R \rightarrow S_D$ (Équation 3).
- $I \subseteq (A \times Phe \rightarrow O_{Sink}) \cup (O_{Source} \times Phe \rightarrow A)$ (Équation 3').

où $\{R\}$ spécifie comment l'artéfact requis $\{A\}$ doit se comporter dans $\{W\}$ en désignant les phénomènes $\{Phe\}$ qu'il doit présenter pour établir des interactions $\{I\}$ avec les objets source et puits $\{O_{Source}, O_{Sink}\}$ de son environnement afin de mettre en œuvre une situation donnée dans W .

En conséquence, $\{SD\}$ dans une situation de changement ouvert dépend des connaissances pertinentes à la fois sur ce qui peut fermer la situation pour les problèmes de contrôle et sur ce qui peut contenir la situation pour les questions de réactivité (entre autres). Il convient de noter que, dans une extension de l'approche des « problem frames » aux systèmes sociotechniques (Hall and Rapanotti 2005), les auteurs montrent que la prescription dans $\{W\}$ doit exprimer des propriétés satisfaisant trois spécifications concurrentes :

- $W, S, I, UI \vdash R$ (Equation 5).

Où, en situation $\{W\}$, la spécification centrée technique $\{S\}$ prescrit le contrôle de la dynamique d'un artéfact, la spécification centrée humain $\{I\}$ prescrit la capacité humaine de conduite d'un artéfact, la spécification centrée interface $\{UI\}$ prescrit la capacité technique d'un artéfact d'interagir avec un Humain. Il est clair que la spécification technique doit confiner, à défaut de pouvoir contrôler, les interactions non prédictibles avec la réalité $\{W\}$ et l'Humain $\{H\}$.

Par extension pour le domaine de l'ingénierie-système basée sur des modèles $\{M\}$ (Bouffaron 2016), une spécification prescriptive orientée solution $\{SP\}$ dépend en réponse des connaissances d'ingénierie multidisciplinaires pertinentes $\{KSE\}$ selon le prédicat :

$$- S_p \leftarrow R, K_{SE} \text{ (Équation 5')}$$

Le processus de spécification associé résulte d'itérations de raffinement tout au long du cycle de vie d'un système-projet entre connaissances multidisciplinaires qui sont respectivement source de spécification vérifiée axée sur les problèmes selon les équations 3 et 3' et puits de spécification vérifiée orientée solution selon les équations 5 et 5' validée à des étapes intermédiaires jusqu'à une validation contractuelle selon une relation d'implication forte \Vdash (Équation 4) :

- Spécification descriptive d'exigences orientée-problème selon :

$$K_{source}^{requérante}, R_{Problème}^{descriptive} \rightarrow K_{puits}^{répondante}$$

- Spécification vérifiée de modèles orientée-solution selon :

$$K_{source}^{répondante}, R_{Problème}^{descriptive} \rightarrow M_{solution}^{vérifiée}$$

- Spécification prescriptive de modèles orientée-solution selon :

$$K_{puits}^{requérante} \leftarrow M_{solution}^{prescriptif}, K_{source}^{répondant}$$

- Spécification validée de modèles orientée-problème selon :

$$K_{source}^{requérant}, M_{solution}^{prescriptif} \Vdash R_{Problème}^{descriptive} \text{ (Équation 4)}$$

Ces éléments sont constitutifs de notre processus de spécification orchestrant en quatre moments l'intégrité-construite d'une situation-système à partir d'intégrités-construites multidisciplinaires répondant aux problèmes observés dans la réalité.

Des techniques d'orchestration améliorées par la technologie sont devenues disponibles pour permettre un continuum de données à travers la réalité $\{\text{expérientielle} \wedge \text{ingénierie}\}$ des situations-système d'intérêt entrelacés sous la forme d'un bus commun comme illustré en (Figure 26). L'exactitude (job-right in (Fanmuy et al. 2012)) de chaque solution est vérifiée selon les meilleures pratiques du domaine disciplinaire et vérifiée de façon multidisciplinaire sous la forme compréhensible de cas de test-scénario-résultats en échange d'une demande complète. La cohérence de l'engagement multidisciplinaire (right-job in (Fanmuy et al. 2012)) de ces solutions vérifiées dans l'intégrité-système peut alors consister en une co-exécution complète basée sur un ensemble de

modèles d'une plate-forme physique émulant une réalité plausible en alignement avec une logique TRL. Il convient de noter que dans (Bouffaron 2016), le modèle SysML exécutable d'orchestration s'est « simplifier » au fur et à mesure que les actifs-disciplinaires déployaient leurs solutions résidentes dans leurs environnements respectifs.

Cependant, ces travaux n'abordent pas formellement l'harmonie de l'engagement interdisciplinaire pour cibler la congruence, modulo la situation-système, entre réalité expérientielle et réalité construite. Comme les études de cas ci-après traitent de facto d'une portée cyberphysique de systèmes de systèmes, la cohérence interdisciplinaire de leur réalité dans l'intégrité situation-système consiste en une vérification de la continuité de puissance des modèles stock-flux à partir de résultats multidisciplinaires. Un outil informatique commun assure à distance le rôle d'un bus de congruence entre un architecte système (Figure 26 en gris), un penseur de situation-système (Figure 26 en orange) et deux spécialistes en physiologie intégrative (Figure 26 en rouge-vert) et en cyberphysique intégrative (Figure 26 en rouge-bleu). D'un point de vue formatif, il est possible d'admettre qu'un standard de rédaction d'un cahier des charges ne reflète pas suffisamment les aspects formels d'un processus interdisciplinaire de spécification-système.

Document de travail

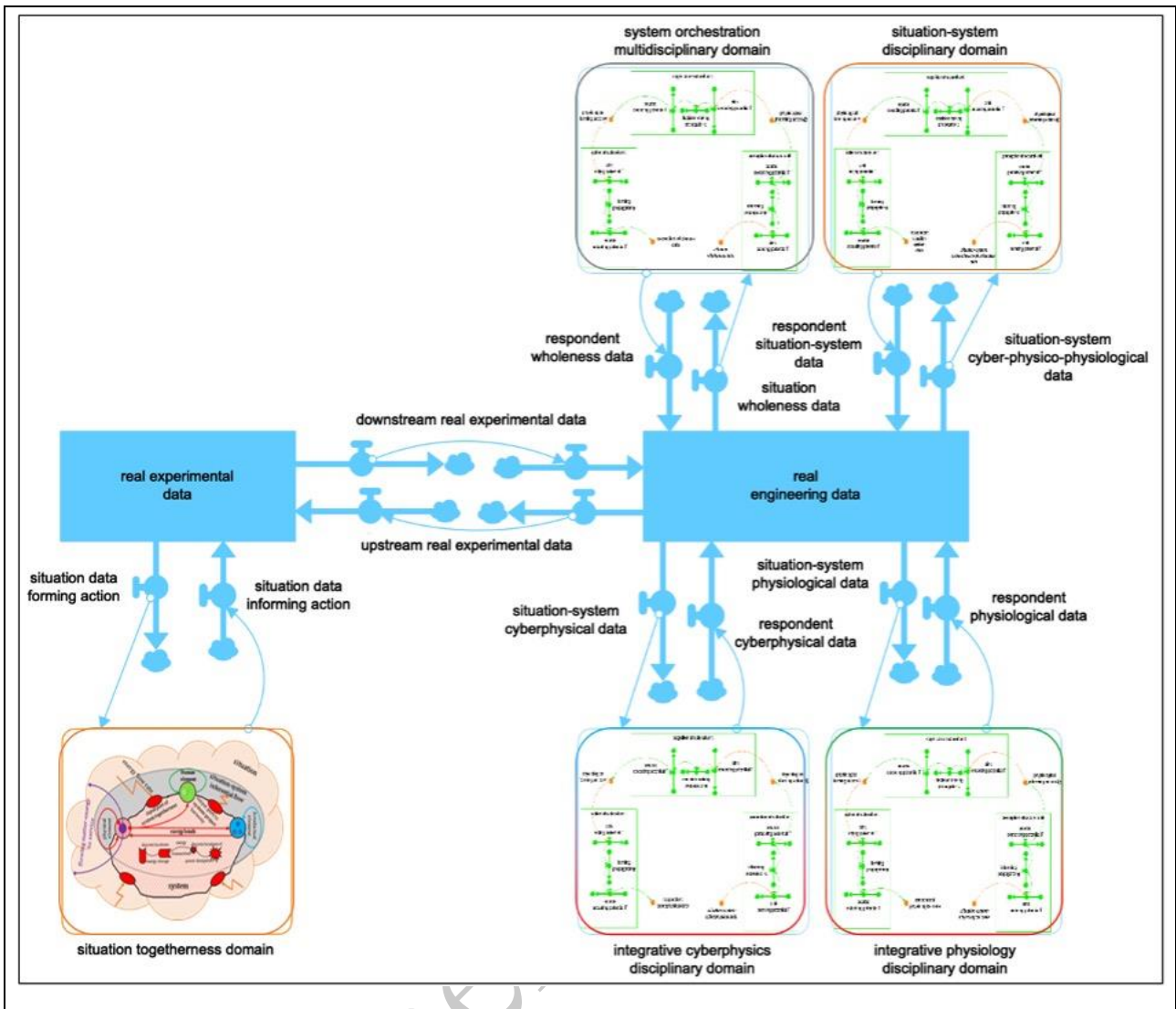
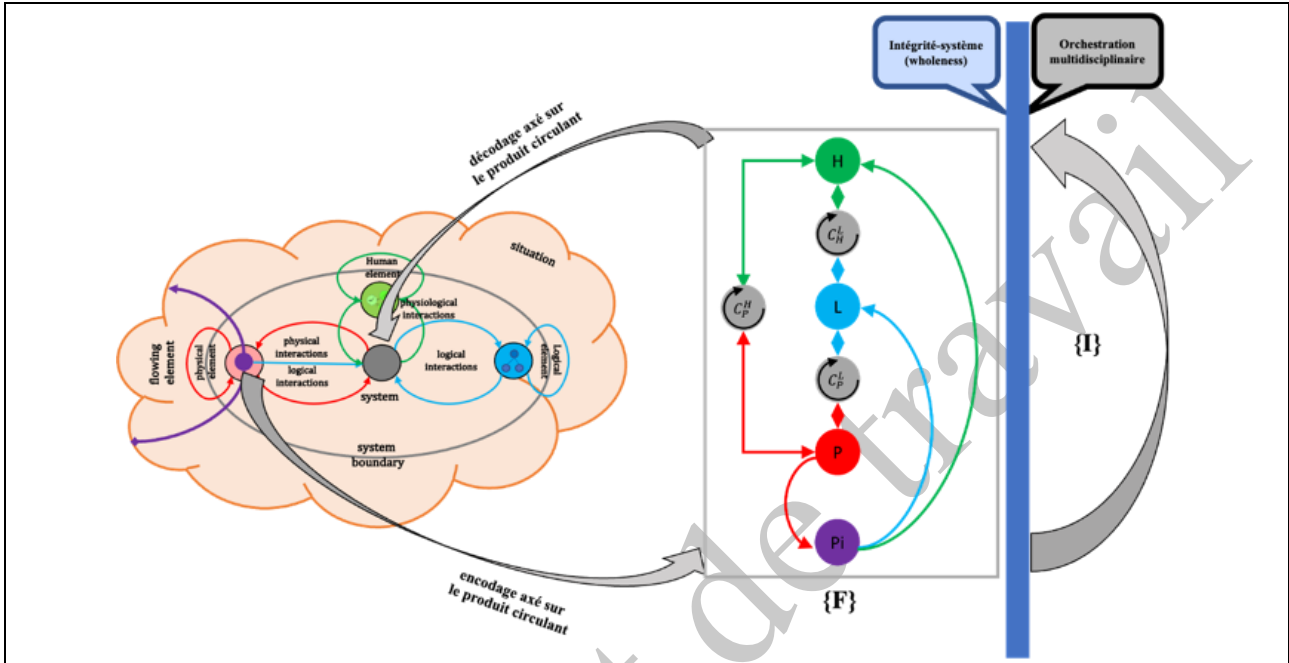


Figure 26: Orchestration interdisciplinaire de la dynamique d'une situation-système

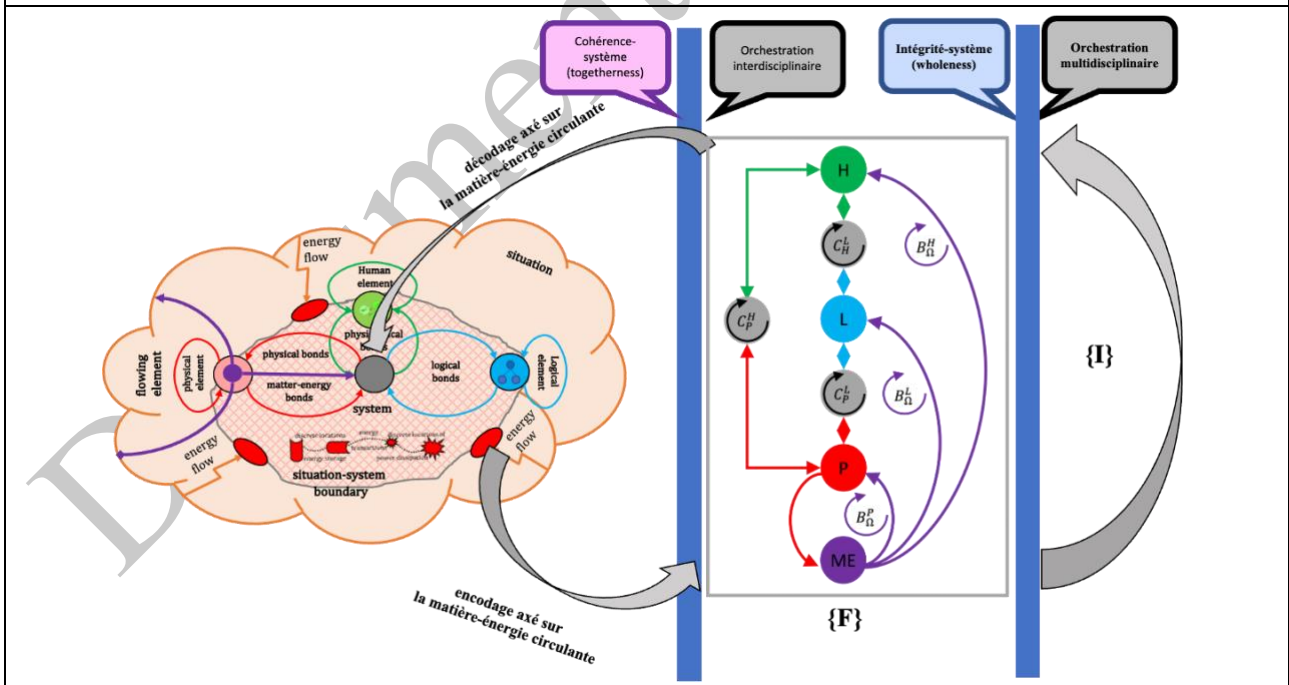
Document

II.2.2.4. Synthèse de penser pour agir « situation-système »

A titre illustratif, la planche ci-dessous synthétise les moments essentiels de la construction intellectuelle du corpus scientifique détaillé ci-dessus. Les cas de recherche suivants ainsi que les projets de recherche en illustrent l'applicabilité et des perspectives.



Le produit circulant confère une intégrité- logique au système pour contrôler une situation



La matière-énergie circulante confère une cohérence-énergétique au système pour contrôler une situation-système

II.2.3. Cas de recherche

En complément des extraits des trois cas d'étude (Dupont et al. 2019b) (Mayer et al. 2020) (Mayer et al. 2022) qui ont contribué à la construction de ce corpus scientifique, j'en détaille maintenant ma contribution propre à la cohérence-énergétique (togetherness) de leur intégrité-système (wholeness) :

- En revisitant deux domaines de procédé discret relatifs au contrôle par le produit de l'interopérabilité d'un système de systèmes d'entreprise et au contrôle par l'oxygène d'un système de systèmes de confort d'occupants au travail dans un milieu intérieur,
- En montrant le caractère unifiant d'un langage orienté dynamique des systèmes pour capturer l'essentiel d'une situation-système de détérioration de la cohérence-énergétique d'un système de systèmes d'énergie électrique.

II.2.3.1. Dynamique d'une situation-système d'un réseau d'entreprises manufacturières

Le phénomène majeur étudié est l'intégrité cyberphysique d'un système manufacturier dans un contexte de numérisation industrie 4.0.

La connectivité d'un réseau d'entreprises exhibe des caractéristiques de {SdS} dont le management {Sg} basé sur l'information (section I.2.2.1) doit faire interopérer des composants-système technologiques mais aussi humains. En admettant que l'ensemble est immergé dans un milieu physique (Figure 20), il est possible de s'interroger sur la cohérence énergétique (togetherness) de ce type d'intégrité cyberphysique (wholeness). A titre d'illustration, la situation-système que nous traitons est relative à un système de systèmes d'entreprises hétérogènes, interagissant ensemble pour produire et délivrer un produit, en tant que {biens \wedge services} tel que requis par la consommation.

