



**HAL**  
open science

# Modèles de données et mécanismes de gestion de l'information distribuée dans des systèmes holoniques : Application à la matière communicante

William Derigent

## ► To cite this version:

William Derigent. Modèles de données et mécanismes de gestion de l'information distribuée dans des systèmes holoniques : Application à la matière communicante. Informatique ubiquitaire. Université de Lorraine (Nancy), 2018. tel-02098190

**HAL Id: tel-02098190**

**<https://hal.science/tel-02098190>**

Submitted on 12 Apr 2019

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

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



ECOLE DOCTORALE IAEM

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Université de Lorraine

Présentée par

**William DERIGENT**

Maître de Conférences – Docteur de l'Université Henri Poincaré Nancy I – 61<sup>ème</sup> section

---

Modèles de données et mécanismes de gestion de  
l'information distribuée dans des systèmes holoniques :  
Application à la matière communicante

---

Soutenue publiquement le 22 juin 2018 devant le jury composé de :

*RAPPORTEURS :*

PR. YVES SALLEZ	UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS
PR. MICHEL ALDANONDO	ECOLE DES MINES D'ALBI
PR. DIMITRIS KIRITISIS	ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

*EXAMINATEURS :*

PR. SAMIR LAMOURI	ARTS ET METIERS PARISTECH ENSAM
DR. VIRGINIE GOEPP (HDR)	INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE STRASBOURG
PR. ERIC RONDEAU	UNIVERSITE DE LORRAINE
PR. ANDRE THOMAS	UNIVERSITE DE LORRAINE



*Sénèque a écrit « Ce n'est pas parce que les choses sont difficiles que nous n'osons pas, mais parce que nous n'osons pas qu'elles sont difficiles ». Qu'il me soit aujourd'hui permis de le paraphraser et d'écrire que c'est surtout parce qu'elles semblent difficiles qu'il faut les oser.*

*« Ad astra per aspera »*

*Sylvaine, Lucile et Juliette, ma Trinité.*



# REMERCIEMENTS

---

---

Mon directeur de thèse, M. Gabriel RIS, qui m'a initié à la recherche en me transmettant son virus, m'a un jour dit qu'un rapport scientifique (article, thèse, HDR) est en moyenne lu 5 fois. Je n'ai jamais retrouvé la source qui le prouvait mais je me plais à penser que c'est vrai et que chacune de nos contributions vogue au gré des années, sur internet, dans les bibliothèques, sur les bureaux de nos doctorants et trouve un jour un lecteur attentif qui prendra le temps de l'ouvrir et de la découvrir.

Alors, aimable lecteur, si tu prends le temps de parcourir ces remerciements, si le hasard a fait que tu t'es penché sur cette humble contribution, soit en le premier remercié. Toi et moi sommes liés par cet attrait pour la curiosité scientifique, qui nous pousse à la recherche de modèles permettant de mieux comprendre une réalité si complexe parfois. Nous nous attelons avec le support de nos laboratoires à la problématiser avant de l'expliquer par des équations ou d'autres outils, seul ou avec l'aide de collègues et d'étudiants. Pour cela, je remercie l'Université de Lorraine et son président M. Pierre Mutzenhardt, mon laboratoire d'accueil, le CRAN CNRS UMR 7039 et son directeur M. Didier Wolf, ainsi que l'ensemble des collègues constituant le département ISET et l'équipe S&O-2I. J'ai eu énormément de plaisir à travailler avec les étudiants que j'ai encadrés en particulier mes doctorants Yannick, Sylvain, Kais et Hang. Merci à eux pour tous ces efforts fournis et tous les résultats obtenus.

Finalement, le disciple se décide un jour à écrire son habilitation pour enfin diriger seul. Cela n'arrive cependant qu'à la fin d'un long processus de maturation scientifique, au cours duquel j'ai été guidé par M. André Thomas, mon parrain scientifique, et M. Eric Rondeau. Je les remercie pour leurs enseignements scientifiques et humains. Je remercie aussi l'ensemble des personnes composant le jury de cette HDR *id est* mes trois rapporteurs M. Yves Sallez, M. Michel Aldanondo et M. Dimitri Kiritsis pour leurs relectures pointues et rapports avisés, ainsi que M. Samir Lamouri et Mme Virginie Goepp pour leurs commentaires ainsi que les discussions intéressantes que nous avons pu avoir lors de la soutenance.

Puis le disciple, devenu à son tour directeur, a maintenant à guider les plus jeunes, à leur insuffler sa passion pour ce merveilleux métier, tout comme son directeur de thèse l'avait fait pour lui. Qui sait, peut-être qu'un jour cela continuera avec mes deux filles Lucile & Juliette, qui ont déjà cette curiosité innée à tous les enfants, remettant en cause ce que nous acceptons si facilement, apportant sans cesse un regard nouveau sur une réalité ancienne. La magie qu'elles insufflent tous les jours dans ma vie est aussi inexplicable que l'intensité de l'amour prodigué par ma famille et par ma bien-aimée Sylvaine, forte et protectrice, capable de supporter mes journées trop longues et mes absences répétées, capable d'être une oreille attentive doublée d'un soutien sans faille. Je t'aime, t'admire, suis fier et chanceux de t'avoir, car c'est toi qui as rendu tout cela possible.

A vous tous, Merci.



---



---

# SOMMAIRE

---



---

Remerciements .....	5
Sommaire .....	5
Table des illustrations.....	11
Liste des tables & tableaux.....	13
Avant-propos .....	15
Chapitre 1. Curriculum vitae et notice d'activités.....	19
1.1 Curriculum Vitae .....	19
1.2 Synthèse des activités liées à la recherche.....	21
1.2.1 Cadre de mes activités scientifiques .....	21
1.2.2 Organisation de conférences, sessions et journées .....	28
1.2.3 Membres de comité scientifique et présidences de session .....	29
1.2.4 Participation à des réseaux de recherche .....	29
1.2.5 Expertise scientifique.....	30
1.2.6 Invitations dans des universités étrangères / échanges internationaux .....	30
1.2.7 Participation à des jurys de thèse .....	30
1.2.8 Participation à des comités de sélection.....	30
1.2.9 Projets de recherche locaux et nationaux.....	30
1.2.10 Responsabilités liées à la recherche .....	33
1.3 Encadrement de recherche.....	33
1.3.1 Thèses .....	33
1.3.2 Post-doctorants.....	36
1.3.3 Masters.....	36
1.3.4 Stagiaires.....	37
1.4 Synthèse des activités pédagogiques .....	37
1.4.1 Présentation des modules enseignés .....	37
1.4.2 Responsabilités pédagogiques et collectives .....	39
1.4.3 Participation à des jurys .....	39
1.5 Liste des publications .....	40
1.5.1 Articles dans revues internationales à comité de lecture référencées dans le JCR ..	40
1.5.2 Autres articles dans revues internationales à comité de lecture :.....	41
1.5.3 Conférences, congrès et colloques internationaux à comité de lecture et actes.....	41
1.5.4 Colloques nationaux avec actes et comité de lecture (6) .....	44
1.5.5 Colloques nationaux sans comité de lecture .....	45
1.5.6 Ouvrages individuels et collectifs .....	45
Chapitre 2. Contexte scientifique & Positionnement .....	47
2.1 Contexte scientifique des travaux.....	47
2.1.1 Système d'information support du cycle de vie du produit .....	47
2.1.2 Pilotage holonique des systèmes industriels & notion de produit intelligent .....	50
2.1.3 Intelligence ambiante .....	53