Une description de la dynamique de cette situation-système sous la forme d'un modèle stock-flux exécutable (Figure 27) vise à mettre en évidence l'ancrage énergétique ou pas de cette intégrité physico-logico-physiologique des composants-système de production-distribution-consommation (stocks en orange clair) du {SdS} visé. Notons que la logique diachronique de flux-produit discrétise une logique de flux-bien (en orange foncé, conduites à gauche et à droite des stocks et connecteurs en trait plein), dont les débits sont pondérés par des {vannes} directionnelles, et une logique de flux-service (en bleu, connecteurs en trait pointillé entre un stock aval et une canalisation amont). Avec pour conséquence, la discrétisation des liaisons entre situations d'état logique en regard de ce que devrait être une unité tangible. La synchronicité de la circulation du flux-produit dans chacune de ces situations résulte des boucles physico-logico-physiologique de contrôle local (boucle d'équilibre {B} en rouge, en bleu, en vert), soit à travers une instrumentation d'actionnement et de mesurage (flèches en pointillés et convertisseurs en rouge et bleu), soit à travers la prise de décision d'un opérateur

(flèches en pointillés et convertisseurs en vert couplés aux précédents). Pour garantir l'équilibre global du Sos, la vérification de l'interopérabilité $\{\wedge\}$ entre $\{\text{bien} \wedge \text{service}\}$ est planifiée à des moments identifiés par des états stables (Figure 27 convertisseurs rouges) de ces situations. Au cours de chacun de ces moments, une boucle de renforcement $\{R\}$ rendant compte d'un déséquilibre du tout formé par le produit est contrecarré par une boucle d'équilibre $\{B\}$.

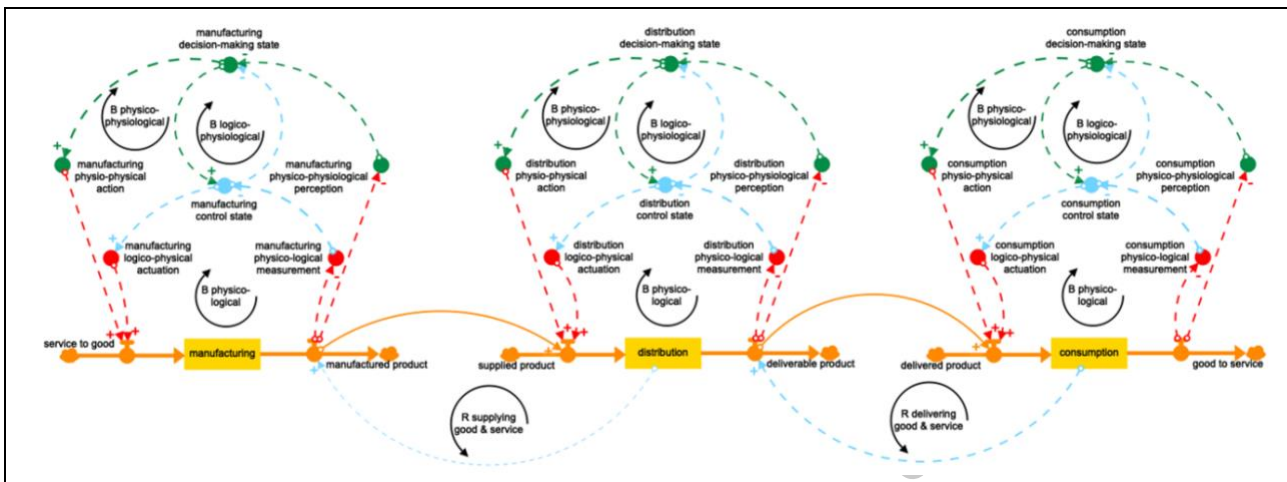


Figure 27: SoS business-to-consumption situation-systems togetherness issues

En pratique, une technologie d'auto-identification digitale embarquée dans le produit peut permettre de restituer une interopérabilité diachronique partielle $\{\text{bien} \wedge \text{service}\}$ en établissant une liaison "énergétique" par lecture/écriture de contrôlabilité synchronique. Malgré la puissance de modélisation-système (wholeness) de ce paradigme de contrôle par le produit, on peut admettre que cette discrétisation de liaison énergétique ne permet pas d'assurer la cohérence-énergétique (togetherness) du $\{SdS\}$. De même, pour faire face à ce dilemme « tout et partie » (wholeness), le paradigme holonique (Van Brussel et al. 1998) fait d'un produit-holon circulant le synchronisateur des ressources-holons de sa transformation dans l'espace et le temps, sous le contrôle de ses superviseurs-holons locaux et d'experts-holons, visant à refléter ainsi à la volée son environnement changeant pour faire face aux situations inattendues. Cependant, l'implémentation de ce type d'architecture-système holarchique privilégie une technologie multi-agents s'en prendre en compte la dimension énergétique d'un holon (*organon* dans (Giré 1988)). Entre outre, une faiblesse de cette connectivité numérique peut être liée aux problèmes de robustesse énergétique des canaux de communication sans fil utilisés par les technologies embarqués, comme rapporté par (Koubeissi 2015), pouvant se concrétiser par des ruptures de contrôlabilité directe du produit circulant même si elles peuvent être compensées par des alternatives de routage la rendant tolérante aux pannes.

Ce constat met en évidence un « chaînon manquant » entre intégrité-système (wholeness) dans la réalité construite et cohérence-énergétique (togetherness) requise par la réalité expérientielle. J'ai

alors fait de ma propre situation de confort au travail ainsi que celles d'étudiants un cas de recherche de la preuve d'existence de ce chaînon.

II.2.3.2. Dynamique d'une situation-système de confort au travail

Le phénomène majeur visé est celui de l'oxygénation correcte d'un humain en situation-système dont l'importance vitale vient récemment d'être mise en lumière par la crise sanitaire.

Ma compréhension de la cohérence-énergétique axée sur la matière-énergie circulante m'a amené à reconsidérer un ensemble de travaux de notre groupe de travail IS-UL portant sur une situation de confort au travail dans un milieu confiné. La nécessité de surveiller la qualité de l'air intérieur est au cœur de nombreux travaux pour développer des architectures-système basées sur des technologies ambiantes (Rondeau et al. 2015). Mon retour d'expérience en amphithéâtre avec des étudiants montre cependant une défaillance de ces systèmes technologiques en regard de la sensation de qualité de l'air intérieur (QAI) des occupants et par conséquent, de leur sensation de confort (Li 2020; Korsavi et al. 2021). Un retour d'expertise qualité-sécurité-environnement (QSE) de cette défaillance a conclu à des problèmes techniques de dimensionnement des tuyaux et d'emplacement des prises pour le renouvellement de l'air ainsi que de positionnement des capteurs dans les faux-plafonds rendant de fait les mesures de la QAI contingentes à des contraintes architecturales de bâtiment et à des contraintes esthétiques. Le diagnostic de cette défaillance qu'a fait Jean-Marc Dupont de notre groupe de travail IS-UL, l'a amené à proposer la fraction molaire d'oxygène de l'air intérieur comme mesure d'un phénomène d'homéostasie physico-physiologique évident d'équilibrage entre la quantité d'oxygène requise par un humain pour ses besoins énergétiques et la quantité d'oxygène produite en réponse par le milieu intérieur pour le satisfaire. Je me suis alors interrogée sur le rôle que joue l'oxygène circulant (O_2) pour établir la cohérence-énergétique (togetherness) maintenant l'intégrité-système (wholeness) de l'ensemble des situations physico-physiologiques concernées par une situation de confort au travail. Ce qui m'amène dans un premier temps à revisiter cette situation-système par des préceptes systémiques pour, dans un deuxième temps, mieux explorer ce qui fait sa cohérence-énergétique l'ancrant dans la réalité expérientielle avant de proposer une perspective innovante de surveillance de QAI.

II.2.3.2.1. Situation-système existante de confort

Les préceptes de la pensée système permettent, dans la réalité construite de l'ingénierie, de contextualiser dans une perspective de complétude-système les exigences des parties prenantes en termes de normes, de directives et d'indicateurs (Figure 28, en haut à gauche) qu'un système de surveillance de la QAI doit satisfaire pour se conformer à un contrat de niveau de service (SLA).

Comme récemment abordé par (Baron and Daniel-Allegro 2020) pour un système à forte composante TIC, cadrer une situation-problème comme une situation-système pour en extraire le système technique d'intérêt (Figure 28, en bas à gauche en bleu) consiste à naviguer de manière non linéaire à travers les racines et les branches de l'arbre du penseur système, suggérant les attitudes qu'il doit adopter pour penser « système ». Ainsi, une première attitude, par exemple à des fins de formation⁴³, est d'explorer la racine « contexte » et la branche « percevoir » pour discerner les circonstances de dégradation de la qualité de l'air intérieur et ses effets sur les occupants afin de comprendre le contexte dans lequel les exigences des parties prenantes ont été exprimées. Les frontières de l'intégralité de la situation-système sont ainsi données. L'anticipation de ces effets conduit ensuite à progresser le long de la branche « détecter les influences » pour esquisser les causalités liés aux événements engendrés par les composants de l'air intérieur (Figure 28, en bas à gauche en rouge), précédant un événement de dommage de la QAI qui se produira ou pas (Rothman and Greenland 2005). Un échange de connaissances avec un expert QSE est alors nécessaire pour comprendre ces causalités en naviguant dans les racines « structure », « relations » et « comportement » afin de désigner ces composants, leurs propriétés et leurs interactions ainsi que les influences qu'ils ont sur l'air intérieur. Les bonnes pratiques de cet expert le conduisent à identifier en tout premier lieu une causalité relative au composant dioxyde de carbone (CO₂) car de sa concentration dans l'air dépend l'importance des effets observés sur la santé des humains (Anses 2013; Vehviläinen et al. 2016). Libéré par les occupants, il est le principal pollueur d'un milieu intérieur (Satish et al. 2012; Korsavi et al. 2021), justifiant ainsi d'en surveiller son taux pour les problèmes de QAI.

Ce premier cadrage de l'intégrité de la situation-système ne permet cependant pas de se prononcer quant à la complétude-système entre cette causalité et les besoins implicites de confort des occupants (Pereira et al. 2014; Dong et al. 2021; Haddad et al. 2021). S'interroger sur ce chaînon manquant en allant au-delà des exigences du SLA est alors le prétexte pour continuer à naviguer dans l'arbre du penseur système pour discerner d'autres influences cachées. Réévaluer l'intégrité de la situation-système s'appuie désormais sur le « conceptagon » (Boardman et Sauser 2013) en tant que modèle architectural de complétude-système. L'exploration de la triade « fonction-structure-processus » avec l'expert permet de suggérer l'indice humidex comme un indicateur candidat pour objectiver l'impact de la qualité de l'air sur la sensation de confort subjective humaine, et ainsi de suite. Cet indice permet de qualifier indirectement l'impact corrélé du taux de CO₂ libéré avec le taux d'humidité résultant de la vapeur d'eau produite par la transpiration des occupants et la température de l'air influencée par

⁴³ Cours « Ingénierie des systèmes » du MCEM Informatique omniprésente et communications pour le développement durable, lié à un master en génie des systèmes complexes (<http://fst.univ-lorraine.fr/formations/master-ingenierie-des-systemes-complexes>)

celles des occupants. Enfin, l'exploration de la triade « communication-commande-contrôle » m'a conduite à prescrire sous la forme d'un diagramme de boucles causales (Figure 28, à droite) la contrôlabilité de la QAI par un système de surveillance piloté par l'humidex. Par la suite, dans une perspective d'ingénierie-système basée sur les modèles, des moments d'orchestration interdisciplinaire avec les spécialistes multidisciplinaires requis conduisent à traduire ce diagramme de boucles causales en langage SysML dans une perspective de spécification exécutable⁴⁴ d'une architecture préliminaire d'un système de surveillance de la QAI.

Le cadrage de l'intégrité-système de la situation-système de confort a mis en évidence l'établissement par l'indice humidex d'une boucle d'équilibre régulant les boucles de déséquilibres résultantes des effets corrélés de la concentration de CO₂, de l'humidité et de la température de l'air intérieur satisfaisant les exigences parties-prenantes. Cependant, des travaux (Mutlu 2020) montrent l'existence d'autres sources de dégradation de la QAI comme les ordinateurs, les revêtements de mur ou de sol, les climatiseurs ... Ce qui suscite alors de continuer à explorer en extension ces situations tangibles afin de parfaire la contrôlabilité de leur qualité, avec pour seule limite la maturité de la recherche dans le domaine, mais avec pour conséquence de s'éloigner de ce qui est physiquement d'un milieu intérieur pour satisfaire les exigences physiologiques de ces occupants.

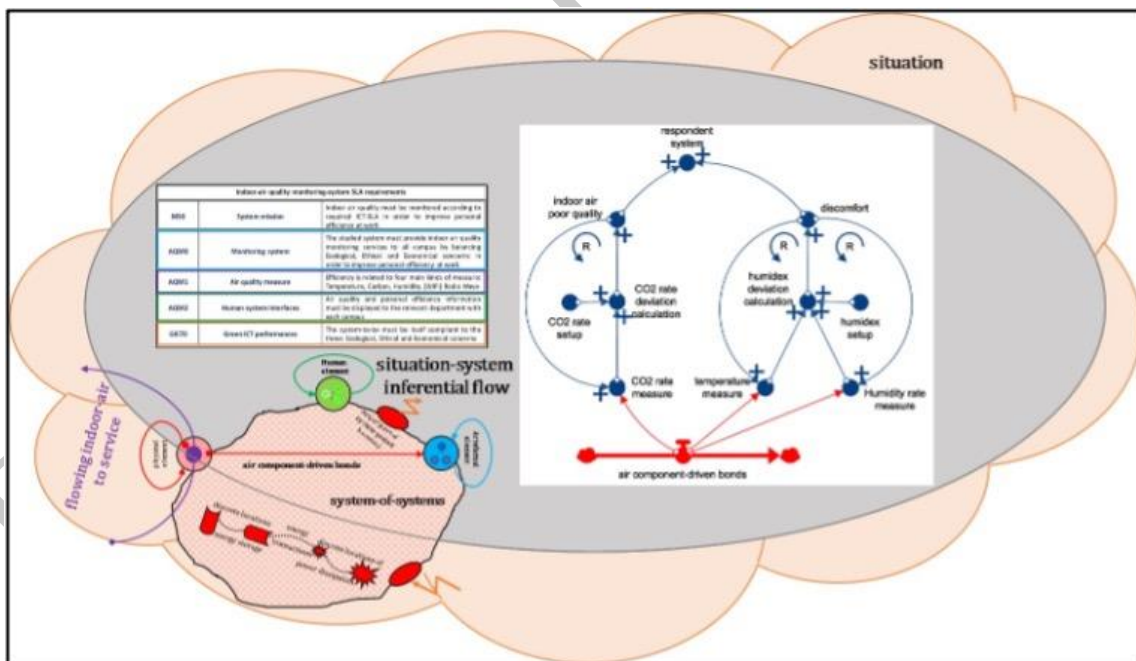


Figure 28 : dynamique de la situation-système existante de confort

⁴⁴ À l'aide de l'outil-méthode IBM® Rational® Rhapsody®

II.2.3.2.2. Situation-système projetée de confort

Des travaux de recherche dans le domaine de physiologie et de la médecine démontrent que l'humain est avant tout une fabrique physiologique d'énergie, ce qui fait de l'énergie sa première exigence. Cette exigence implique ainsi de considérer sa situation de production énergétique et sa situation physico-physiologique pour y parvenir. La première situation réfère aux phénomènes par lesquels l'humain produit, à partir d'énergie physique, de l'énergie physiologique qu'il accumule pour répondre à sa dépense énergétique variant en fonction des activités physiques qu'il réalise. Ce qui implique la deuxième situation qui fait référence aux phénomènes de consommation de la bonne quantité d'énergie physique pour satisfaire les exigences de la première. Cette énergie physique a deux origines. L'une est celle provenant des nutriments contenus dans les aliments absorbés par l'humain. L'autre est celle provenant de l'oxygène présent dans l'air qui, absorbé par l'humain, agit comme l'oxydant de la réaction de combustion des nutriments produisant son énergie physiologique ainsi que des déchets comme le CO₂ et ... dissipation de chaleur. Le rôle prédominant de l'oxygène pour préserver l'intégrité physiologique de l'humain a été démontré par (Lador et al. 2006) qui ont apporté les preuves expérimentales d'une relation directe entre les besoins en quantité d'énergie physiologique et la quantité d'oxygène absorbée au niveau respiratoire. De même que (Martin et al. 2017) qui soulignent l'importance de ce rôle de l'oxygène en montrant, à travers des modèles prédictifs, l'impact que la désoxygénation de l'atmosphère pourrait avoir sur les besoins énergétiques humains. Pour être « tangiblement » consciente de ces situations physico-physiologiques, j'ai mené une expérience pour vérifier cet impact en mesurant la dynamique de l'oxygène à travers l'évolution de son taux, calculé comme une fraction molaire de l'air intérieur de mon bureau, dont l'occupation variait en fonctions de mes activités et de celles de deux collègues volontaires pour cette expérience.

Les résultats de cette expérience (Figure 29, en bas à gauche) montrent clairement une diminution significative de la fraction molaire d'oxygène (courbe en orange clair) nous interpellant sur ce que l'air intérieur doit fournir pour produire notre énergie physiologique. La lecture de ces mesures avec Jean-Marc Dupont, membre physiologue de notre groupe IS-UL, indique que la valeur de la fraction molaire d'oxygène au début de l'expérience est loin des 21% démontrés par de nombreuses études comme étant la quantité optimale requise par notre fabrique physiologique d'énergie. Cette lecture permet aussi de constater que la valeur de la fraction molaire d'oxygène à la fin de l'expérience est très proche du seuil limite (une fraction molaire d'oxygène de 19,5%), synonyme d'une dégradation possible de notre production d'énergie par manque d'oxygène ! Le calcul d'un indice humidex (Figure 29, en bas à gauche, tableau en vert et jaune) récemment adapté à l'air intérieur (Rana et al. 2013) nous permet de corrélérer cette diminution de la fraction molaire d'oxygène avec la sensation subjective

d'inconfort (apparition de maux de tête, sensation d'humidité, transpiration) des occupants de mon bureau. Enfin, le spécialiste physiologiste nous aide à discerner à l'intersection des courbes que notre situation énergétique et notre situation physio-physiologique sont à l'origine de la variation de la fraction molaire en O2 et CO2 et indirectement de la variation de la température intérieure et du taux d'humidité.

Ces résultats m'ont amené à revisiter la situation-système précédente pour tenir compte des mouvements d'énergie induits par l'oxygène circulant, qui comme causalité essentielle de cette nouvelle fermeture causale, forme ou déforme la cohérence-énergétique (togetherness). Une analyse dimensionnelle permet de vérifier la continuité de puissance résultante de l'homéostasie physico-physiologique régulant les mouvements d'énergie entre un humain et son milieu intérieur (Figure 29, en haut à droite). Puis sa modélisation sous forme d'un diagramme de stock-flow (Figure 29, en bas à droite) met en évidence les boucles de renforcement dues à un déséquilibre de la concentration d'oxygène dans l'air intérieur contrecarrées par des boucles d'équilibre régulant son taux par apport d'air extérieur. Ce qui suggère de surveiller le taux de cette fraction molaire pour améliorer la sensation de confort des occupants. Une orchestration interdisciplinaire avec le physiologiste a permis la vérification de ce modèle par un ensemble d'équations définies dans le cadre de la physiologie intégrative (Mayer et al. 2020) pour formuler mathématiquement les mouvements d'énergie induits par l'oxygène circulant.

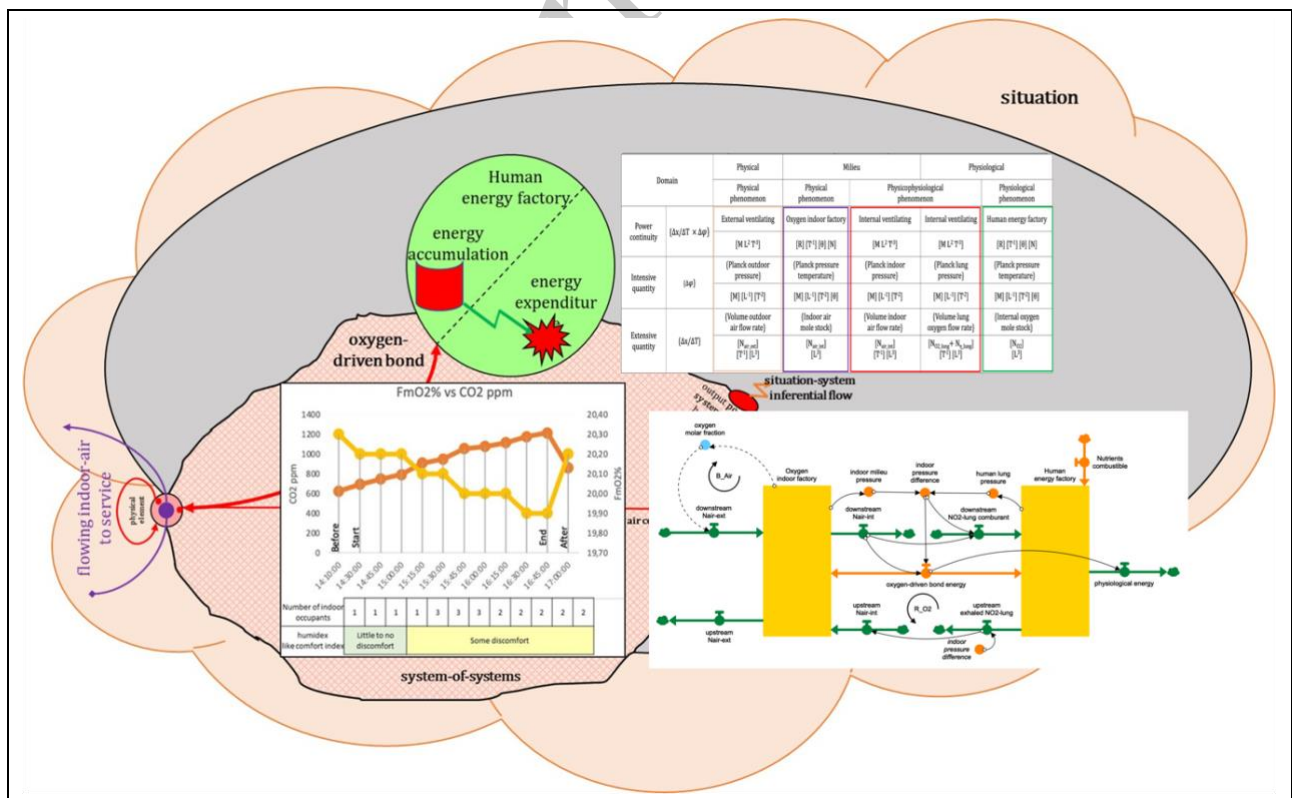


Figure 29 : dynamique de la situation-système projetée de confort

II.2.3.2.3. Perspectives d'architecture système évolutive

Bien que les deux courbes permettent de statuer sur un indice de confort, la différence est que l'homéostasie physico-physiologique sait ce dont elle a besoin pour maintenir sa connectivité énergétique entre la fabrique humaine et le milieu intérieur. Ce qui revient à devoir privilégier ce qui est vital, l'oxygène, à ce qui ne l'est pas, le CO₂.

Une expérience en amphithéâtre avec un « poumon de 60 étudiants » effectuant une activité cognitive d'innovation collaborative a confirmé la pertinence de l'oxygène comme candidat approprié à la contrôlabilité de la QAI. Ce qui fait de la cohérence-énergétique à maintenir ce qui est ciblé par l'orchestration interdisciplinaire des connaissances multidisciplinaires requises en réponse aux nombreuses situations connexes à la situation de confort d'un humain comme, par exemple, celles ayant trait à son confort thermique lié à l'humidité dans un espace confiné ou à son confort psychologique.

De sorte qu'il n'est plus approprié de ne pas considérer la dynamique de la cohérence-énergétique des systèmes de QAI dont certaines défaillances et faiblesses nous rappellent qu'ils présentent de facto un comportement de système physico-physiologique de systèmes technologiques. Cela implique un changement de paradigme d'architecture pour assurer un continuum de connectivité axé sur les données (Figure 30) entre une situation de confort au travail dans la réalité expérientielle (à gauche) et une situation d'ingénierie des systèmes multidisciplinaires distante (ou non) (à droite). Le signalement de situations d'inconfort d'enseignants {T} et d'étudiants {L} en amphithéâtre m'a donné l'opportunité d'un projet de formation par la recherche de pratiques innovantes dans lequel les personnels spécialisés rattachés à mon bâtiment professionnel ont joué le rôle d'architecte-système {A} pour cadrer avec le penseur système {S} la dynamique de la situation-système à contrôler (en bas à droite). Grâce à l'échelle « contenue » de cette situation de projet, l'appropriation par les nombreux actifs éducatifs impliqués (étudiants, ingénieurs, chercheurs, enseignants, ...) des connaissances nécessaires au cadrage de la situation-système est facilitée pour qu'ensemble ils répondent à la question *quelle quantité d'oxygène doit circuler pour maintenir la cohérence-énergétique d'une telle situation-système de confort tout en analysant et en synthétisant un futur système innovant de surveillance de la qualité de l'air intérieur*. Ce projet est également grandement facilité par la maturité des technologies informatiques ambiantes (Rondeau et al. 2015) puisqu'elles permettent de mettre en prise directe la réalité d'ingénierie avec la réalité expérientielle à travers un bus numérique (en bleu) véhiculant les différentes mesures de cette dernière.

À un autre stade du projet, ce bus numérique a également vocation de permettre aux spécialistes de la physiologie {Ψ}, de la physique {φ} et du contrôle {C} d'échanger directement entre eux pour

des questions de spécification du futur système au moyen d'un langage comme *SysML* et/ou de tout autre moyen facilitant la compréhension croisée à condition bien sûr que ces échanges puissent être orchestrés de manière interdisciplinaire comme défini en II.2.2.3.3. En conclusion, il est important de noter que mon groupe de travail soutient qu'un tel paradigme d'architecture innovant contribuerait à un service efficace de bien-être aux occupants de milieux confinés quel qu'ils soient, dans une perspective dynamique plus large de l'unité homme-bâtiment (Travert et al. 2019), en tenant mieux compte de la contribution de la cohérence-énergétique air intérieur-air extérieur à la cohérence-énergétique de la fabrique humaine d'énergie.

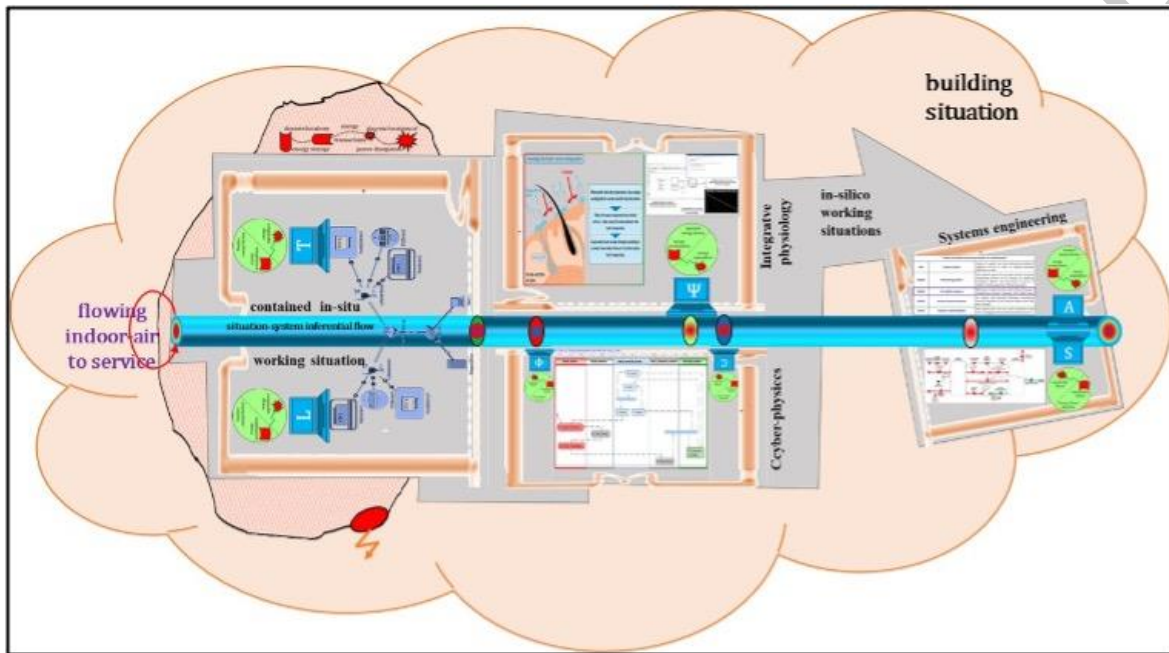


Figure 30 : Orchestration interdisciplinaire de modélisation multidisciplinaire de la dynamique d'une situation-système axé sur l'oxygène circulant

II.2.3.3. Dynamique d'une situation-système d'un réseau électrique

Le phénomène majeur étudié est celui d'homéostasie naturelle de récupération en puissance qui s'est manifesté par une certaine dynamique d'équilibrage $\{B_{\Omega SI}\}$ (Figure 31 en haut au milieu, en violet) en réponse à une perte de synchronisme du réseau électrique européen en novembre 2006⁴⁵.

Le diagnostic qu'en a fait Jean-Pierre Hennebicq, de notre groupe de travail GIGAMHORE, a montré que certains faits qui se sont manifestés par eux-mêmes à certains moments d'état d'énergie discrète sont restés incompris, voire inexpliqués, sur la base connue d'analyse de situations d'état logique discret. Cela l'a amené à proposer la propriété particulière de cyberneconduction $\{\Omega\}$ de la

⁴⁵ <https://www.cre.fr/Documents/Presse/Communiqués-de-presse/conclusions-du-rapport-preliminaire-des-regulateurs-europeens-sur-les-enseignements-a-tirer-de-la-panne-d-electricite-du-4-novembre-20062>

matière-énergie circulante pour expliquer les causalités « tirer-pousser » résultantes de la conjonction d'un routage non planifié de transport d'énergie électrique et d'une production d'énergie variable (éolien).

Ma contribution à la modélisation dynamique (Figure 31) de la réponse intégrative comme un {alternateur équivalent} au contrôle de la situation-système résultante a permis de situer la source de détérioration de l'intégrité-système (wholeness) existante mais aussi de la cohérence-énergétique (togetherness) rémanente dans l'entrefer du réseau électrique examiné comme un système de système énergétiques $\{S\eta \wedge S\eta\}$.

II.2.3.3.1. Situation-système existante

Le contrôle en {fréquence-tension} de la situation-système de consommation est sous la responsabilité d'un contrôleur du réseau (Figure 31 en haut à droite, TSO⁴⁶) dont les outils de pilotage à distance n'ont pas été suffisants pour détecter, entre autres, le phénomène de désynchronisation $\{\Omega_d\}$ (Figure 31 en bas, en violet). La boucle de déséquilibre $\{R_{\Omega_d}\}$ (Figure 31 en haut à droite, en orange) qui en a résulté est due à la difficulté de respecter les règles (informelles) de bonnes pratiques communes de management d'un {SdS} au moment de l'incident. Ainsi, l'outillage courant des opérateurs de contrôle de terrain (Figure 31 en haut à gauche, CPO⁴⁷) ne leur permettait pas de percevoir les phénomènes d'homéostasie naturelle de la matière-énergie circulante qui leur auraient permis de faire face à leur décrochage possible (ou pas) en local du réseau global au moment $\{\Omega_s\}$ (Figure 31 en bas, en violet). Plus précisément, le phénomène d'homéostasie naturelle qui s'est manifesté par lui-même à chacun des moments $\{\Omega_d, \Omega_s, \Omega_{sl}, \Omega_r\}$, en conjonction avec leurs actions logiques et humaines ad-hoc, révèle ainsi un rôle d'équilibrage en {conduction} avec une valeur ajoutée {cyberne} aux moments de la perte puis de la récupération de service. Cet équilibrage s'est réalisé entre les paramètres extrinsèques des situations en amont du domaine mécanique de rotation (et les situations des autres domaines de production) et les paramètres extrinsèques des situations en aval du domaine électrique de pulsation du courant alternatif (et les situations des autres domaines de consommation). Il apparaît en conséquence que la contrôlabilité globale par des échanges informationnels (Figure 31 en haut en bleu), planifiés à l'avance ou en réaction, ne peut pas garantir la cohérence-énergétique (Figure 31 en haut en orange) intriquant de facto des domaines physiques, logiques et humains, bien qu'une certaine robustesse (Figure 31 en bas, en violet) ait permis de

⁴⁶ Gestionnaires du réseau de transport (Transmission system operators)

⁴⁷ Opérateurs de contrôle de centrales (Control plant operators)

rééquilibrer $\{B_{\Omega_r}\}$ les situation-systèmes locaux avec la situation-système globale (Figure 31 en haut à gauche, en violet) par appel d'énergie de réserve (Figure 31 haut, en rouge).