2.2 Positionnement des travaux présentés .....	55
2.2.1 Produit intelligent comme vecteur d'information pour les SCP .....	55
2.2.2 Paradigme de la matière communicante .....	60
2.2.3 Elicitation des verrous scientifiques .....	62
Chapitre 3. Etat de l'art des modèles et mécanismes .....	65
3.1 Organisation de l'état de l'art .....	65
3.2 Modélisation des données.....	68
3.2.1 Standards supports du cycle de vie du produit.....	68
3.2.2 Ontologies présentes dans la littérature du PLM et du BIM.....	70
3.2.3 Conclusions sur la 1 <sup>ère</sup> partie de l'état de l'art .....	72
3.3 Sélection de données .....	72
3.3.1 Principes de distribution des informations.....	73
3.3.2 Travaux sur les environnements dits « mobiles » .....	78
3.3.3 Conclusions sur la 2 <sup>ème</sup> partie de l'état de l'art .....	81
3.4 Distribution des données .....	82
3.4.1 Présentation des réseaux de capteurs .....	82
3.4.2 Protocoles de stockage de données .....	83
3.4.3 Protocoles de lecture et recherche d'informations dans les réseaux de capteurs.....	86
3.4.4 Conclusions sur la 3 <sup>ème</sup> partie de l'état de l'art.....	87
3.5 Synchronisation de données .....	88
3.5.1 Synchronisation technique .....	88
3.5.2 Synchronisation sémantique .....	92
3.5.3 Conclusions de la 4 <sup>ème</sup> partie de l'état de l'art .....	93
3.6 synthèse de l'état de l'art .....	94
Chapitre 4. Contributions scientifiques .....	95
4.1 Organisation des contributions .....	95
4.2 Contributions au thème 1, « Modélisation des données portées par le produit sur l'ensemble de son cycle de vie » .....	96
4.2.1 Verrou (1) – Modélisation des données .....	96
4.2.2 Verrou (2) – Synchronisation des données .....	102
4.3 Contributions au thème 2, « Gestion de données dans la Matière communicante » ...	110
4.3.1 Verrou (3) - Mécanismes de sélection de données et évaluation de la pertinence.	111
4.3.2 Verrou (4) - Distribution de données sur la matière communicante.....	116
4.4 Synthèse des contributions .....	121
4.4.1 Validation expérimentale systématique .....	121
4.4.2 Pertinence des concepts évoqués .....	121
Chapitre 5. Projets de recherche et d'enseignement .....	125
5.1 Projet de Recherche .....	125
5.1.1 Introduction au projet de recherche .....	125
5.1.2 Cadre du projet de recherche .....	126
5.1.3 Présentation du projet de recherche .....	131
5.1.4 Axe 1 : Formalisation et évaluation des performances de l'ECP .....	132
5.1.5 Axe 2 : Vers une architecture générique de gestion d'informations dans les CPPS .....	137

Mon directeur de thèse, M. Gabriel RIS, qui m'a initié à la recherche en me transmettant son virus, m'a un jour dit qu'un rapport scientifique (article, thèse, HDR) est en moyenne lu 5 fois. Je n'ai jamais retrouvé la source qui le prouvait mais je me plais à penser que c'est vrai et que chacune de nos contributions vogue au gré des années, sur internet, dans les bibliothèques, sur les bureaux de nos doctorants et trouve un jour un lecteur attentif qui prendra le temps de l'ouvrir et de la découvrir.

Alors, aimable lecteur, si tu prends le temps de parcourir ces remerciements, si le hasard a fait que tu t'es penché sur cette humble contribution, soit en le premier remercié. Toi et moi sommes liés par cet attrait pour la curiosité scientifique, qui nous pousse à la recherche de modèles permettant de mieux comprendre une réalité si complexe parfois. Nous nous attelons avec le support de nos laboratoires à la problématiser avant de l'expliquer par des équations ou d'autres outils, seul ou avec l'aide de collègues et d'étudiants. Pour cela, je remercie l'Université de Lorraine et son président M. Pierre Mutzenhardt, mon laboratoire d'accueil, le CRAN CNRS UMR 7039 et son directeur M. Didier Wolf, ainsi que l'ensemble des collègues constituant le département ISET et l'équipe S&O-2I. J'ai eu énormément de plaisir à travailler avec les étudiants que j'ai encadrés en particulier mes doctorants Yannick, Sylvain, Kaïs et Hang. Merci à eux pour tous ces efforts fournis et tous les résultats obtenus.

Finalement, le disciple se décide un jour à écrire son habilitation pour enfin diriger seul. Cela

5.1.6 Axe 3 : Pilotage de la reconfiguration de l'architecture en fonction du système réel et du système de pilotage .....	143
5.1.7 Résumé du plan de déploiement du projet de recherche.....	145
5.2 Projet d'enseignement .....	146