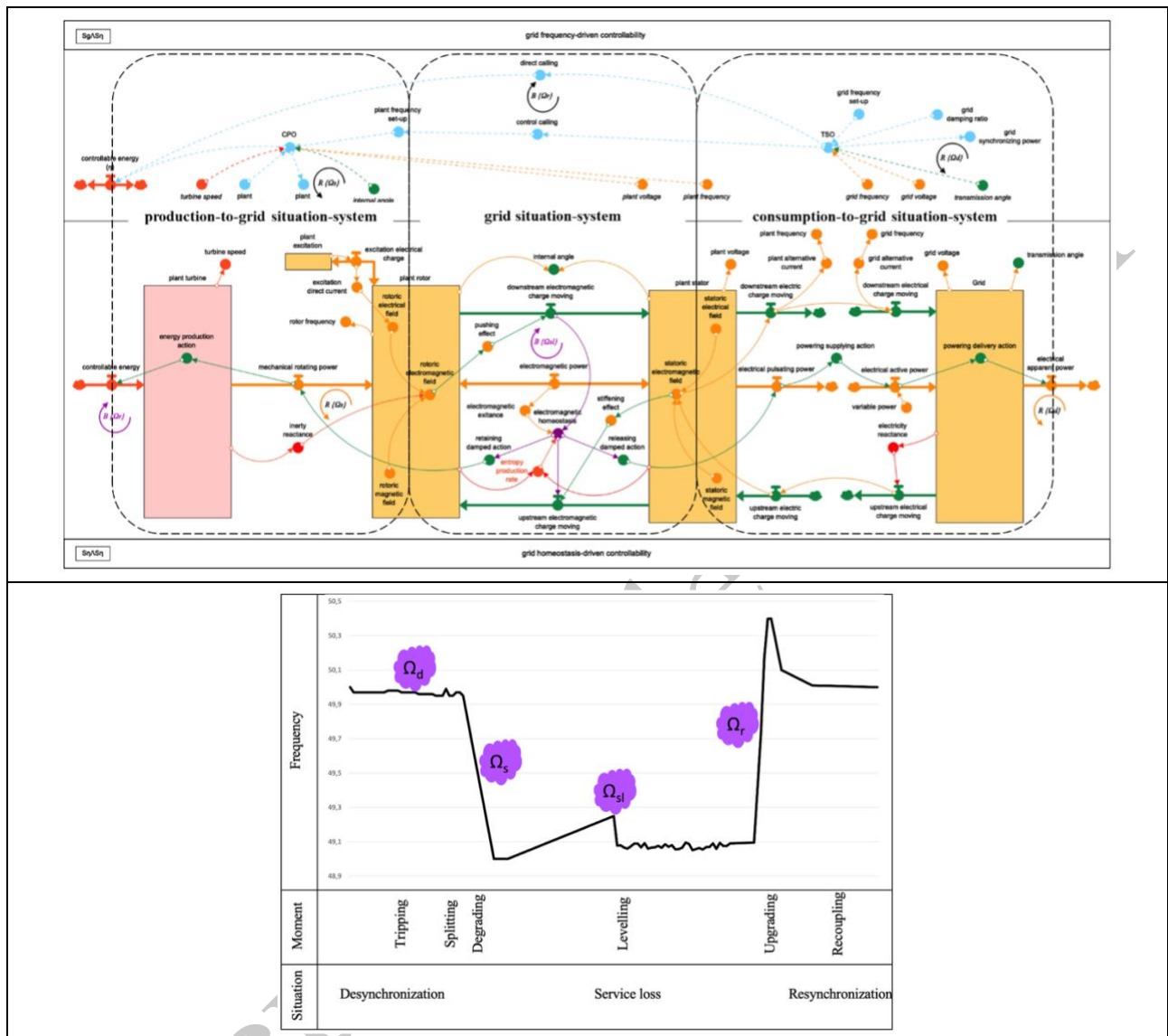


Figure 31: dynamique de la situation-système existante du réseau électrique

Il est dès lors possible de comprendre l'intérêt de ce phénomène d'homéostasie naturelle pour en faire un artefact de contrôlabilité par la cyberneconduction de la matière-énergie circulante (Figure 22). Nonobstant des études approfondies sur la nature électromagnétique de ce phénomène, j'ai trouvé dans les travaux de (Moreschi and Sparling 1984) la possibilité d'adapter la technique d'analogie physique du KPK pour comprendre et modéliser en dynamique des systèmes la conversion électromagnétique dans l'alternateur. Ces travaux permettent d'admettre de façon dimensionnelle par analogie avec un circuit électrique qu'une certaine continuité de puissance entre l'amont et l'aval de l'entrefer (Figure 31 en haut au milieu) résulte du déplacement selon une longueur d'onde d'une quantité de charge électromagnétique. Cette quantité agit (Figure 31 en haut au milieu, en vert) à

travers la {surface} du « clapet d'une vanne » pour diriger de façon vectorielle une {excitation électromagnétique} portant un transfert conductif d'énergie avec des effets de glissement et de dissipation. A partir d'un courant continu électrique d'excitation préliminaire du {champ électromagnétique} rotatif, les charges électriques disponibles sont mises en mouvement en aval par une énergie pulsée pour alimenter le réseau et ainsi délivrer à la consommation respectivement une {puissance active} et une {puissance apparente} caractérisées par des quantités de {tension} et d' {intensité} sous {configuration de fréquence}. En pratique, quatre boucles de contrôle en {tension, angle interne, puissance mécanique, puissance électrique} permettent de pousser à partir de la production une {énergie électrique pulsée} pertinente pour contrer l' {effet de raidissement} relatif à la {réactance inertielle} en amont et à la {réactance électrique} en aval des circuits de puissance à partir desquels une portion réactive contribue à la création des champs électromagnétiques. Un outillage de {puissance synchronisante} (Figure 31 en haut, en pointillé bleu) est exploité par les TSOs et les CPOs à partir d'observables de puissance selon des règles de configuration pour maintenir un rapport d'amortissement de {fréquence/puissance active} en consommation et de {tension/puissance réactive} en production.

II.2.3.3.2. Situation-système projetée

En ayant à l'esprit le phénomène d'hystérésis (effet mémoire) des deux parties ferromagnétiques respectives du stator et du rotor (siège de la perméabilité au fer) reliées par l'entrefer (siège d'une perméabilité à l'air), une analogie complémentaire avec un circuit électrique permet d'évoquer un sixième appariement⁴⁸ (Hayes 2011) entre charge électrique et flux magnétique pour refléter l'enchevêtrement électromagnétique ayant atténué « naturellement » les effets de puissance amont et aval. De sorte qu'il est possible de faire l'hypothèse que la dimension ohmique $[V.I^{-1}]$ de cette {résistance à effet mémoire} dénommée memristance {M}(Chua 1971) puisse en faire un observable constitutif du rapport non linéaire $\{M=V/I\}$ du déplacement dynamique de la frontière entre les flots d'énergie à retenir ou à libérer dans les tuyaux de flux de puissance. En faisant une équivalence dimensionnelle homogène de {M} et $\{\Omega\}$ en $[\text{Planck}/\text{charge}^2]$, la Figure 32 à droite montre l'intérêt de généraliser le rôle dynamique que cette propriété de cyberneconduction $\{\Omega\}$ (convertisseur, en violet) de la matière-énergie pourrait jouer en circulant le long d'un {cyberneconductor} (tuyaux en orange), où des actions formantes et informantes d'énergie (convertisseurs en vert) permettraient des changements spatio-temporels intra et inter-domaines de situations d' {état d'énergie discret}

⁴⁸ En complément des cinq appariements reliant les quatre variables de base {tension, courant, charge, flux magnétique}(Hayes 2011) dans le tétraèdre de base de H.M. Paynter à l'origine des « bond graphs » (Paynter 1958).

(convertisseurs en rouge). Par exemple, pour maintenir la cohérence-énergétique de multiples situations-système lorsque l'allocation d'alimentation du réseau doit être équilibrée $\{B_{\Omega g}\}$ sous conduite globale du TSO (au milieu) à partir de diverses alimentations d'unités de production $\{B_{\Omega g2pi}\}$ et $\{B_{\Omega g2pj}\}$ sous conduite locale d'un CPO (à gauche) afin de satisfaire une consommation variable d'énergie électrique, interruptible $\{B_{\Omega g2cl}\}$ ou non $\{B_{\Omega g2ck}\}$ (à droite).

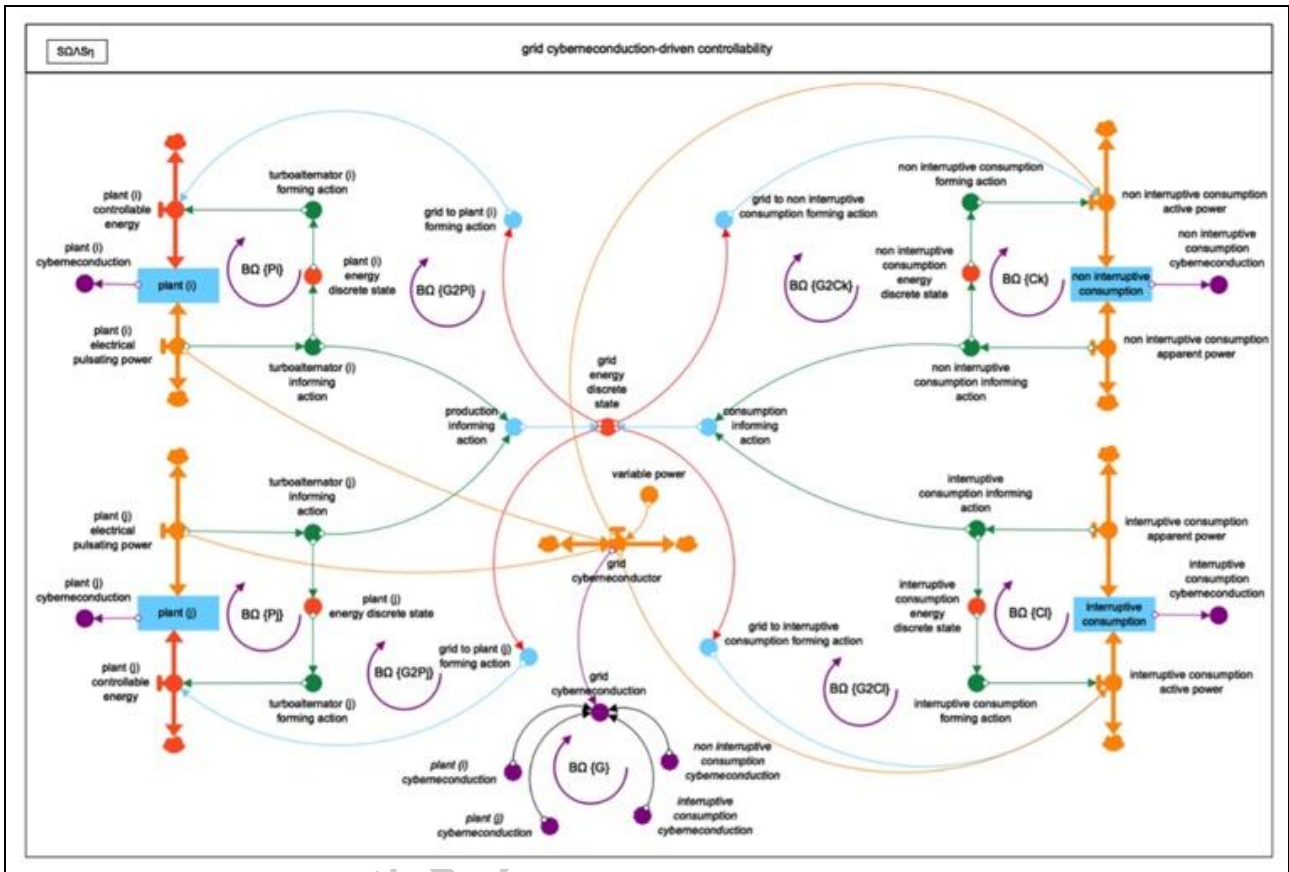


Figure 32 : dynamique de la situation-système projetée

II.2.3.3.3. Éléments de modélisation-système

Il n'est pas dans mon propos de développer le cadre en cours d'outillage de modélisation théorique basée sur la cyberneconduction (Figure 33) pour un déploiement pratique que j'évoque en perspective de contrôlabilité axée sur la cyberneconduction d'une situation-système (section II.3.2.2). Mais il m'importe d'en souligner les traits qui ont incliné ma trajectoire-système.

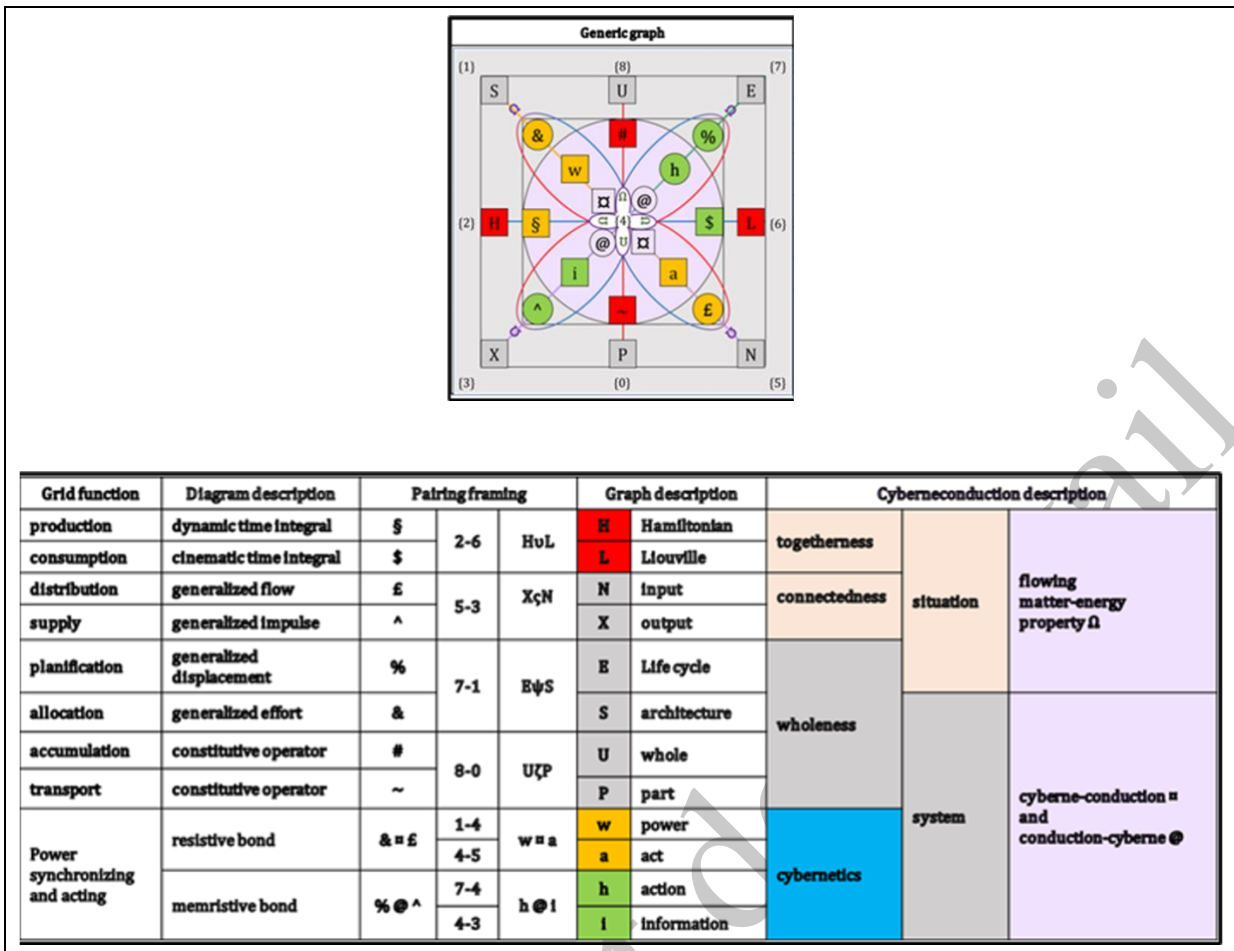


Figure 33 : Cadre théorique de modélisation basée sur la cyberneconduction

Les quatre piliers majeurs de ce cadre de modélisation MTIC sont :

- {Cohérence [H v L]} (respectivement Figure 33 colonne *cyberneconduction description*, colonne *pairing framing*) faisant référence à l'appariement fonctionnel [2 - 6] et au lien spatio-temporel [§ - \$] (Figure 33 en haut) pour représenter la conservation de l'énergie {Hamilton [H]} et la flèche du temps {Liouville [L]} (Figure 33 colonne *Graph description*) dans une direction irréversible.
- {Connexité [£ - ^]} faisant référence à l'appariement fonctionnel [5 - 3] et au lien entrée-sortie [X ç N] pour prendre en compte les causalités d'énergie (linéaires, circulaires et récursives) ordonnées par la matière-énergie circulante.
- {Intégrité [E ψ S] et [U ζ P]} faisant référence aux appariements fonctionnels [7 - 1] et [8 - 0] reliées aux liens {% - &} et [# - ~] pour représenter l'évolution structurelle du réseau examiné comme un {SΩ ^ SΩ}, par exemple le stockage total de l'énergie est organisé l'accumulation et le transport tout comme le service total est organisé selon la planification et l'allocation, ...
- {Cybernétique [w ρ a] et [h @ i]} faisant référence aux appariements fonctionnels de {synchronisation et d'action en puissance} pour représenter les liens de contrôlabilité pilotés par

la cyberneconduction {power to act {& ∞ £}} et {action to information [% @ ^]} en deux parties dénommées {conduction-cyberne [@]} et {cyberne-conduction [∞]} ordonnées par la matière-énergie circulant le long d'un cyberneconducateur.

La compréhension de la modélisation basée sur la cyberneconduction que j'ai dû acquérir, en tant que composition et modification des caractéristiques extrinsèques et intrinsèques pour la perception des phénomènes qui se révèlent par eux-mêmes dans le procédé, permet de guider à différents niveaux la définition de structures de connexité évolutive par rapport à la loi de continuité de puissance. Ainsi, il semble pertinent de considérer à la fois le couplage et le découplage des mouvements de cyberneconduction en amont et en aval pour maintenir la cohérence-énergétique de ces systèmes de systèmes d'énergie électrique, au-delà des règles de réglementation des meilleures pratiques.

Pour illustration d'une analyse fonctionnelle, les appariements antinomiques reflétant la synchronisation puissance-service de {production-consommation [2 - 6]}, {distribution-approvisionnement [5 - 3]}, {planification-allocation [7 - 1]} soulignent le couplage {accumulation-transport [8 - 0]} formant « l'épine dorsale » de la cohérence-énergétique du réseau. Cela suggère les relations et variables généralisées du tétraèdre de Paynter faisant de l'accumulation [#] et le transport [~] les opérateurs constitutifs du lien de base en {puissance [& - £]} pour satisfaire le service [\$ - §] requis. Il m'importe de faire remarquer que la combinaison des relations généralisées de ce tétraèdre avec des préceptes systémiques, comme proposé par (Feliot 1997), m'a permis d'ajouter précédemment (Drapier 1996; Bouffaron 2016) une certaine intégrité formelle énergétique à des patrons d'architecture de processus fonctionnels que ne reflètent pas forcément des techniques spécialistes (Morten 2011). Cependant, l'application du cadre « conceptagon » dans ces travaux s'est révélée insuffisante pour représenter la cohérence-énergétique de l'intégrité-système de l'ensemble des triades ainsi que pour prendre en compte la dimension memristive du lien [% - ^].

J'ai acquis la conviction au cours de ce projet que la {cyberneconduction} pourrait être l'appariement manquant de congruence entre cohérence-énergétique (togetherness) dans la réalité expérientielle et intégrité-système (wholeness) dans la réalité construite en tenant compte du rôle {cybernétique} de {connexité} joué par la matière-énergie circulante.

II.2.3.3.4. Preuve de concept visée

Elle est d'abord relative au corpus scientifique originel de la {MTIC} pour lequel le cadrage simplexe de la dynamique des situations-système pour déchiffrer les causalités de cyberneconduction à partir de l'entrefier dont l'abstraction s'est avérée une contribution interdisciplinaire essentielle à un TRL 2-3. A titre explicatif, lors de l'incident de 2006, les situations-système d'état d'énergie discret

lors de la resynchronisation $\{\Omega_{sl}\}$ et $\{\Omega_r\}$ ont résulté phénoménologiquement d'une action « naturelle » et ad-hoc de {conduction-cyberne @} en réponse à une action de {cyberne-conduction α } incidentelle et ad-hoc aux moments $\{\Omega_d\}$ et $\{\Omega_s\}$. De sorte qu'un changement de paradigme d'ingénierie-système basée sur des modèles (ISBM) dans ce domaine nous semble nécessaire pour rendre visible, pour les TSOs et CPOs, la conduite axée sur la {cyberneconduction Ω } d'un réseau de centrales de production d'énergie électrique. L'architecture-système existante reflète une certaine intégrité d'ingénierie $\{P \zeta U\}$ à des moments de synchronicité logico-physique du procédé de conversion d'une énergie contrôlable en énergie électrique. Cependant, la diachronicité énergétique de la matière-énergie circulante entre ces situations d'état logique discret n'est pas suffisamment explicitée pour maintenir en toute situation d'état d'énergie discret la cohérence-énergétique requise $\{H \vee L\}$ par la structure évolutive $\{E \psi S\}$ de la connectivité $\{N \zeta X\}$ du réseau.

Le projet CASOAR (Effantin and Corformat 1993), en son temps, a mis en évidence la difficulté de piloter automatiquement la production et le transport de l'électricité en raison de la variabilité du contenu des multiples trajectoires énergétiques. Sa déclinaison d'objectif originel de {Commande Automatique du Système Optimisé en Actif et en Réactif} en objectif final de {Commande Automatique du Système Optimisé en Actif compte-tenu du Réseau} a permis ensuite de contourner dans une certaine mesure, par l'information en tant que {SdSe}, cet ancrage énergétique {latch \wedge lock}{rotor \wedge stator} d'une centrale par le réseau en aval pour ce type de $\{S\eta \wedge S\eta\}$. Cependant, la preuve de contrôlabilité axée sur la dynamique de la cyberneconduction visée à l'origine du projet GIGAMHORE pour mieux prendre en compte cet aspect réactif nécessiterait un changement de paradigme de contrôle (commande et conduite) d'un turbo-alternateur.

Une preuve de concept visée (Figure 34) en II.3.2.2 s'appuie sur le paradigme de « Commande Sans Modèle » (Fliess and Join 2021) pour explorer la possibilité d'estimer une mesure $\{\Delta\Omega_{entrefere}/\Delta t\}$ pour calculer une consigne $\{u_\Omega\}$ de commande qui contribue à la conduite humaine (La Delfa 2017) pour jauger la contrôlabilité $\{B\Omega_GP\}$ par la matière-énergie circulante, mais qui ne se substitue pas à la contrôlabilité technique existante, en réponse à des phénomènes incidentels $\{R\Omega_GS\}$ et $\{R\Omega_PR\}$ rendus ainsi visibles respectivement aux TSOs et aux CPOs.

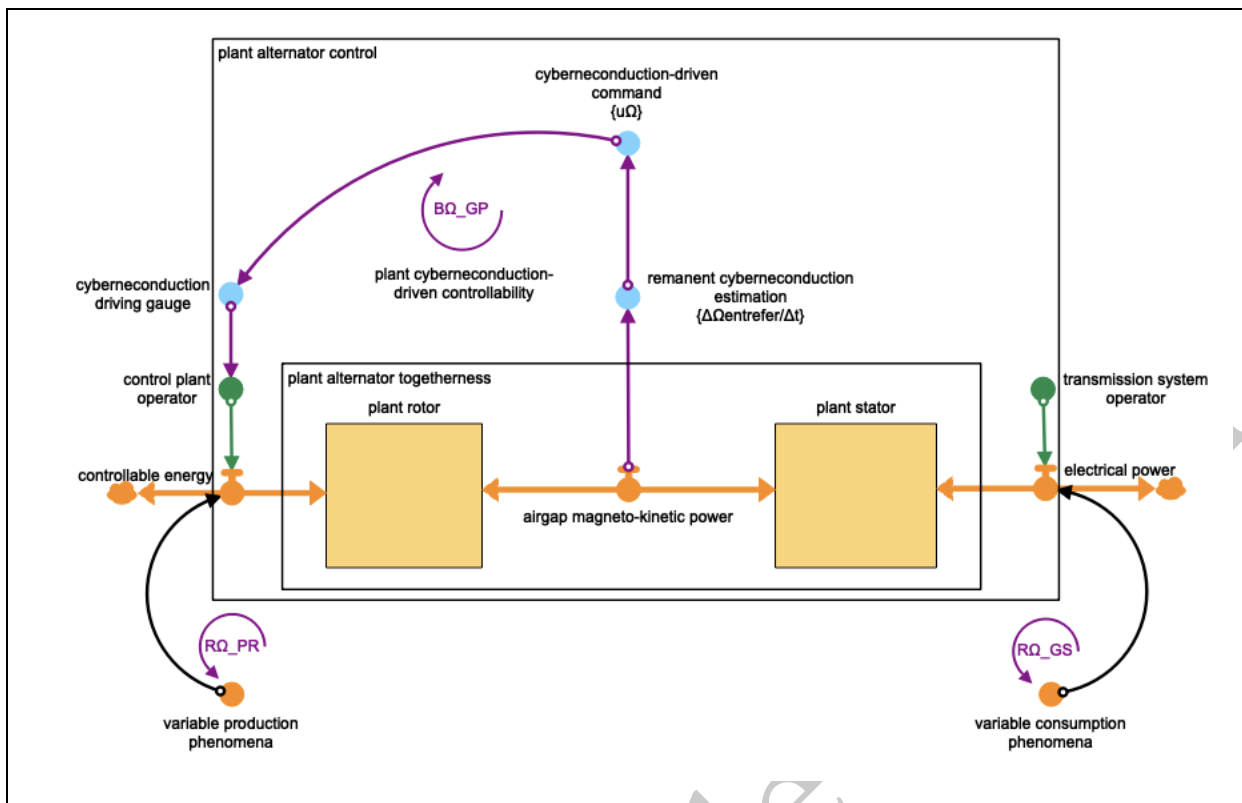


Figure 34 : contrôlabilité d'un réseau électrique examiné comme un $\{S_{\Omega} \wedge S_{\eta}\}$

II.3. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES DU PROJET DE RECHERCHE

En retour de ces expériences interdisciplinaires collaboratives et en regard du corpus scientifique fondé ci-dessus, la compliance avec une organisation de R&D impliquerait de construire dynamiquement une connaissance interdisciplinaire sur une ou plusieurs situations-système d'intérêt « labo » qui seraient intégratives des multiples opportunités de recherche et développement. A titre individuel, je m'efforcerai d'inscrire les opportunités de recherche ci-dessous dans ce schéma d'intégration interdisciplinaire autour d'une situation-système d'intérêt « labo » avec des actifs disciplinaires volontaires.

II.3.1. Opportunités de R&D

II.3.1.1. Acceptabilité physico-logique du MBSE

Une opportunité de R&D dans le cadre de la chaire « ACTE MBSE »⁴⁹ soutenue par l'entreprise Airbus porte sur l'acceptabilité du MBSE logique (numérique) par l'entreprise. Cette approche basée

⁴⁹ MBSE Actionable Collaborative Trustworthy Executable (ACTE)/Model Based Systems Engineering (MBSE)

sur les modèles est d'ores et déjà une réalité dans les départements de conception de l'entreprise mais reste à déployer et à faire accepter dans les autres départements connexes pour supporter plus de travail collaboratif, de partage de modèles et de co-ingénierie d'un système et de ses systèmes support. Il est également important de noter que ce déploiement à l'échelle de l'entreprise s'accompagne également d'un changement des méthodes et des outils « MBSE » actuellement utilisés. Face à cette problématique manifeste d'orchestration interdisciplinaire, j'ai proposé d'explorer dans un premier temps ce qui fait l'intégrité-système des ingénieries multidisciplinaires requises en regard des compétences, des rôles et des activités des acteurs concernés (architects, system engineer, system designers, modeler, technical managers, model manager, requirements manager, ...). En compliance avec mon corpus, un verrou scientifique à explorer dans un deuxième temps consisterait à examiner de façon plus large l'acceptabilité physico-logique du MBSE, au sens des métiers multidisciplinaires connexes impliqués dans la réalité construite, mais aussi ceux qu'il faudrait impliquer pour mieux prendre en compte ce qui pourrait être manifesté par la réalité expérientielle du milieu naturel en regard de l'objet technique en situation-système. Il est facile d'imaginer que cette acceptabilité s'accompagne de la mise en œuvre d'une architecture MBSE évolutive de co-spécification système exécutable basée sur des modèles, inspirée en cela des travaux de Fabien Bouffaron (Bouffaron 2016), actuellement MBSE leader chez Airbus.

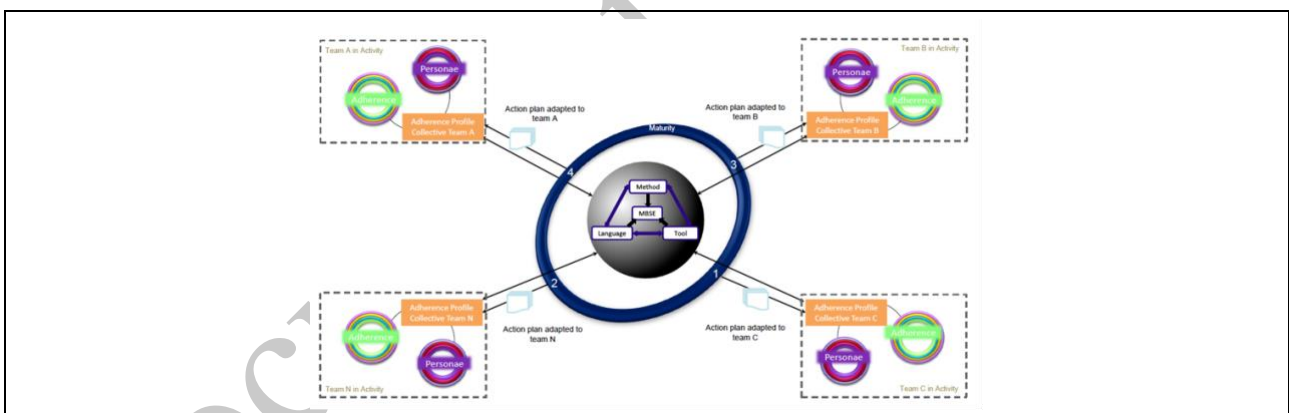


Figure 35 : Cadre méthodologique d'acceptabilité du MBSE (Kosak et al. 2022)

II.3.1.2. Conception collaborative par la matière-énergie circulante

Une opportunité de R&D dans le cadre du projet INEDIT (open INnovation Ecosystems for Do It Together process) porte sur l'intérêt d'un jumeau numérique pour orchestrer un projet en mode « Do It Together » (DIT) de co-conception dans le domaine de l'ameublement. L'enjeu industriel de ce projet est de développer un démonstrateur multisite d'un dispositif de fabrication ouverte (*Open Manufacturing Demonstration Facility*) pour accompagner les PME dans la co-conception et la co-fabrication de nouveaux produits personnalisés, durables, voire « connectés », issus de leurs besoins

d'usage, et dans un délai de commercialisation le plus réduit possible. Ce démonstrateur a pour vocation d'une part de rendre compte de la capacité de travail collaboratif des acteurs (clients, concepteurs, designers, ...) de la filière ameublement examiné comme une intégrité-système de systèmes multidisciplinaires et d'autre part de promouvoir entre ces systèmes une « congruence » numérique en s'appuyant sur les différentes technologies de production pour concevoir un élément de mobilier « de manière individualisée et à la demande ». Ces technologies sont entre aussi bien des imprimantes 3D pour concevoir, par exemple, le prototype d'un sous-produit d'un meuble à valider de manière agile avec les différentes parties prenantes qu'une machine à bois pour le fabriquer.

Dans ce domaine, le procédé de dépôt de matière-énergie est différent du procédé productique d'enlèvement matière-énergie que j'ai appréhendé précédemment. Par contre, le contrôle de ce type de procédé s'apparente à la commande numérique d'une machine-outil, voire d'un robot. C'est la raison pour laquelle j'ai axé principalement ma réflexion sur la liaison produit-procédé, en perspective d'un contrôle par le produit.

En compliance avec mon corpus, j'ai proposé que, pour la fabrication additive, le démonstrateur soit sous la forme d'un jumeau numérique pour rendre compte des propriétés physiques du filament circulant tout au long du procédé d'addition de matière-énergie. La mise en œuvre de ce jumeau numérique a pour objectif de dépasser la boucle de contrôle du procédé physique à travers l'instrumentation d'actionnement et de mesure d'une imprimante 3D pour remettre à la fois le produit et le « maker » dans la boucle de contrôle de la situation-système DIT ciblée (Figure 36). La variabilité thermodynamique du fil circulant devrait nous amener à explorer des modèles de commande décrivant de façon moins analytique le fonctionnement du jumeau numérique pour refléter la dynamique de la cohérence-énergétique (togetherness) de ce type de système de systèmes.

Une perspective de ce travail est de fournir un degré de liberté supplémentaire (compliance) par l'humain à l'ensemble des degrés de liberté des artefacts de l'imprimante 3D pour une contrôlabilité axée sur le filament circulant.

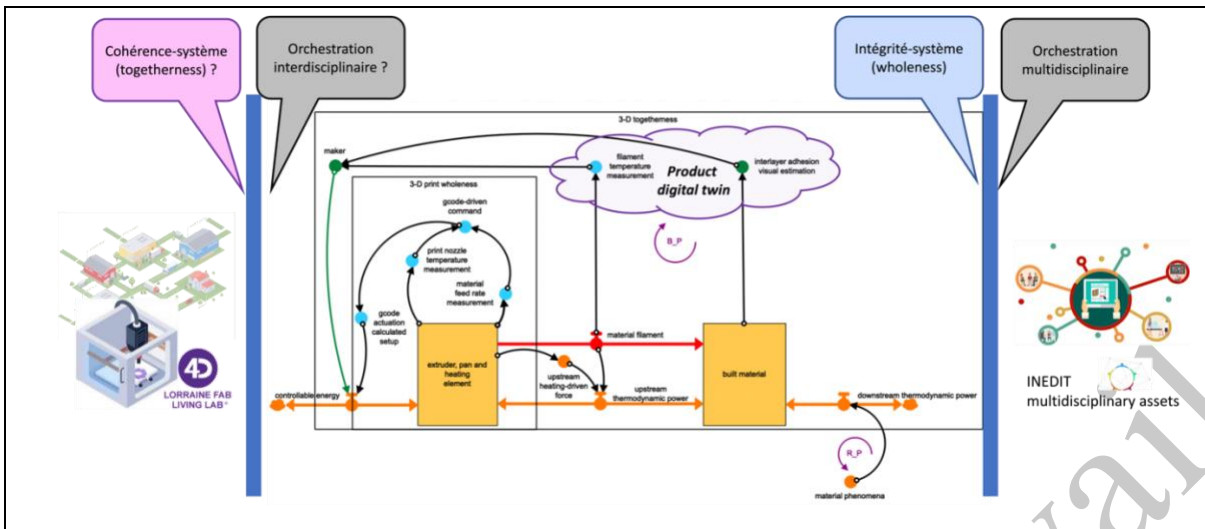


Figure 36 : Orchestration interdisciplinaire de modélisation multidisciplinaire de la dynamique d'une situation-système de co-conception axé sur le produit circulant

II.3.2. Perspectives de R&D

II.3.2.1. Patron formelle de contrôlabilité par le produit circulant

En réponse à ce type de verrou, l'arrivée d'un enseignant-chercheur spécialiste de la TC à l'ENSGSI, Andreï Rodin, m'offre l'opportunité de considérer l'impact fonctionnel d'un objet circulant sur la contrôlabilité d'un système.

A la différence de la manière conventionnelle avec laquelle j'ai mené ces travaux, en encadrement doctoral ou individuellement, je proposerai une situation d'intérêt TC pour orchestrer l'interdisciplinarité basée sur des modèles prouvables (exécutables ou formels) de connaissances mathématico-logico-physique. A l'instar de la cohérence-énergétique d'une situation-système par des analogies physiques présentée précédemment, j'entrevois la possibilité d'une explication formelle basée TC (Figure 37, à droite) de l'analogie que (McFarlane 2003) a fait du paradigme de contrôle par le produit à partir de la synthèse d'un superviseur de contrôle d'une machine (Figure 37, à gauche). Pour cela, je m'appuierais sur quelques principes de cette théorie pour m'affranchir des détails de composition $\{\zeta_C, \zeta_G\}$ d'une boucle de contrôle d'un système $\{Wholeness(C, G)\}$ pour ne voir que la contrôlabilité par le produit circulant $\{P_0\}$ de leurs connexités $\{\zeta_C, \zeta_G\}$ pour former une cohérence-énergétique $\{Togetherness(P_0)\}$, au sens d'une unité tangible en regard de son environnement.