Références bibliographiques ..... 151

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Grille de lecture .....	17
Figure 2. Bouclage des flux informationnels et physiques au long du cycle de vie du produit	22
Figure 3. Processus de développement de mon activité de recherche .....	25
Figure 4. Organisation du projet INC.....	27
Figure 5. Phases du PLC (Rink, 1979).....	48
Figure 6. Développement du PLM (Cao et Folan, 2012).....	49
Figure 7. Liens entre les systèmes, adapté de (Lemoigne, 1977).....	50
Figure 8. Classification issue de (Trentesaux, 2002) .....	51
Figure 9. Le produit vecteur d'interopérabilité entre les SI (Auzelle, 2009).....	53
Figure 10. Evolution vers l'informatique ambiante .....	54
Figure 11. Boîte de conserve de spaghetti, adapté de (Wong <i>et al.</i> , 2002).....	57
Figure 12. Modèle de classification des produits intelligents, d'après (Meyer, Främling et Holmström, 2009) .....	58
Figure 13. Pertes d'information successives dans l'industrie du bois (Ginet et Golja, 2007) ..	60
Figure 14. Système d'information à deux niveaux, spécifique à nos travaux .....	62
Figure 15. Catégories des problèmes d'interopérabilité et classes de médiateur .....	67
Figure 16. Structuration de l'état de l'art .....	68
Figure 17. Standards pour les systèmes intelligents de production.....	69
Figure 18. Cartographie 2D des standards du PLM (Terzi <i>et al.</i> , 2010).....	70
Figure 19. Classification de l'utilisation des ontologies PLM.....	71
Figure 20. Taxonomie de distribution de l'information .....	74
Figure 21. Exemple de relation .....	74
Figure 22. Stratégies de fragmentation et principe d'overlapping.....	75
Figure 23. Exemple d'allocation des fragments de données .....	76
Figure 24. Types d'architectures de base de données en environnement mobile.....	78
Figure 25. Différents compromis en fonction de la pertinence de l'information .....	81
Figure 26. Architecture de réseaux de capteurs .....	83
Figure 27. Classification des protocoles de stockage de données dans les réseaux de capteurs sans fil .....	84
Figure 28. Stratégies de stockage proactif structuré dans les réseaux de capteurs sans fil .....	85
Figure 29. Synchronisations technique et sémantique .....	89
Figure 30. Techniques de synchronisation technique .....	90
Figure 31. Description du GDSN (Schemm, Legner et Otto, 2007).....	91
Figure 32. Approche d'identification du réseau de dépendances (Ouertani et Graza, 2008) ...	93
Figure 33. Organisation des contributions .....	95
Figure 34. Travaux sur le thème n°1 .....	96
Figure 35. Description du processus ITE+.....	98
Figure 36. Exemple d'instanciation du modèle IFC sur un cas ITE+.....	99
Figure 37. Exemple d'annotation géolocalisée .....	99
Figure 38. Correspondance 2D/3D et description de la procédure de transformation.....	100

Figure 39. Similarité maximale entre contours de façade et de la zone à isoler .....	101
Figure 40. Fichier final 3D, enrichi des commentaires BATIKUTCH.....	101
Figure 41. Exemple de chaîne de calculs liée à un DAM (Disque Aubagé Monobloc) .....	103
Figure 42. Exemple de structuration de chaîne de calculs par réseaux de dépendances.....	104
Figure 43. Implémentation du réseau de dépendances dans le logiciel DS ENOVIA SMARTEAM .....	104
Figure 44. Modèles de données simplifiés proposés pour le projet PLM EDF .....	105
Figure 45. Synchronisation maquette numérique BIM 4D .....	107
Figure 46. Extrait de l'extension <i>Process</i> de l'ontologie IfcOwl.....	107
Figure 47. Diagrammes de séquence des opérations élémentaires en fonction du type de point de synchronisation rencontré (issu de [J7]).....	108
Figure 48. Travaux sur le thème 2.....	110
Figure 49. Effet du facteur $k$ sur la valeur de la priorité en fonction de la distante $d$ .....	113
Figure 50. Matrice de comparaison paire-à-paire .....	113
Figure 51. Algorithme de sélection de données pertinentes.....	114
Figure 52. Image du site dédié aux matrices Fuzzy-AHP .....	115
Figure 53. Chronologie des méthodes Fuzzy-AHP, issu de l'article soumis en revue .....	116
Figure 54. Distribution de l'information dans la matière passive.....	117
Figure 55. Exemples de distribution de données dans la matière communicante.....	119
Figure 56. Mécanisme de recherche d'informations par le protocole RaWPG .....	120
Figure 57. Entité produit cyber-physique.....	130
Figure 58. Présentation du projet de recherche .....	132
Figure 59. Système cible augmenté, adapté de (Sallez <i>et al.</i> , 2010).....	133
Figure 60. Représentation de l'architecture d'une entité cyber-physique.....	133
Figure 61. Présentation du projet McBIM .....	136
Figure 62. Structure hétérarchique de gestion des données SURFER (Le Mortellec <i>et al.</i> , 2013).....	137
Figure 63. Architecture de gestion de données appliquée à l'Internet Physique (Sallez, Montreuil et Ballot, 2015).....	138
Figure 64. Représentation réseaux d'entités cyber-physiques.....	139
Figure 65. le Viable System Model et sa projection sur l'Entité Cyber-Physique.....	140
Figure 66. Processus de contrôle de la reconfiguration de l'architecture de gestion de données .....	143
Figure 67. Offre de cours et plateformes supports .....	146
Figure 68. Produit envisagé pour la plateforme PROGRESS4.0.....	148
Figure 69. Diagramme de la plateforme PROGRESS4.0 .....	149

---

# LISTE DES TABLES & TABLEAUX

---

## Liste des tables

Table 1. Inventaire des définitions relatives au produit intelligent, adapté de (Sallez, 2012) .	56
Table 2. Standards d'échange de données produit.....	69
Table 3. Travaux majeurs en fragmentation de bases de données .....	75
Table 4. Travaux majeurs sur l'allocation de fragments .....	77
Table 5. Méthodes de distribution destinées aux environnements mobiles .....	79
Table 6. Protocoles de stockage d'informations dans les réseaux de capteurs sans fil .....	85
Table 7. Protocoles de recherche d'informations dans les réseaux de capteurs sans fil .....	86
Table 8. Synthèse de l'état de l'art .....	94
Table 9. Récapitulatif des contributions sur le verrou « modélisation des données » .....	102
Table 10. Récapitulatif des contributions sur le verrou « Synchronisation des données » ....	109
Table 11. Echelle de Saaty .....	113
Table 12. Récapitulatif des contributions sur le verrou « Sélection de données ».....	117
Table 13. Récapitulatif des contributions sur le verrou « Distribution de données » .....	121
Table 14. Synthèse des contributions scientifiques.....	122
Table 15. Les 3 cas possibles de matière communicante .....	123
Table 16. Problèmes scientifiques abordés par nos travaux présents et futurs .....	129

## Liste des tableaux

Tableau 1. Liste des projets.....	31
Tableau 2. Liste des types de direction .....	33
Tableau 3. Présentation synthétique des enseignements pour l'année 2017- 2018.....	38
Tableau 4. Résumé du plan de déploiement.....	145



# AVANT-PROPOS

---

---

Le présent document décrit mes activités universitaires d'enseignant/chercheur depuis septembre 2006, date de mon intégration au CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy, CNRS UMR 7039) et de mon affectation comme Maître de Conférences à l'IUT Nancy-Brabois, département Génie Mécanique et Productique, composante de l'Université de Lorraine.