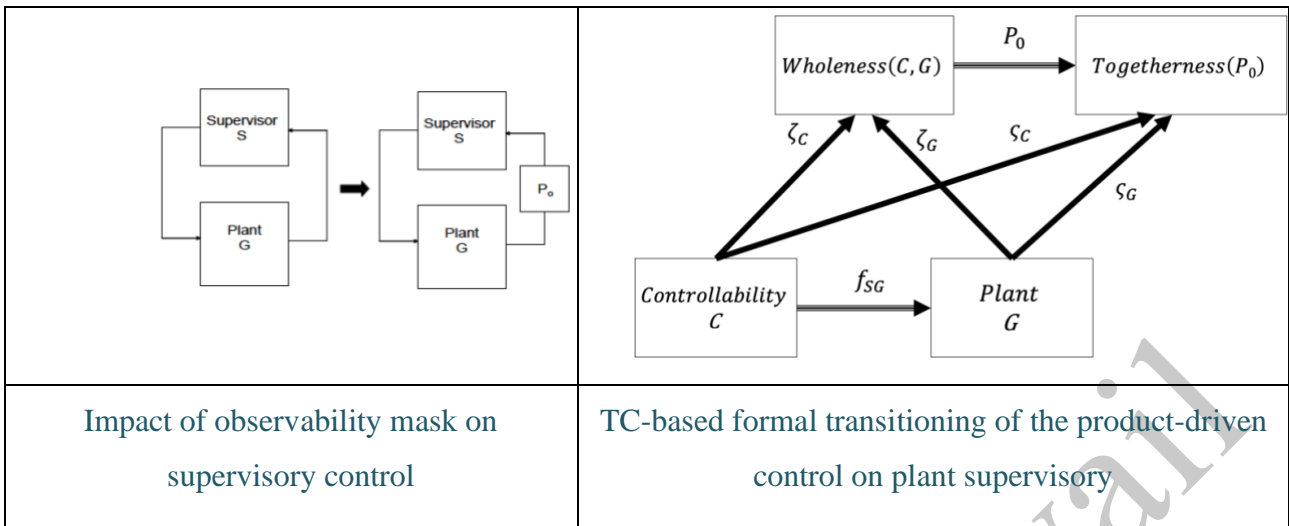


Figure 37 : Différentiation formelle wholeness/togetherness dans le cadre du paradigme de contrôle par le produit

II.3.2.2. Perspective de contrôlabilité par la matière-énergie circulante

Le phénomène visé est celui de la conjugaison de la variabilité de la consommation avec celle de la production en raison de l'impact massif des énergies renouvelables (EnR) qui révèle actuellement la nécessité de maintenir une énergie contrôlable pour éviter une panne systémique $\{R\Omega_GS\}$ à l'échelle de celle précédemment étudiée. Une preuve de concept doit être apportée à l'échelle industrielle de l'intérêt d'un artefact de commande qui reproduirait l'action de $\{\text{conduction-cyberne @}\}$ qui s'est manifestée naturellement à partir de l'entrefer de l'alternateur équivalent d'un réseau électrique ou d'un ensemble d'unités de production, voire de celui d'une unité particulière, pour équilibrer une action de $\{\text{conduction-cyberne } \# \}$ à certains moments une situation-système d'état d'énergie discret.

Dans cette perspective, il est possible d'admettre qu'il soit difficile de rendre compte des multiples trajectoires de cyberneconduction par un modèle mathématique complet (Fliess 2022) en temps-variant d'un contrôle automatisé⁵⁰ de façon historique (Dang Van Mien et al. 1994). Le paradigme de la « Commande Sans Modèle » s'aligne bien dans son essence avec celui de contrôle discret axé sur le produit. Nous soutenons, par une certaine analogie, que le rôle de synchronisation à certains moments d'état d'énergie discret pourrait être joué en tant que $\{\text{puissance } \wedge \text{ action}\}$ par des données de la matière-énergie circulante afin d'assurer la cohérence-énergétique d'un réseau électrique en tant que $\{S_\Omega \wedge S_\Omega\}$. Sa formulation simplexe $\{\Delta\Omega/\Delta t = F_\Omega + \alpha u_\Omega\}$ indique qu'une observable $\{F_\Omega\}$ peut

⁵⁰ $\{\dot{x} = Ax + Bu\}$ and $\{y = Cx + Du\}$ avec x, u, y appelé respectivement état, vecteur d'entrée, de sortie et A, B, C matrice correspondante

être estimée et mise à jour de manière ultra-locale sur un temps court à partir des données des valeurs passées de Ω et u_Ω , incluant non seulement la structure évolutive du système mais aussi toute perturbation (α est choisie par le praticien de telle sorte que les trois termes de l'équation aient la même magnitude (Lafont et al. 2020). Cette formulation, dont nous avons évalué la pertinence dans les travaux de (Bouffaron 2016) pour le contrôle du procédé, pourrait permettre d'adapter un flot d'énergie contrôlable en boucle fermée sur le réseau par une certaine quantité estimée de cyberneconduction $\{\Omega\}$ afin de rendre compte phénoménologiquement⁵¹, à l'entrefer ou en amont, de l'influence statorique du réseau ainsi que des autres unités couplées au niveau rotorique de chaque turbogénérateur de production électrique. Il faut noter que, dans ces travaux, l'algèbre pour identification et estimation numériques⁵² sous-jacent à la CSM a permis d'approximer « phénoménologiquement » le modèle du procédé par une équation différentielle valable sur un court laps de temps et remise à jour continument, plutôt que d'avoir recours à une identification formelle de sa fonction de transfert.

Ma contribution dans la continuité du projet « GIGAMHORE » porte sur l'abstraction de ces différentes alternatives par une représentation de la dynamique des situations-système ciblées. A titre illustratif, ces alternatives doivent estimer une dimension memristive $[F_{\Omega_{entrefer}}] = [V.I^{-1}] = [ML^2T^{-1}Q^{-2}]$ et de façon plus générale en MTIC, une dimension $[F_\Omega] = [Planck.Unité_{domaine}^{-2}]$ à partir de données existantes disponibles au rotor et au stator pour calculer la commande à appliquer $\{u_\Omega\}$. En pratique, la nature compositionnelle de $\{F_{\Omega_{entrefer}}\}$ et $\{\Omega_{entrefer}\}$ devrait permettre une combinaison adéquate d'autres caractéristiques existantes ou améliorées par la technologie, par exemple de mesurabilité du flux d'entrefer (Jacq et al.), pour faire la preuve de faisabilité de ce concept de contrôlabilité guidée (Figure 38) par la dynamique de la cyberneconduction $\{B\Omega_GP\}$ en tenant compte du savoir-faire existant.

⁵¹ A la condition de pouvoir considérer cette échelle locale en regard de celle globale d'un réseau, ou d'un groupe d'unités de production.

⁵² <http://alien-sas.com/>

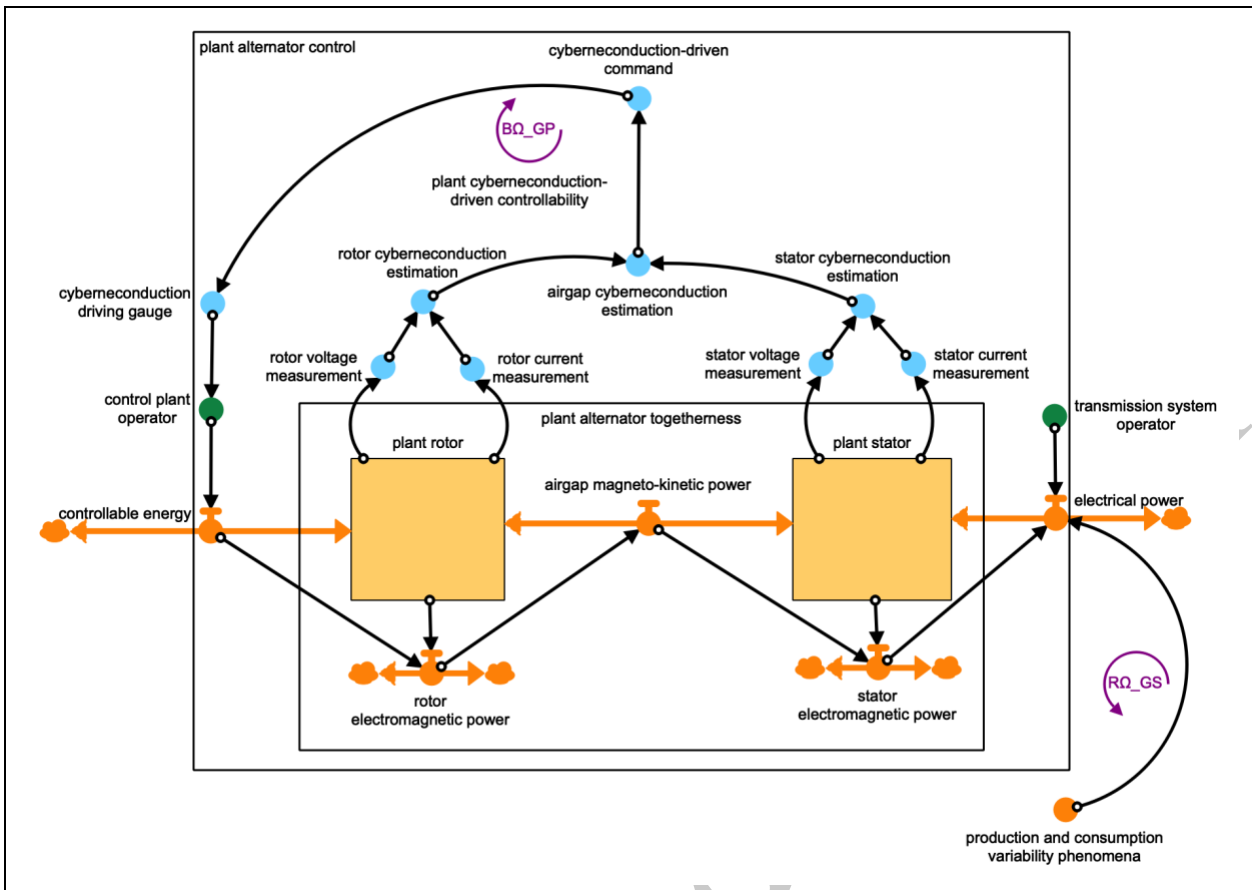


Figure 38 : Contrôlabilité d'un $\{S\Omega dS\Omega\}$ guidée par la cyberneconduction

Dans le contexte actuel de développement d'innovations digitales pour la performance du nucléaire⁵³, une étape intermédiaire de transition de schématique à modèle (Devic 2014) vise à préserver des décennies de connaissances et de savoir-faire (Tyran 1984) afin de disposer d'un entrepôt de données numériques interprétables en ligne par une « intelligence humaine ou artificielle » aussi bien en exploitation qu'en ingénierie. L'un de ces démonstrateurs est un jumeau numérique de surveillance en temps réel du fonctionnement d'un alternateur, soulignant ainsi son rôle essentiel de maintien d'une qualité de service contrôlable d'énergie électrique. Nous voyons alors dans la capacité énergétique d'« intelligence naturelle » manifestée par la cyberneconduction pour équilibrer les effets d'énergie en amont et en aval de l'entrefer d'un alternateur, l'opportunité de faire évoluer ces patrons d'architecture-système tirée par l'évolution technologique.

⁵³ Connexlab, laboratoire d'innovation de la filière nucléaire situé à EDF lab-Saclay.

II.4. PERSPECTIVES PÉDAGOGIQUES DU PROJET DE RECHERCHE

Je présente ci-dessous trois projets d'enseignement pour aligner ma pédagogie pour « penser système l'ingénierie de systèmes multidisciplinaires » avec le corpus acquis par la pratique interdisciplinaire de projets de R&D.

II.4.1. Formation à l'orchestration interdisciplinaire dirigée par une situation-système multidisciplinaire ciblée

La pédagogie par projets à l'ENSGSI est le socle de formation des étudiants au caractère multidisciplinaire d'une solution-système à un ensemble de problèmes ou d'opportunités dans une certaine réalité d'entreprise. La question qui se pose est le rôle du couple formateur/apprenant en regard d'une partie-prenante tierce qu'est l'entreprise sans suffisamment de formation ou d'auto-formation à l'interdisciplinarité en amont.

Dans un premier temps, j'ai prôné le partage d'une situation-système intégrative de 5 domaines, _mécanique, thermodynamique, physique, ingénierie système et dynamique des systèmes_, en l'occurrence une situation relative à l'orientation d'une partie du flux d'air brassé par une éolienne vers des pieds de vignes pour maintenir les conditions de leurs développements (par exemple, en cas de gel) et dans le même temps d'utiliser l'énergie produite pour satisfaire les besoins en électricité d'un vigneron. Il est facile d'y voir le rôle d'ancrage du vent circulant pour former à la cohérence-énergétique (togetherness) d'un système de systèmes au cours de l'apprentissage de son intégrité-construite (wholeness).

L'alternative que je vise dans un deuxième temps est de s'affranchir au plus tôt de la partie-prenante tierce, par exemple le vigneron, pour ancrer la formation à l'interdisciplinarité sur une situation-système « ingénierisable » par les enseignants et les étudiants à l'ENSGSI. Pour illustration, il est possible d'imaginer d'y installer une mini-éolienne pour traiter en amont le problème industriel à l'échelle d'une mini-vigne.

A court terme de manière pragmatique, j'envisage la mise en œuvre d'une situation-système analogue à celle de confort décrite en II.2.3.2 avec pour différence de combiner le principe de modélisation de la dynamique des systèmes avec les principes d'analogies physiques et d'analyse dimensionnelle pour se substituer au seul principe de spécification d'une intégrité-système répondante en langage SySML. En d'autres termes, il s'agit de dépasser une logique d'intégrité-système basée sur l'innovation technologique pour mieux faire appréhender l'influence d'un milieu environnant, dans la perspective d'architecture système évolutive visée en Figure 30.

Ces deux temps reflètent la difficulté de faire adhérer une équipe pédagogique à ce changement. Par exemple, l'apprentissage au management opératoire de tâches dans un projet pédagogique de formation à l'ingénierie-système avant l'apprentissage au management séquentiel conventionnel des phases d'un projet. Dans ce domaine, il faut garder à l'esprit que la certification ASEP (associate systems engineering professional) requiert 5 ans d'expérience professionnelle pour un ingénieur-système junior et plus pour un sénior-expert, voire un chef de programme (leader)⁵⁴. Bien que notre formation soit référencée, je considère que la formation initiale aux bonnes pratiques d'ingénierie-système doit s'enseigner sur une situation-système à l'échelle des connaissances multidisciplinaires d'une équipe pédagogique.

II.4.2. Formation à l'orchestration interdisciplinaire guidée par des situations-système multi-domaines

A l'inverse, la difficulté d'application de cette pédagogie à l'interdisciplinarité dans la formation que je dispense à l'école doctorale SIMPPE réside dans l'hétérogénéité des situations d'étude possibles d'autant plus que certaines d'entre elles sont uniquement théoriques et/ou qu'elles sont représentées dans un langage métier propre au domaine traité. Ce que je prône est d'introduire une notation formelle en système dynamique pour cadrer et modéliser une situation-système spécialiste, par exemple dans le domaine pharmacologique dont la Figure 39 illustre une forme de diagramme de boucle causale. Dans le cas d'études séparées dans un même domaine, l'objectif est de faire prendre conscience aux doctorants qu'elles peuvent relever de la même situation-système, posant de facto la question de l'orchestration interdisciplinaire de leurs travaux (par exemple, en génie des procédés de l'extraction d'un minerai et de purification pour son utilisation industrielle). Dans le cas des doctorants de l'ERPI, au-delà de mieux percevoir chacun de leurs cas d'étude, mon objectif est de les sensibiliser à l'intérêt de construire une connaissance interdisciplinaire « labo » intégrative de leurs résultats individualisés dans le domaine des processus innovatifs. L'intérêt de l'école doctorale SIMPEE pour ce module qualifié de transverse est d'objectiver son essence multidisciplinaire multi-domaine, couvrant au fil du temps des domaines de formation relatifs aux sciences et ingénierie à l'échelle des molécules, des produits, des procédés et de l'énergie.

⁵⁴ <https://www.incose.org/systems-engineering-certification>

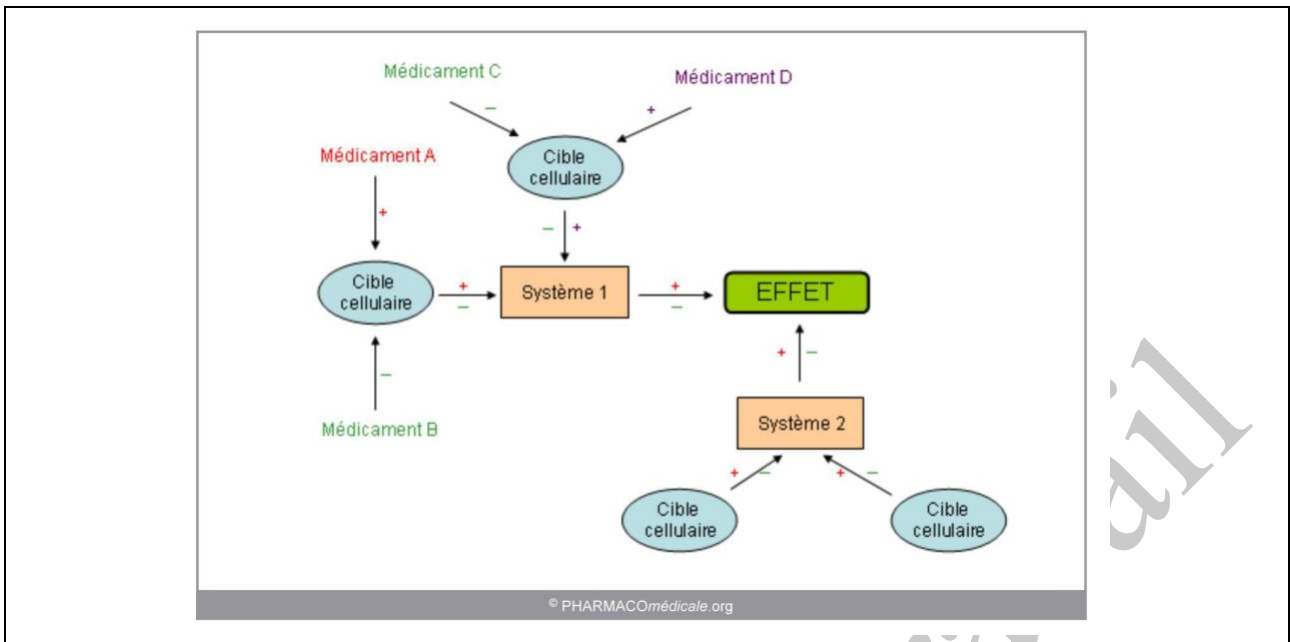


Figure 39 : illustration d'une représentation non formelle d'une situation-système à formaliser

Document de travail

ÉPILOGUE

En synthèse de ce parcours de modélisation d'une situation-système multidisciplinaire, mes réponses aux questions à explorer en Figure 23 portent sur trois aspects :

- Intégrité-système construite résultante d'une orchestration centrée sur le produit circulant des éléments architecturaux de base - physiques (en rouge), logiques (en bleu) et humains (en vert) – architecturés de manière simplexe par des éléments de transmutation (en gris),
- Intégrité-système énergétique résultante d'une connexité environnante naturelle entre les éléments que je prends en compte à travers la matière-énergie circulante,
- Ancrage à travers la situation-système de la réalité d'ingénierie, siège de l'orchestration multidisciplinaire, sur la réalité expérientielle, siège de la cohérence-énergétique.

En retour de ces expériences interdisciplinaires collaboratives et en regard du corpus scientifique fondé ci-dessus, la compliance avec une organisation de recherche et d'enseignement impliquerait de construire dynamiquement une connaissance interdisciplinaire sur des situations-système d'intérêt « labo ou école » qui seraient intégratives des connaissances multidisciplinaires acquises au fil des opportunités de recherche et d'enseignement.

Pour celles dont j'assumerai la responsabilité, je m'efforcerai d'appliquer ce schéma d'interdisciplinarité avec des actifs disciplinaires volontaires académiques et industriels pour placer en situation d'acquisition interdisciplinaire les étudiants et les doctorants en ingénierie de systèmes multidisciplinaires. Cette voie pour créer une harmonie (togetherness) de connaissance collective serait complémentaire d'une pratique tirée par les opportunités de projets, de doctorats, etc. qui sont partiellement des intégrités construites (wholeness).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam K (2011) Contribution au procédé de modélisation d'un système complexe: application au comportement émergent d'un système de systèmes. Master R, Institut National Polytechnique de Lorraine
- AFNOR FD X50-271 (2013) Management de l'innovation - Guide de mise en oeuvre d'une démarche de management de l'innovation. AFNOR, Paris, France
- Albus JS (1991) Outline for a theory of intelligence. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 21:473–509
- Allegro BD, Leput A, Tucoulou JC (2014) Guide: Introduction au Penser Systeme. AFIS, Paris, France
- Andler D (1992) Introduction aux sciences cognitives. Le Seuil, Paris, France
- Anses (2013) Concentrations de CO2 dans l'air intérieur et effets sur la santé. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du tra, Maisons-Alfort, France
- Ashby WR (1958) General systems theory as a new discipline. In: Facets of systems science. Springer
- Autran F, Auzelle JP, Cattan D, et al (2008) Coupling Component Systems towards Systems of Systems. Utrecht, The Netherlands
- Auzelle J-P (2009) Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un système d'information en entreprise centré sur le produit. THESE, Université Henri Poincaré - Nancy I
- Auzelle J-P (2005) Construction de l'objet de connaissance autour de l'offre scientifique et de la demande industrielle : étude d'une modélisation du processus d'échange de connaissances. Master R, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Auzelle J-P, Lhoste P, Mayer F (2006a) Exchange Information or Knowledge? In: International Symposium on Knowledge Communication and Conferences, 10th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA. -, Orlando, États-Unis, p CDROM
- Auzelle J-P, Mayer F, Lhoste P (2006b) Des technologies de l'information aux technologies de la connaissance ? In: 4ème conférence annuelle sur les avancées de l'ingénierie système, AFIS 2006. 2-4 mai. Toulouse, France

- Auzelle J-P, Mayer F, Lhoste P (2006c) From Information Technologies to Knowledge Technologies? In: 9th IFAC symposium on Automated Systems Based on Human Skill and Knowledge. Nancy, France, p CD Rom
- Auzelle J-P, Morel G, Panetto H, Mayer F (2008) Using Systems of Systems Engineering to Improve the Integration of Enterprise-Control Systems. *Insight Journal of INCOSE* 11:13–14
- Awad E, Dsouza S, Kim R, et al (2018) The moral machine experiment. *Nature* 563:59–64
- Baron C, Daniel-Allegro B (2020) About adopting a systemic approach to design connected embedded systems: A MOOC promoting systems thinking and systems engineering. *Systems Engineering* 23:261–280. <https://doi.org/10.1002/sys.21513>
- Bar-Yam Y (2004) A mathematical theory of strong emergence using multiscale variety. *Complexity* 9:15–24. <https://doi.org/10.1002/cplx.20029>
- Bateson G (1984) *La nature et la pensée*, Seuil. Paris, France
- Beer S (1984) The viable system model: Its provenance, development, methodology and pathology. *Journal of the operational research society* 35:7–25
- Berthoz A (2014) *Simplexity: Biologically Inspired Principles for Complex Systems*
- Berthoz A (2009) *Simplexité*. Odile Jacob
- Berthoz A, Petit J-L (2006) *Phenomenology and physiology of the action*. Odile Jacob
- Beuche D, Papajewski H, Schröder-Preikschat W (2004) Variability management with feature models. *Science of Computer Programming* 53:333–352
- Bignon X (2003) *Intégration de Processus de Maintenance : application à TDF*. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Bjelkemyr M (2009) *System of Systems Characteristics in Production Systems Engineering*. Royal Institute of Technology, Department of Production Engineering
- Bjelkemyr M, Semere D, Lindberg B (2007) An engineering systems perspective on system of systems methodology. In: 1st Annual IEEE Systems Conference. IEEE, pp 1–7
- Blecker T, Friedrich G, Kaluza B, et al (2004) *Information and management systems for product customization*. Springer Science & Business Media
- Boardman J, Sauser B (2008) *Systems thinking: Coping with 21st century problems*. CRC Press
- Boardman J, Sauser B (2013) *Systemic Thinking: Building Maps for Worlds of Systems*, Wiley. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

- Boardman J, Sauser B, John L, Edson R (2009) The conceptagon: A framework for systems thinking and systems practice. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, pp 3299–3304
- Boly V (2004) Ingénierie de l'innovation: organisation et méthodologies des entreprises innovantes., Hermès Sciences Publication. Paris, France
- Bombled J-P (2014) Emergences des systèmes “techniques” et “humains”
- Bouffaron F (2016) Co-spécification système exécutable basée sur des modèles-Application à la conduite interactive d'un procédé industriel critique. Phd Thesis, Université de Lorraine
- Bouffaron F, Dupont J-M, Mayer F, Morel G (2014) Integrative construct for model-based human-system integration: a case study. In: 19th IFAC World Congress, IFAC'14. Cape Town, South Africa
- Boy GA (2017) Human-Centered Design as an Integrating Discipline. *Systemics, Cybernetics and Informatic* 15:25–32
- Boy GA (2020) Human–systems integration: from virtual to tangible. CRC Press
- Bréas M (1993) Problématique de l'intégration de l'action individuelle dans les systèmes technologiques. Utilisation de la description des fonctions pour favoriser l'autonomie. INPL
- Camara Dit Pinto S (2022) Reality Anchor Methodology: Designing a digital twin supporting situation awareness. université Paris-Saclay
- Cambien A (2007) Une introduction à l'approche systémique: appréhender la complexité. CERTU
- Cariani P (1992) Emergence and Artificial Life. In: *Artificial Life II (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Proceedings)*, Addison-Wesley. C. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer and S. Rasmussen, Redwood City, CA
- Casorzo C (2011) Proposition d'une approche de modélisation des projets de transfert de technologie. Master R, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Castro E (2010) Contribution à l'Ingénierie de l'Innovation : Proposition d'un cadre de modélisation pour un système d'innovation centré sur le produit. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Castro E, Mayer F, Lhoste P (2009) Contribution to Innovation Engineering: modelling the innovation process. In: 8ème CIGI Congrès International de Génie Industriel
- Castro Espiritu E, Mayer F, Lhoste P (2008) Contribution to the Formalization of Individualized Processes during Product Innovation. In: 3rd European Conference on Management of Technology, EUROMOT. Nice, France, p 200

- Chapurlat V (2015) De l'Exigence à la Propriété : définitions et formalisations pour la vérification de modèles en Ingénierie Système
- Chauvet G (2002) On the mathematical integration of the nervous tissue based on the S-propagator formalism I: Theory. *Journal of integrative neuroscience* 1:31–68
- Chua L (1971) Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on circuit theory* 18:507–519. <https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>
- Claeys D (2013) Architecture & complexité. Un modèle systémique du processus de (co) conception architecturale. Damien Claeys et Presses universitaires de Louvain, Bruxelles, Belgique
- Cooper RG (2000) Winning with new products. *Ivey Business Journal* 64:54–60
- Coquet JC (1989) Le discours et son sujet. *Essai de grammaire modale*, Paris Méridien Klincksieck
- Dang Van Mien H, Laperrousaz E, Libaux A (1994) 25.-Exploitation automatique d'une chaîne d'aménagements en période de crue. *Journées de l'hydraulique* 23:711–716
- David Le Bezvoët M (2013) Proposition d'un système de pilotage du processus d'innovation NSD pour le secteur de la finance. Thèse de doctorat, Université de Lorraine
- de Rosnay J (1975) *Le microscope*. Points
- Declerck G, Lenay C (2018) Living in space. A phenomenological account. In: *Mobility of Visually Impaired People*. Springer, pp 3–52
- Devic C (2014) De la schématique progressive à la centrale numérique au service de la productivité des études. *Génie logiciel*
- D'irribarne P (1994) 10 ans des A.I.P.L.
- Dong X, Wu Y, Chen X, et al (2021) Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review. *Science of The Total Environment* 786:147537
- Drapier S (1996) Modélisation du processus d'ingénierie intégrée de mécanisation et d'automatisation d'une fonction de maintien et de positionnement d'un objet discret dans un tour à commande numérique. DEA, Université Henri Poincaré - Nancy I
- Ducrocq A (1960) *Logique générale des systèmes et des effets, introduction à l'intellectique*. Dunod
- Ducrocq A (1996) *concept de sémantiel et phénomène d'émergence*. France
- Dulmet M, Lhote F (2001) Analyse et caractérisation des couplages entre processus dans les systèmes de production. *Journal européen des systèmes automatisés* 35:1193–1214
- Dupont J-M, Mayer F, Bouffaron F, et al (2019a) Spécification centrée Système d'interactions physico-physiologiques de perception sensorielle. In: *Défis de l'automatisation des systèmes*

- sociotechniques, ISTE. Frédéric Vanderhaegen, Choubeila Maaoui, Mohamed Sallak, Denis Berdjag, London, United Kingdom
- Dupont J-M, Mayer F, Bouffaron F, et al (2019b) System-centered Specification of Physico-physiological Interactions of Sensory Perception. In: Automation Challenges of Socio-technical Systems, ISTE-Wiley. Frédéric Vanderhaegen, Choubeila Maaoui, Mohamed Sallak, Denis Berdjag, pp 29–79
- Effantin M, Corfmat JP (1993) Simulation of the operation of a 900 MW PWR nuclear power station in the Casoar project; Simulation du fonctionnement d'une tranche REP 900 MWE dans le projet Casoar. EDF, France
- Ehresmann AC, Vanbremeersch J-P (1997) Information processing and symmetry-breaking in memory evolutive systems. *BioSystems* 43:25–40
- Endsley MR, Bolté B, Jones DG (2003) Designing for situation awareness: An approach to user-centered design. CRC press
- Faisandier A (2015) System notion and engineering of systems. Sinergy'Com
- Fanmuy G, Fraga A, Llorens J (2012) Requirements verification in industry. In: Complex systems design and management conference. Paris, France
- Fass D (2006) Rationale for a model of human systems integration: The need of a theoretical framework. *Journal of Integrative Neuroscience* 5:355–372
- Fayol M (2003) La compréhension: évaluation, difficultés et interventions. Comprendre
- Feliot C (1997) Modélisation de systèmes complexes: intégration et formalisation de modèles. Lille 1
- Fernez-Walch S, Romon F (2006) Management de l'innovation, Vuibert. Helfer J.P. et Orsoni J.
- Fliess M (2022) Contributions à l'automatique. INS2I CNRS INFO
- Fliess M, Join C (2021) An alternative to proportional-integral and proportional-integral-derivative regulators: Intelligent proportional-derivative regulators. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*
- Forrester JW (1968) Principles of Systems, Allen Press, Inc., Cambridge. Cambridge, USA
- Forrester JW (1961) Industry dynamics. Massachusetts, Cambridge
- Frachet JP (1987) Une introduction au Génie Automatique : faisabilité d'une chaîne d'outils CAO pour la conception et l'exploitation des machines automatiques industrielles. Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Physiques, Université de Nancy I

- Fraisopi F (2014) La simplicité, ou ce que les modèles n'arrivent pas à saisir. In: Complexité-Simplicité, OpenEdition Books. Berthoz. A et Petit J.L., Collège de France, Paris
- Fréchin V (1997) Contribution de la systémique à la formulation d'un modèle général pour la mise en place d'un essai de phase III dans le cadre de l'obtention de l'autorisation de mise sur le marché d'un nouveau médicament. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Fuchs HU (2010) The dynamics of heat: a unified approach to thermodynamics and heat transfer. Springer
- Galara D (2006) Roadmap to master the complexity of process operation to help operators improve safety, productivity and reduce environmental impact. Annual Reviews in Control 30:215–222
- Galara D, Gouyon D, Pétin J-F, Morel G (2012) Connexion cluster: concepts and frameworks. In: 24th International Conference on Software & Systems Engineering and their Applications, ICSSEA'12
- Garcia Jr JS (2009) Executable and Integrative Whole-System Modeling via the Application of OpEMCSS and Holons for Model-based Systems Engineering. INSIGHT 12:21–23
- Garro O (1997) Contribution à la modélisation de la conception des systèmes mécaniques. HDR, Université Joseph Fourier
- Gell-Mann M (1995) The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex. Macmillan
- Gibson JJ (1977) The theory of affordances. Perceiving, Acting and Knowing. Eds Robert Shaw and John Bransford
- Giré A (1988) Théorie ouverte des systèmes : esquisses épistémologiques, L'interdisciplinaire
- Girin J (2011) Empirical Analysis of Management Situations: Elements of Theory and Method. European Management Review 8:197–212
- Godfrin N (1999) Intégration par les flux documentaire d'un processus qualité dans la gestion intégrée d'entreprise : application à la société FRANCE TRANSFO. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Golinelli É (1997) Contribution à la création d'un modèle de compréhension du comportement des acteurs et simulation du marché de la ferraille. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Golinelli É, Mayer F, Chery O (2000) Impact of technology in an environmental method. Aachen, Allemagne

- Gorod A, Gove R, Sauser B, Boardman J (2007) System of systems management: A network management approach. In: 2007 IEEE international conference on system of systems engineering. IEEE, pp 1–5
- Gouyon D (2004) Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse. Université Henri Poincaré - Nancy I
- Gouyon D, Panetto H (2007) Organisation des activités professionnelles et outil de positionnement individuel ou collectif D2: Spécification de l'ontologie pédagogique OPALE
- Gracia JJ (1988) Individuality: an essay on the foundations of metaphysics. Suny Press
- Grégori N, Remoussenard P, Brassica C, Mayer F (1998) A design method for educational multimedia software. IFAC Proceedings Volumes 31:767–772
- Grothendieck A (1957) Sur quelques points d'algèbre homologique. Tohoku Mathematical Journal, Second Series 9:119–183
- Grothendieck A (1986) Récoltes et Semailles : Réflexions et témoignage sur un passé de mathématicien
- Gunter CA, Gunter EL, Jackson M, Zave P (2000) A reference model for requirements and specifications. IEEE Software 17:37–43
- Habrias H (1988) Le modèle relationnel binaire: méthode IA (NIAM). Eyrolles
- Habrias H (2008) En finir avec la boxologie en revenant aux fondamentaux. In: Actes du Colloque National de la Recherche en IUT. Tarbes, France
- Haddad S, Synnefa A, Marcos MÁP, et al (2021) On the potential of demand-controlled ventilation system to enhance indoor air quality and thermal condition in Australian school classrooms. Energy and Buildings 238:110838
- Hall JG, Rapanotti L (2005) Problem Frames for Sociotechnical Systems. In: Requirements Engineering for Socio-Technical Systems, Jose Luis Mate and Andres Silva. IGI Global, pp 318–339
- Halpin T (1995) Conceptual Schema and Relational Database Design, 2nd edn (revised 1999). WytLytPub, Bellevue WA, USA
- Hayes B (2011) The memristor. American Scientist 99:106–110
- Hollnagel E, Fujita Y (2013) The Fukushima disaster—systemic failures as the lack of resilience. Nuclear Engineering and Technology 45:13–20
- Jackson M (1995) The world and the machine. ACM, New York, NY, pp 283–292
- Jackson M (1997) The meaning of requirements. Annals of Software Engineering 3:5–21