La vie du chercheur est parsemée de nombreux rapports, bilans, documents de projet, etc. Le présent mémoire n'en est qu'un parmi tant d'autres. Cependant, celui-ci prend une dimension particulière, non pas par l'importance qu'il peut avoir en tant que document support d'une Habilitation, mais surtout parce qu'il a aidé à me construire. En effet, son écriture a permis de faire le point sur ma situation actuelle (le « présent ») aussi bien en recherche qu'en enseignement, à mieux comprendre le cheminement intellectuel m'ayant amené à cette situation (le « passé ») et enfin à construire une projection de l'orientation à donner à mes recherches dans les années qui suivent (le « futur »). De plus, au-delà de ces simples considérations personnelles, il permet aussi de concentrer en un seul document l'ensemble des références bibliographiques que nous avons produites ou que nos études bibliographiques réalisées au cours de thèses ou de projets ont pu rassembler. Comme le lecteur le verra, ce mémoire aborde de nombreux thèmes organisés de manière cohérente par rapport à nos objectifs de recherche. En ce sens, il peut constituer un point d'entrée pour de futurs étudiants traitant de sujets connexes et désireux d'avoir un document présentant une vision globale des recherches menées depuis un peu moins de 10 ans au CRAN sur le concept de matière communicante et plus généralement sur les modèles et mécanismes nécessaires (mais évidemment non suffisants) à la gestion de l'information distribuée dans les systèmes holoniques.

Ce document d'Habilitation a surtout vocation à démontrer une capacité à diriger une équipe de recherche. Au travers de ses 5 chapitres, il permet de mesurer mes compétences de gestion de la recherche (chapitre 1), mes compétences scientifiques/techniques (chapitre 2 à 4) et rend compte des projets de recherche et d'enseignement envisagés (chapitre 5).

Le premier chapitre, intitulé « Curriculum vitae et notice d'activités », présente un bilan de mes activités scientifiques et pédagogiques, et permet aussi de comprendre de manière synthétique mes thèmes de recherche. Il détaille mon curriculum vitae ainsi que les faits marquants de ma carrière. Il contient une synthèse des activités scientifiques, un résumé des encadrements réalisés, une synthèse des activités pédagogiques et une liste de nos publications. Ce premier chapitre orienté « bilan » dispense une synthèse plutôt orientée compétences de gestion de la recherche. Il constitue le chapitre décrivant ma situation actuelle (c'est le « présent »).

Le second chapitre, intitulé « Contexte scientifique & Positionnement » est une introduction à nos travaux de recherche. Il présente les trois éléments de contexte (Système d'information

support du cycle de vie du produit, pilotage holonique, intelligence ambiante) à l'intersection desquels nos travaux se situent. Puis ce chapitre précise le concept de Système Contrôlé par le Produit et introduit le paradigme de « matière communicante », paradigme fondateur de nos travaux. Il termine par l'élicitation des 4 verrous scientifiques qui ont guidé nos recherches.

Le troisième chapitre, intitulé « Etat de l'art des modèles et mécanismes », permet de lister les travaux issus de la communauté nationale et internationale traitant des 4 verrous de recherche que nous avons abordés et listés dans les chapitres précédents. Pour chaque verrou, nous mettons en lumière des conclusions portant sur les éventuels manques relevés dans les travaux étudiés. Chaque partie de ce chapitre pourrait faire l'objet d'un chapitre état de l'art et il a donc été nécessaire de faire des choix dans les travaux présentés. Nous avons choisi ceux étant de notre point de vue les plus significatifs pour chaque verrou étudié.

Le quatrième chapitre, intitulé « Contributions scientifiques », présente nos contributions scientifiques au regard des différents manques relevés dans le chapitre précédent. Là aussi, le niveau de détails présenté est différent en fonction des verrous abordés. Nous présentons pour chaque verrou un ensemble d'« actions scientifiques » ayant eu pour objectif un des points faibles mentionnés pour chaque verrou dans le chapitre précédent. Pour chaque action scientifique, nous avons pris soin de toujours faire apparaître le minimum nécessaire à la compréhension, en citant la référence bibliographique du journal et/ou de la conférence présentant de manière fouillée les travaux liés à cette action. Au final, cet ensemble de chapitres 3, 4 et 5 présente donc l'histoire de nos travaux, depuis leur genèse jusqu'à leur aboutissement actuel (le « passé »). C'est essentiellement cette partie qui sera d'intérêt pour les éventuels étudiants (masters ou doctorants) parcourant ces lignes.

Le cinquième chapitre, intitulé « Projets de recherche et d'enseignement », est l'occasion d'introduire de nouvelles notions, comme l'entité cyber-physique, en se basant sur des conclusions issues de travaux récents de la littérature. Nous proposons alors de construire un projet de recherche structuré en 3 axes, supporté par une stratégie de déploiement. Cette stratégie phase le séquençement des 3 axes avec pour chacun une liste de financements potentiels ou acquis ainsi qu'une liste de collaborations déjà initiées, à conforter ou à prévoir. Ce projet de recherche est suivi d'un projet d'enseignement permettant de comprendre l'inflexion que nous souhaitons donner à notre parcours pédagogique, de manière à remettre en cohérence notre recherche avec les enseignements dont nous avons la charge. En effet, pour être efficace, nous avons la conviction que recherche et enseignement doivent être intimement liés. Ce chapitre, qui conclut le mémoire, peut être considéré comme la vision que nous avons à cet instant du « futur ».

Afin de simplifier la lecture du document, chaque chapitre commence par un encadré rappelant ce qui a été fait dans les chapitres précédents ainsi que les objectifs du chapitre courant. En complément au sommaire présenté page 5 à 7, nous proposons aussi la grille de lecture suivante illustrée figure 1 à laquelle le lecteur pourra revenir se référer tout au long de la lecture.

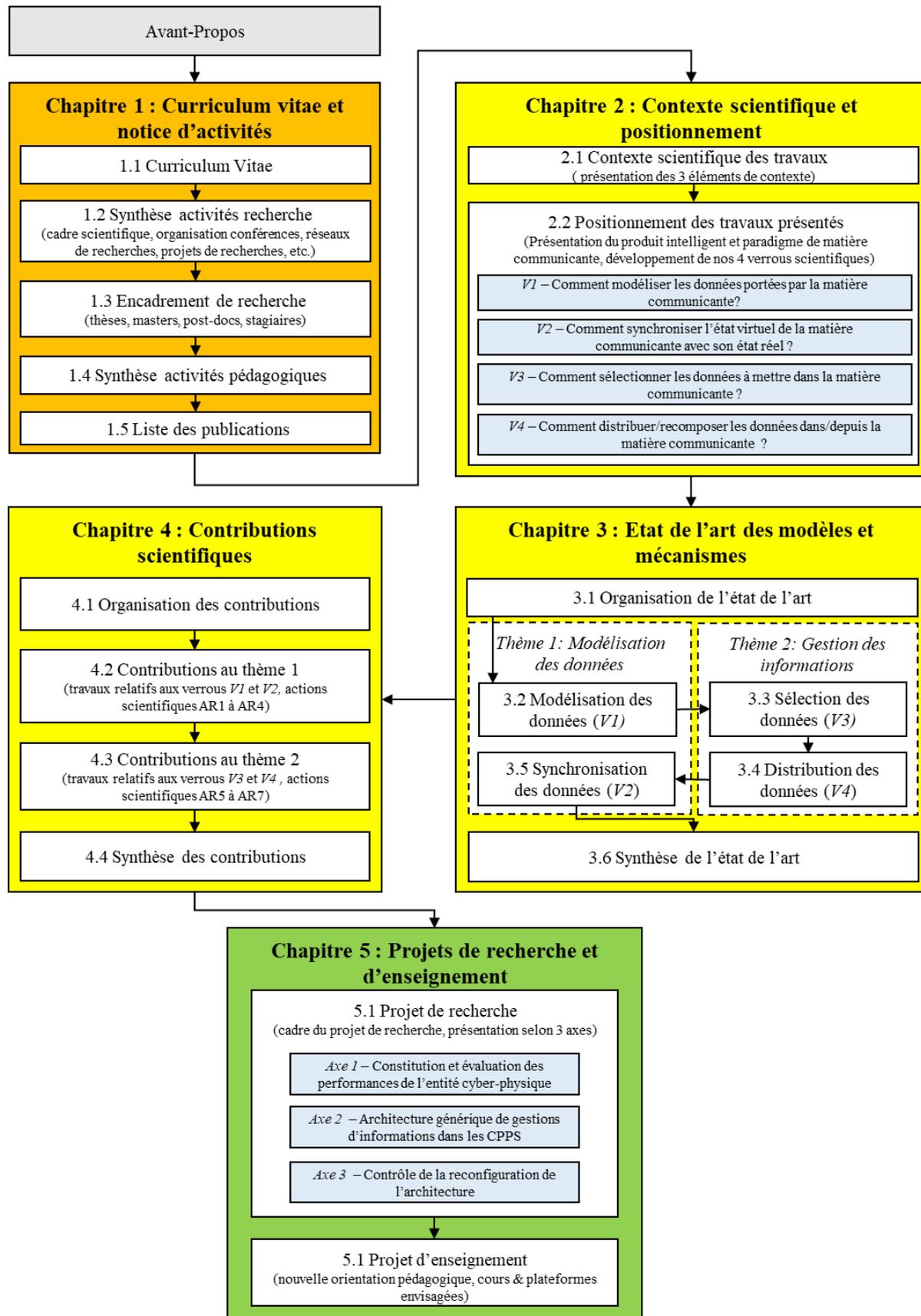


Figure 1. Grille de lecture



# Chapitre 1. CURRICULUM VITAE ET NOTICE D'ACTIVITES

## Objectifs du chapitre

*Ce premier chapitre est un bilan de mes activités scientifiques et pédagogiques, qui permet aussi de comprendre de manière synthétique mes thèmes de recherche, plus amplement détaillés dans le chapitre « Contexte scientifique & Positionnement ».*

*La section 1.1 de ce chapitre détaille mon curriculum vitae ainsi que les faits de ma carrière jugés comme marquants. La section 1.2 présentera une synthèse de mes activités scientifiques en commençant par préciser rapidement le cadre de ma recherche ainsi que mon positionnement au sein de mon équipe et aux niveaux national et international. La section 0 présente les différents encadrements réalisés sous ma direction ou co-direction. La section 1.4 détaille mes enseignements, activités et responsabilités pédagogiques et la section 1.5 conclut ce chapitre par la liste de l'ensemble de mes publications, classées par type.*

## 1.1 CURRICULUM VITAE

### William Derigent

Né le 29 Octobre 1978 à Gouvieux, Oise (39ans),

Nationalité Française, Pacsé, 2 enfants

#### Coordonnées personnelles :

2 bis, rue Frédéric Chopin,  
54000 Nancy  
Tél : +33 (0)6 64 71 20 13

#### Coordonnées professionnelles :

CRAN, Campus Sciences, BP 70239,  
Faculté des Sciences, 54506 Vandoeuvre cedex  
Tél : +33 (0)3 72 74 53 04  
Fax : +33 (0)3 72 74 53 08

@ : [william.derigent@univ-lorraine.fr](mailto:william.derigent@univ-lorraine.fr)

#### Fonction assurée

Depuis 2006	<b>Maître de Conférences</b> à l'Université de Lorraine, 61 <sup>ème</sup> section <b>Chercheur</b> au CRAN CNRS UMR 7039, Université de Lorraine <b>Enseignant</b> à l'IUT Nancy Brabois, Département <b>Génie Mécanique &amp; Productique</b>
----------------	---

#### Diplômes

2005	<b>Doctorat ès Automatique, Traitement du signal</b> , obtenu à l'Université Henri Poincaré Nancy I, pour ma thèse intitulée « Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques : prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK ». Directeur de Thèse : M. Gabriel RIS / Co-encadrante : Mme Muriel LOMBARD
------	--

Composition du jury :Président : A. BOURJAULT (61<sup>ème</sup>)

Examineurs :

J-M. GRILLET (Dassault Aviation)

G. RIS (61<sup>ème</sup>)M. LOMBARD (61<sup>ème</sup>)

Rapporteurs :

D. BRISSAUD (60<sup>ème</sup>)D. DENEUX (61<sup>ème</sup>)

2002 **Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)** en Production Automatisée mention AB, de l'Université Henri Poincaré Nancy-I

2002 **Diplôme d'ingénieur ESIAL** (Ecole Supérieure d'Informatique et Applications de Lorraine) option Ingénierie des Systèmes de Production

**Faits marquants de la carrière (ordre chronologique)**

09/06	Nomination à l'Université de Lorraine (ex. Université Henri Poincaré, Nancy I) Poste : Maître de Conférences Thème : Théorie des visibilitées et enrichissement de modèles géométriques
01/09	Intégration de l'équipe SIA sur la thématique « Gestion des données dans les systèmes industriels intelligents » (actuellement projet S&O-2I du département ISET)
11/11	Thèse Yannick Kibamba, « Spécification et développement d'un environnement collaboratif de gestion du cycle de vie des données de simulation numérique », en codirection avec Pr. Benoît Eynard, UTC, Compiègne.
11/12	Thèse Sylvain Kubler, « Premiers travaux relatifs au concept de matière communicante : Processus de dissémination des informations relatives au produit », en codirection avec Pr. Eric Rondeau. <b>Prix de thèse du GDR Macs 2013.</b>
07/14	Obtention de la <b>Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR)</b> niveau B
09/15	Nomination au <b>Conseil National des Universités 61<sup>ème</sup> section</b> , en tant que <b>titulaire</b> .
11/15	Responsable <b>du Groupe de Travail IMS<sup>2</sup> du GDR Macs</b>
06/16	Thèse Kaïs Mekki, « Gestion de l'information embarquée dans des matériaux communicants à l'aide de protocoles de réseaux de capteurs sans fil », en codirection avec Pr. Eric Rondeau. <b>Prix de thèse du GDR Macs 2017.</b>
07/17	<b>Obtention du projet ANR McBIM</b> , « Matière communicante au service du BIM » <u>Rôle</u> : porteur du projet.
11/17	<b>Organisation des journées STP</b> (Sciences et Techniques de la Production) du GDR MACS. 200 chercheurs, plus d'une dizaine d'entreprises reçus sur 2 jours. <u>Rôle</u> : président du comité d'organisation.