- Jacq T, Guillot E, Biet M, et al Procédé de détection d'un défaut d'excentricité d'un rotor d'une machine électrique tournante
- Jin Z (2006) Revisiting the meaning of requirements. *Journal of computer science and technology* 21:32–40
- Kappenman JG (2003) Systemic Failure on a Grand Scale: The 14 August 2003 North American Blackout. *Space Weather-the International Journal of Research and Applications* 1:
- Kapsali M (2013) Equifinality in Project Management Exploring Causal Complexity in Projects. *Systems Research and Behavioral Science* 30:2–14. <https://doi.org/10.1002/sres.2128>
- Koen PA (2004) The fuzzy front end for incremental, platform, and breakthrough products. *The PDMA handbook of new product development* 81–91
- Koestler A (1978) *Janus: A Summing Up*. Calmann-Lévy
- Koné TF (2021) Spécification et démonstration de sûreté du véhicule autonome, basées sur les situations et scénarios d'usage et leur évaluation probabiliste. Thèse de doctorat, Université de Lorraine
- Koné TF, Bonjour E, Levrat E, et al (2019a) Safety demonstration of Autonomous vehicles: a review and future research questions. Paris, France
- Koné TF, Bonjour E, Levrat E, et al (2019b) Challenges for Autonomous Vehicles (AVs) Engineering: Safety Validation of Functional Performance Limitations. *INSIGHT* 22:23–25
- Koné TF, Bonjour E, Levrat E, et al (2020) Safety assessment of scenarios for the simulation-based validation process of AV with regards to its functional insufficiencies. In: 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, ESREL 2020 PSAM 15
- Kooli-Chaabane H (2010) Le transfert de technologie vu comme une dynamique des compétences technologiques : application à des projets d'innovation basés sur des substitutions technologiques par le brasage métallique. Université de Lorraine
- Korsavi SS, Montazami A, Mumovic D (2021) Perceived indoor air quality in naturally ventilated primary schools in the UK: Impact of environmental variables and thermal sensation. *Indoor air* 31:480–501
- Kosak L, Mayer F, Bonjour E, Rivière A (2022) Prerequisites of a methodological framework to favor the adoption of MBSE
- Krob D (2009) Eléments d'architecture des systèmes complexes. *Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques* 179–207

- Krob D (2014) *Éléments de systémique. Architecture des systèmes*. In: *Complexité-Simplicité*, OpenEdition Books. Berthoz. A et Petit J.L., Collège de France, Paris
- Kuras ML (2006) *A Multi Scale Definition of a System*. MITRE
- Kurtz CF, Snowden DJ (2003) The new dynamics of strategy: Sense-making in a complex and complicated world. *IBM Systems Journal* 42:462–483
- La Delfa S (2017) *SECAAC: Système d'Eco-Conduite Auto-Adaptatif au Conducteur*. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis
- Laborit H (1987) *Dieu ne joue pas aux dés*. Grasset
- Lador F, Azabji Kenfack M, Moia C, et al (2006) Simultaneous determination of the kinetics of cardiac output, systemic O₂ delivery, and lung O₂ uptake at exercise onset in men. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 290:R1071–R1079
- Lafont F, Balmat J-F, Join C, Fliess M (2020) First steps toward a simple but efficient model-free control synthesis for variable-speed wind turbines. *arXiv preprint arXiv:201106415*
- Lahlou S (2008) *L'Installation du Monde. De la représentation à l'activité en situation*. Université de Provence-Aix-Marseille I
- Lamsweerde A van (2000) Formal specification: a roadmap. In: *Proceedings of the Conference on the Future of Software Engineering*. pp 147–159
- Langley M, Robitaille S, Thomas J (2011) Toward a new mindset: bridging the gap between program management and systems engineering. *INSIGHT* 14:4–8
- Laroche P (1999) *Re-ingénierie de processus intégrés d'entreprise : application au processus vente et logistique de la société ECLATEC*. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Lavigne JP (2000) *Application des principes de la théorie des catégories à la formalisation d'un mécanisme de modélisation de processus opératoires*. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Lawson HB (2010) *A journey through the systems landscape*. College Publications
- Le Gallou F (1993) *Représentation graphique et modélisation globale*. Prague
- Le Gallou F, Bouchon-Meunier B (1992) *Systémique: théorie & applications*, Lavoisier. Paris, France
- Le Moigne J-L (1977) *La théorie du système général: théorie de la modélisation*, PUF
- Lenfle S (2004) Peut-on gérer l'innovation par projet? In: *Faire de la recherche en management de projet*. Vuibert Fnege
- Levalle RR, Nof SY (2017) Resilience in supply networks: Definition, dimensions, and levels. *Annual Reviews in Control* 43:224–236

- Lhoste P (1994) Contribution au Génie Automatique : Concepts, Modèles, Méthodes et Outils. Habilitation à diriger des recherches, Université de Nancy I
- Lhote F, Chazelet P, Dulmet M (1999) The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing. *Annual Reviews in Control* 23:139–148
- Li Y (2020) Indoor air: A short history of holistic and reductionistic approaches. *Indoor Air* 30:3–6
- Lieber R (2013) Spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique. Université de Lorraine
- Louie AH (2009) More than life itself: A synthetic continuation in relational biology. Ontos verlag, Frankfurt
- Louie AH (2011) Essays on more than life itself. *Axiomathes* 21:473–489
- Luzeaux D (2015) A formal foundation of systems engineering. In: *Complex Systems Design & Management*. Springer, pp 133–148
- Luzeaux D, Ruault J-R, Wippler J-L (2013) Large-scale complex system and systems of systems: Case Studies. John Wiley & Sons
- Maier MW (1998) Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering* 1:267–284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6858\(1998\)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D)
- Malgoire J (2016) Grothendieck : un héritage mathématique fertile. *Pour la Science* 30–37
- Marchetta M (2009) A reference framework following a proactive-product approach for Product Lifecycle Management. Master R, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Marchetta M, Mayer F, Forradellas R (2010) Making Products Active with Intelligent Agents for Supporting Product Lifecycle Management. In *Ibero American Journal of Industrial Engineering (IJIE)* 2:84–107
- Marchetta M, Mayer F, Forradellas R (2009) Making Products Active with Intelligent Agents for Supporting Product Lifecycle Management. In: *JAIIO 2009*. Mar del Plata, Argentine, p 14
- Marchetta M, Mayer F, Forradellas R (2011) A reference framework following a proactive approach for Product Lifecycle Management. *Computers in Industry* 62:672–683
- Marquis P (1991) Contribution à l'étude des méthodes de construction d'hypothèses en intelligence artificielle. Université Henri Poincaré-Nancy 1
- Martin D, McKenna H, Livina V (2017) The human physiological impact of global deoxygenation. *The Journal of Physiological Sciences* 67:97–106

- Masoudi N, Fadel GM, Pagano CC, Elena MV (2019) A review of affordances and affordance-based design to address usability. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED. Cambridge University Press, pp 1353–1362
- Mayer F (1995) Contribution to manufacturing engineering : application to pedagogical engineering at manufacturing training center AIPL. Phd Thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I
- Mayer F (2018) Exploring the notion of situation for responsive manufacturing systems specification issues. In: 16th IFAC INCOM. Bergamo, Italy
- Mayer F, Auzelle J-P (2007) Is system of systems a candidate rationale artifact for enterprise information-intensive system modeling? In: 9th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprise, MITIP 2007. Florence, Italy
- Mayer F, Dupont J-M, Gouyon D, et al (2020) System control of situations perceived by their simplicity: case-study and open-issues. Université de Lorraine, Nancy, France
- Mayer F, Hennebicq J-P, Dupont J-M, Morel G (2022) Outline on situation-system energy togetherness: case-studies and open issues
- Mayer F, Laroche P (2000) Reconciling integrated business packages with an human-centered-organisation : a small enterprise case study. Aachen, Allemagne
- Mayer F, Lavigne J-P (2001) Application of mathematical principles to the formalization of a system-based modeling framework: application to enterprise systems. In: 8th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems. Elsevier, pp 10–16
- Mayer F, Lavigne J-P, Lhoste P (2003) Category theory based approach for IMS modeling. In: 7th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, IMS 2003. Elsevier, Budapest, Hongrie, pp 145–151
- Mayer F, Robert T (2003) Contribution to complex systems modeling process. In: Joint design of technology and organisation. GÖTEBORG, Suède, p
- McFarlane D (2003) Product identity and its impact on discrete event observability. In: European Control Conference (ECC), 2003. IEEE, pp 121–132
- Meinadier J-P (2009) Découvrir et Comprendre l'Ingénierie Système, Cepadues
- Mella P (2009) The Holonic Revolution, Holons, Holarchies and Holonic Networks, The Ghost in the Production Machine. Pavia University Press

- Micouin P (2008) Toward a property based requirements theory: System requirements structured as a semilattice. *Systems engineering* 11:235–245
- Millot P, Debernard S, Vanderhaegen F (2011) Authority and cooperation between humans and machines. In: *The Handbook of Human-Machine Interaction: A Human-Centered Design Approach*, CRC Press. Guy A. Boy
- Milner R (1984) A proposal for Standard ML. In: *Proceedings of the 1984 ACM Symposium on LISP and Functional Programming*. pp 184–197
- Montmain J, Penalva J-M (1998) Operator AIDS: Automation and Supervision. *IFAC Proceedings Volumes* 31:865–871
- Morel G (1992) Contribution à l'automatisation et à l'ingénierie des systèmes de production. Habilitation à diriger des recherches, Université de Nancy I
- Morel G, Bouffaron F, Nartz O, et al (2014) Towards an iterative learning of systems engineering based on models. In: *10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14*. Nancy, France
- Morel G, Panetto H, Mayer F, Auzelle J-P (2007a) System of Enterprise-Systems Integration Issues: an Engineering Perspective. In: *IFAC (ed) IFAC Conference on Cost Effective Automation in Networked Product Development and Manufacturing, IFAC-CEA'07*. Elsevier, Monterrey, Mexique, p CDROM
- Morel G, Panetto H, Zaremba M, Mayer F (2003) Manufacturing Enterprise Control and Management System Engineering: paradigms and open issues. *Annual Reviews in Control* 27:199–209. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2003.09.003>
- Morel G, Roesch M, Véron M (1988) Génie productique, génie X. Grenoble, France
- Morel G, Valckenaers P, Faure J-M, et al (2007b) Manufacturing plant control challenges and issues. *Control Engineering Practice* 15:1321–1331. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.05.005>
- Morel L (1995) Proposition d'un tutorial d'aide a la décision sur la base de concepts systémiques. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Morel L, Mayer F, Renaud J (1996) Decision-aided modelling for industrial system engineering. Lappeeranta, Finlande
- Moreschi OM, Sparling GA (1984) On the positive energy theorem involving mass and electromagnetic charges. *Communications in mathematical physics* 95:113–120. <https://doi.org/10.1007/BF01215757>
- Morin E (1977) *La méthode: la nature de la nature*, Le Seuil

- Morin E (1980) *La méthode: la vie de la vie, Le seuil*
- Morten L (2011) An introduction to multilevel flow modeling. *Journal of Nuclear Safety and Simulation* 2:22–32
- Muther A (1999) *Die Anbieter-Kunden-Beziehung im Informationszeitalter*. Springer Verlag 2000:
- Mutlu M (2020) Numerical investigation of indoor air quality in a floor heated room with different air change rates. In: *Building Simulation*. Springer, pp 1063–1075
- Naslin P (1991) *Les trois masques de la connaissance*, Eyrolles. SIRPE Editeur et Les Techniques de l'Ingénieur
- Nijssen GM, Halpin TA (1989) *Conceptual Schema and Relational Database Design: a fact oriented approach*. Prentice-Hall, Inc.
- Olling GJ, Doumeingts G, Browne J, Tomljanovich M (1991) CIM status and direction in the USA
- Panetto H (2007) Towards a classification framework for interoperability of enterprise applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 20:727–740
- Paynter H (1961) *Analysis and Design of Engineering Systems*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Paynter HM (1958) Generalizing the concepts of power transport and energy ports for system engineering. In: ASME Presented at the 1958 Annual Meeting New York. NY
- Pearl J (2009) *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, 2nd edn. Cambridge University Press
- Penalva JM (1997) *La modélisation par les systèmes en situation complexe*. Paris 11
- Pereira LD, Raimondo D, Corgnati SP, da Silva MG (2014) Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: Methodology and results. *Building and environment* 81:69–80
- Pétin J-F (1995) *Contribution méthodologique à l'actionnement et la mesure intelligents: application au projet esprit III – P.R.I.A.M. N°6188*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I
- Piller FT (2004) Mass customization: reflections on the state of the concept. *International journal of flexible manufacturing systems* 16:313–334
- Rahmani A, Sueur C, Dauphin-Tanguy G (1997) Approche des bond graphs pour l'analyse structurelle des systèmes linéaires. *Linear Algebra and its applications* 259:101–131
- Rana R, Kusy B, Jurdak R, et al (2013) Feasibility analysis of using humidex as an indoor thermal comfort predictor. *Energy and Buildings* 64:17–25
- Robert T (2001) *Contribution à la formalisation qualitative du processus de modélisation d'un système complexe*. DEA, Institut National Polytechnique de Lorraine

- Rondeau E, Lepage F, Georges J-P, Morel G (2015) Measurements and Sustainability. In: Green Information Technology. A sustainable approach., Mohammad Dastbaz, Colin Pattinson and Babak Akhgar. Elsevier, pp 29–59
- Rosen R (1958) The representation of biological systems from the standpoint of the theory of categories. *The bulletin of mathematical biophysics* 20:317–341
- Rosen R (2012) Anticipatory systems. In: Anticipatory systems. Springer
- Rosen R (1985) Anticipatory systems: Philosophical, mathematical, and methodological foundations. Pergamon Press, New York
- Rothman KJ, Greenland S (2005) Causation and causal inference in epidemiology. *American journal of public health* 95:S144–S150
- Rothwell R (1992) Successful industrial innovation: critical factors for the 1990s. *R&d Management* 22:221–240
- Ruault J-R (2014) Guide for the Management of Systems Engineering. *INSIGHT* 17:25–27
- Rydeheard DE, Burstall RM (1988) Computational category theory. Prentice Hall Englewood Cliffs
- Sage AP, Rouse WB (2011) Handbook of Systems Engineering and Management. John Wiley & Sons
- Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, et al (2012) Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives* 120:1671–1677
- Sausser B, Boardman J, Verma D (2010) Systemics: Toward a biology of system of systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans* 40:803–814. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2048024>
- Searle JR, Willis S (1983) Intentionality: An essay in the philosophy of mind. Cambridge university press
- SEBoK Editorial Board (2020) The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge, The Trustees of the Stevens Institute of Technology. R.J. Cloutier, Hoboken, NJ, USA
- Simondon G (1958) Du mode d'existence des objets techniques, Aubier. Paris, France
- Sonin AA (2001) The Physical Basis of dimensional analysis. MIT, Department of Mechanical Engineering, Cambridge, USA
- Travert A-S, Sidney Annerstedt K, Daivadanam M (2019) Built environment and health behaviors: deconstructing the black box of interactions—a review of reviews. *International journal of environmental research and public health* 16:1454

- Tursi A (2009) Ontology-Based approach for Product-Driven interoperability of enterprise production systems. Politecnico di Bari
- Tyran J-L (1984) MAXI-LILLIPUT: A simplified model of a French pressurized water reactor power plant. *Mathematics and Computers in Simulation* 26:160–163. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(84\)90047-8](https://doi.org/10.1016/0378-4754(84)90047-8)
- Valckenaers P, Van Brussel H (2015) Design for the unexpected: From holonic manufacturing systems towards a humane mechatronics society. Butterworth-Heinemann
- Van Brussel H, Wyns J, Valckenaers P, et al (1998) Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in industry* 37:255–274
- van Gaasbeek JR (2000) Before Requirements: What, Who, Where, When, Why, and How. *Insight* 2:11–14
- Vanderhaegen F, Nelson J, Wolff M, Mollard R (2021) From Human-Systems Integration to Human-Systems Inclusion for use-centred inclusive manufacturing control systems. *IFAC-PapersOnLine* 54:249–254
- Vehviläinen T, Lindholm H, Rintamäki H, et al (2016) High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work. *Journal of occupational and environmental hygiene* 13:19–29
- von Bertalanffy L (1968) *General Systems Theory*. G. Braziller, New York
- Wiener N (1948) *Cybernetics*. *Scientific American* 179:14–19
- Zask J (2008) Situation ou contexte ? *Revue internationale de philosophie* 313–328
- Zaytoon J, Riera B (2017) Synthesis and implementation of logic controllers—A review. *Annual reviews in control* 43:152–168