---

## 1.2 SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS LIÉES À LA RECHERCHE

---

Cette synthèse commence par le cadre de mes activités scientifiques section 1.2.1. Elle continue par le détail des activités de recherche (organisation de conférences, participation à des comités scientifiques de conférences, etc.) de la section 1.2.2 à 1.2.5. Elle décrit mes activités liées au rayonnement (invitations, jurys de thèse, etc.) de la section 1.2.6 à 1.2.8. Elle énumère les différents projets locaux et nationaux auxquels j'ai participé section 1.2.9. Cette synthèse se termine par la liste de mes responsabilités de recherche section 1.2.10.

### 1.2.1 Cadre de mes activités scientifiques

Cette section décrit le cadre de mes activités scientifiques selon trois aspects : mes thèmes de recherche, le contexte local dans lequel je m'inscris et le contexte national/international dont je bénéficie.

#### Thèmes de recherche

Les processus industriels impliquent des transferts d'objets physiques (flux physiques) ainsi que des transferts d'informations (flux informationnels). Pour qu'un processus industriel soit performant, il a été démontré de longue date (Plossl, 1993) que ces flux doivent être synchronisés et que chacune des différentes parties prenantes ait accès aux flux physiques mais aussi aux flux d'informations les concernant. Par exemple, recevoir une maquette LEGO® à construire produira moins d'effets si on ne reçoit pas le manuel de montage, puisque cette information est nécessaire pour que l'étape « montage du produit » se déroule de manière efficace, ou encore si un ordre de fabrication d'un lot de pièces est lancé en production et que pour des raisons de retard de la machine concernée par la première opération, la mise en œuvre effective de l'ordre ne se fait pas immédiatement, il s'en suivra alors des stocks en attente, un décalage dans le temps de toutes les activités de la gamme, etc.... Il est donc bien souvent nécessaire voire indispensable que ces deux flux soient liés et surtout synchronisés l'un par rapport à l'autre. Pour reprendre l'analogie précédente, recevoir une maquette avec le mauvais manuel de montage est sensiblement identique à ne pas en avoir.

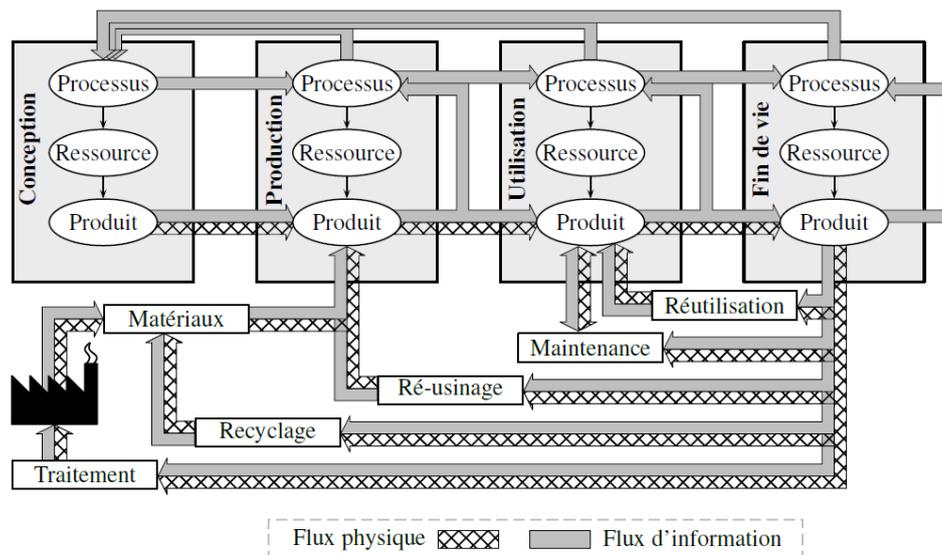
(Kiritsis, 2011) montre que flux physiques et informationnels du produit sont transmis tout au long du cycle de vie, depuis la conception du produit jusqu'à son recyclage (voir figure 2), en subissant des transformations de différentes natures. Il introduit aussi la notion de « boucle fermée » pour ces deux flux, avec des significations légèrement différentes pour chaque type :

- Pour les flux physiques, cela signifie qu'à la fin de leur cycle de vie, les produits usagés seront recyclés comme matières premières ;
- Pour les flux informationnels, cela signifie qu'à chaque phase du cycle de vie, une partie des informations générées dans cette même phase peuvent être transmises aux activités amont.

Ce premier cadre est complètement en accord avec les idées défendues actuellement par l'ensemble du projet du département ISET très proche des notions relatives à l'économie circulaire ou de l'écologie industrielle. Cependant de nombreux verrous scientifiques, techniques et organisationnels empêchent sa mise en place. Pourtant, la nécessité de gérer les

informations du produit durant l'ensemble de son cycle de vie est devenue incontournable, d'une part, en raison des techniques de sophistication des produits et, d'autre part, en raison des réglementations gouvernementales strictes concernant la gestion du cycle de vie des produits (problèmes de traçabilité par exemple). Notons encore par ailleurs qu'une maîtrise optimale de ces deux flux permet de rendre les services suivants :

- Les membres de la chaîne logistique (producteurs) seraient livrés avec les informations exhaustives et pertinentes relatives aux modes d'utilisation, aux conditions de stockage, de recyclage, etc. ;
- Les experts des services de maintenance, de recyclage ou autres pourraient être aidés dans leurs tâches en disposant par exemple d'informations actualisées par rapport à l'état courant du produit et pourraient fournir une assistance en temps-réel au client ;
- Le bouclage d'informations pourrait être optimisé (facilité/exactitude accrue des retours d'expertises concernant le produit), permettant ainsi d'améliorer les processus de conception, de fabrication ;
- Les informations utiles pour les phases de recyclage du produit seraient plus pérennes.



**Figure 2. Bouclage des flux informationnels et physiques au long du cycle de vie du produit**

Pour résoudre ce problème de synchronisation entre flux physiques et informationnels, de nombreux travaux se basent sur le concept d'holon introduit par (Koestler, 1967), qui stipule que tout objet est composé d'une partie informationnelle et d'une partie physique reliées ensemble. Dans notre communauté « génie industriel », ce concept a conduit au développement de la notion de « produit intelligent » ou produit holonique, dont la partie informationnelle est capable de stocker de l'information mais aussi de prendre des décisions. Le produit est donc perçu comme autonome et gérant lui-même son information, voire son devenir.

De nombreux articles proposent de résoudre le problème de la gestion des données tout au long du cycle de vie en déportant les données sur une base distante, et en y accédant par le biais d'un identifiant unique porté par une puce RFID collée sur le produit (Meyer *et al.*, 2009; Ranasinghe *et al.*, 2010). Bien que satisfaisante dans une vision idyllique, cette proposition est souvent inefficace en conditions réelles car, comme dit précédemment, l'information est souvent « cloisonnée » dans les différentes parties de la chaîne logistique (on parle alors de « silos » de connaissances ou d'informations). Pour décloisonner l'information, il est alors possible d'envisager *a minima* deux réponses permettant de répondre au moins partiellement à ce problème : 1) création de « ponts » sémantiques et technologiques autorisant les silos à communiquer entre eux, 2) stockage de l'information standardisée sur le produit lui-même, le produit jouant alors le rôle du média de communication dans la chaîne logistique.

En 2009, avant que l'Internet des Objets ne devienne très populaire, notre stratégie a été de proposer la notion de « matière communicante », proposant le paradigme utopique d'une matière « intrinsèquement communicante », capable de stocker naturellement de l'information en son sein, mais aussi capable de la conserver même après transformations de forme (découpage, sciage, usinage ...). Cette matière, qui conserve son information malgré les transformations, peut alors endosser le rôle de média de communication entre tous les différents acteurs du cycle de vie, depuis l'obtention de la matière première jusqu'à son recyclage, sans que ces différents acteurs n'aient besoin d'être mis en réseau. Pour mettre en réalité ce concept, nous nous l'avons d'abord prototypé par une matière brute instrumentée d'un nombre très très grand de technologies Auto-ID (« noyées dans la masse »).

**Depuis 2009**, l'objectif principal de mon travail est donc de **mettre en place les méthodes et outils nécessaires pour la gestion des données produit tout au long de son cycle de vie**, en considérant que la matière peut être « communicante » et donc vue comme un média permettant l'interopérabilité entre les entreprises et pouvant subir des transformations de forme. Cela soulève de nombreuses problématiques de gestion de données (verrous), parmi lesquelles :

1. *Comment structurer les données stockées la matière communicante ?* Afin de permettre aux différents acteurs de lire cette information, elle doit être structurée en utilisant des modèles de données standards. La thèse de Sylvain Kubler [**Thèse2**], ainsi que le stage de master d'Imen Bouzarkouna [**Stage3, M2R2**] ont permis d'avancer sur les types de modèles à utiliser. Clairement, les modèles utilisés sont dépendants de l'application visée, mais possèdent des invariants communs à tous les modèles décrivant la structure des données support au cycle de vie du produit. Les travaux de la communauté SCM (Supply Chain Management), PLM (Product Life Cycle Management) et BIM (Building Information Modelling) proposent des modèles de référence intéressants. La thèse de Sylvain Kubler s'est notamment penchée sur l'utilisation du standard B2MML, les travaux d'Imen Bouzarkouna sur l'ontologie IFC OWL et la thèse de Yanick Kibamba sur l'ensemble des modèles produit (standards ou proposés par la littérature) utilisés dans le domaine PLM.

2. *Comment synchroniser les informations issues de la matière communicante?* Comme explicité précédemment, nous recherchons aussi à mettre à jour le flux informationnel avec le flux physique de manière à ce que les informations représentant le produit soient toujours cohérentes avec l'état du produit lui-même. La synchronisation consiste à gérer le processus de transfert des informations depuis la matière vers le système d'information les recevant. Cette synchronisation permet d'y obtenir une image virtuelle du produit cohérente avec son état réel. Mieux encore, des données reçues depuis la matière communicante peuvent venir alimenter des modèles de simulation afin de vérifier que le produit fonctionne toujours en conditions nominales. On est alors capable, à partir de relevés issus de l'information stockée dans la matière, de prévoir une fissuration par exemple, ou un retard dans le processus de construction d'un édifice. La thèse de Yannick Kibamba [**Thèse1**] et le master d'Imen Bouzarkouna [**M2R2**] apportent des premières réponses à ce verrou.
3. *Comment sélectionner les données à mettre dans la matière communicante ?* La thèse de Sylvain Kubler [**Thèse2**] s'est intéressée aux notions de **sélection** et d'**extraction** de données pertinentes depuis une base de données techniques et selon un contexte donné. La méthode proposée est basée sur AHP flou tout en utilisant un ensemble de critères spécifiques à notre cas d'étude et permettant de caractériser le contexte ;
4. *Comment distribuer les données dans la matière communicante ?* Dans le cadre de la thèse de Sylvain Kubler, la matière communicante est constituée d'un matériau dans lequel étaient enfouies de nombreuses puces RFID. Le stockage passe donc par un protocole de distribution des données sélectionnées dans les mémoires des différentes puces, permettant aussi de les reconstruire une fois disséminées. Ce type de stockage n'est possible que pour des produits de petites tailles, et de nombreux problèmes d'accès aux données surviennent lorsque les objets dépassent l'échelle humaine (comme dans les bâtiments). Pour résoudre ce problème, nous avons considéré dans la thèse de Kaïs Mekki [**Thèse3**] des produits de grandes tailles, dans lesquels sont noyés des réseaux de nœuds de capteurs sans fil, et traiter la **distribution** des informations dans la matière, au moyen de protocoles de distribution réseau avec pour objectif d'avoir une distribution uniforme de l'information ;

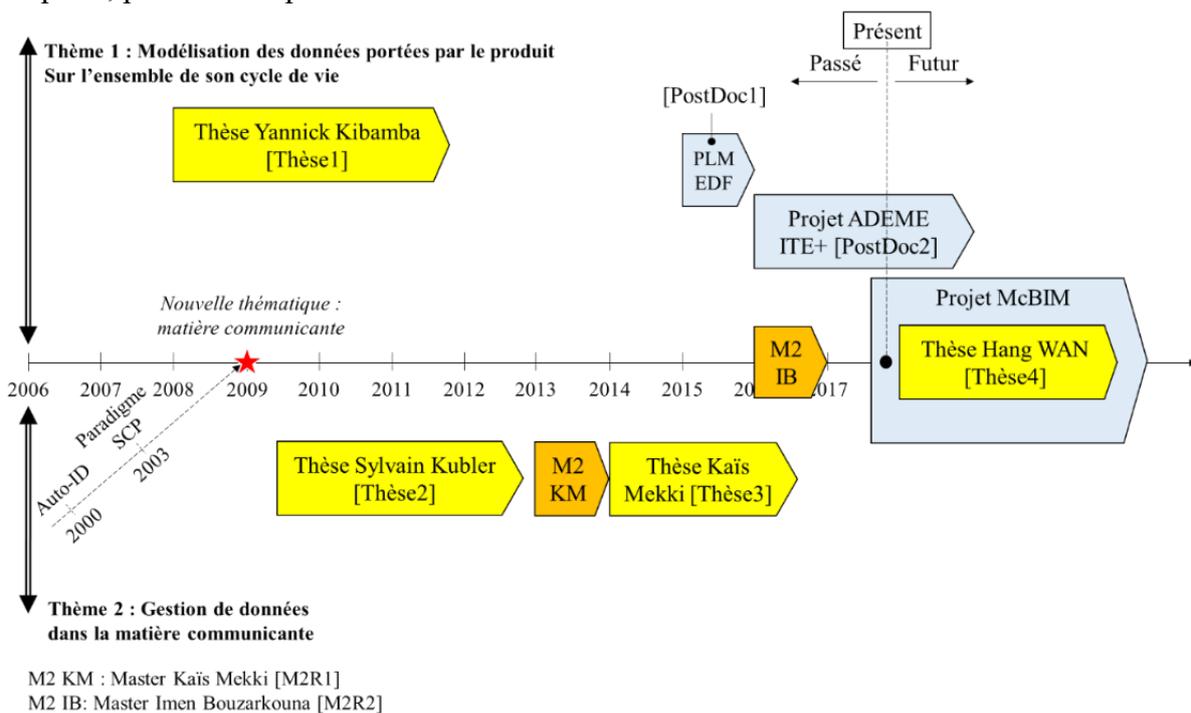
Le concept de « matière communicante » a aussi été le support de 2 autres stages [**Stage1**, **Stage2**]. Bien que majoritairement mis en œuvre dans les industries manufacturières, le concept de matière ou de produit intelligent, porteur de son information, a aussi été appliqué sur des projets de recherche en **conception** (projet PLM EDF [**Post-Doc1**]) et dans le domaine du **bâtiment** (plate-forme BIM [**IC11**], projet ADEME ITE+ [**Post-Doc2**, **Stage4**]), auxquels j'ai participé sur la partie modélisation de données et que j'ai pilotés.

Les 4 verrous précédents s'articulent autour de deux grands thèmes : la modélisation des données portées par le produit sur l'ensemble de son cycle de vie (verrous 1&2) et la gestion des données dans la matière communicante (verrous 3&4). En effet, les deux premiers verrous ne sont pas spécifiques à la matière communicante, et ont été plutôt menés dans un cadre de

produit intelligent porteur de son information, alors que les deux derniers sont clairement orientés matière communicante.

Historiquement, j'ai rejoint l'équipe SIA et la thématique du produit intelligent/matière communicante en 2009. Cela explique pourquoi la thèse de Y. Kibamba n'est pas directement centrée sur les problèmes de gestion des données produit, mais plutôt sur la gestion du processus de simulation. Néanmoins, ces travaux ont permis d'aborder la modélisation des données produit ainsi que les réseaux de dépendances de données, qui ont été des outils utiles pour traiter les verrous du thème n°1. Je considère donc qu'ils sont clairement compatibles avec les problèmes qui sont apparus dès lors que j'ai infléchi mon positionnement scientifique dans le domaine des systèmes ambiants en 2009, en travaillant sur le concept de matière communicante, issu des travaux sur le paradigme « Système Contrôlé par le Produit (SCP) » démarrés en 2003 au CRAN (paradigme étant détaillé dans la section 2.2.1).

La figure 3 présente le processus de développement de l'ensemble de mon activité de recherche. On y voit les deux thèmes ainsi que les travaux qui leur sont associés, répartis sur un axe temporel allant de 2006 à aujourd'hui. Plus les travaux d'un thème se rapprochent de l'axe temporel, plus ils sont proches de l'autre thème.



**Figure 3. Processus de développement de mon activité de recherche**

Ainsi, on peut voir que si ces deux thèmes étaient plutôt menés séparément en 2009, ils se sont progressivement rapprochés, surtout par le biais des travaux menés sur le BIM (Building Information Modelling) où ces problématiques de structuration et de distribution de l'information le long de la chaîne logistique sont très présentes. En atteste le projet McBIM, labellisé en 2017 et venant juste de démarrer, où ces aspects modélisation des données du produit et gestion des données dans la matière communicante sont couplés dans un même sujet de thèse [Thèse4].

## **Présentation du CRAN et implication dans l'équipe S&O-2I du projet ISET**

Créé en 1980, le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) est une unité mixte de recherche (UMR 7039) commune à l'Université de Lorraine (UL) et au CNRS. Il accueille également des chercheurs de L'Institut de Cancérologie de Lorraine (ICL, Centre de lutte contre le cancer) et du CHU. Les recherches menées au CRAN concernent l'Automatique définie comme la science de la modélisation, de l'analyse, de la commande et de la supervision des systèmes dynamiques mais aussi le traitement du signal ou le génie informatique.

Le CRAN est constitué de 3 départements : CID (Contrôle, Identification et Diagnostic), BioSIS (Biologie, Signaux et Systèmes en Cancérologie et Neurosciences) et ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques). Ces équipes sont elles-mêmes décomposées en projets.

Pour ma part, je fais partie du département ISET, qui regroupe 3 projets : GN (Green Networking), S-PHM2 (Sûreté de fonctionnement, PHM et Maintenance) et S&O-2I (Système et Objets Intelligents en Interactions). Plus particulièrement, S&O-2I vise à l'optimisation et à la caractérisation des flux physiques (flux de produits et flux d'énergie), des services qui leur sont liés et des flux d'informations échangés dans un environnement non stabilisé. Notre objet d'étude est relatif à un ensemble de systèmes (produit et contributeurs) immergés dans un environnement très évolutif qui impacte directement leurs performances rendant nombre de leurs données et paramètres incertains. Dans ce contexte, les verrous scientifiques majeurs adressés par le projet S&O-2I sont relatifs à :

- Verrou 1 : L'élaboration de méthodologie de mise en relation de données quantitatives (mesure - échelle numérique) et qualitative (évaluation subjective - échelle ordinale) extraite du produit et/ou du système de production ;
- Verrou 2 : L'élaboration d'une méthode d'intégration au système d'information, des connaissances extraites des modèles des systèmes (ou des produits) et formalisées par des modèles NIAM ou SySML ;
- Verrou 3 : La formalisation et l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes « ambiants » en prenant en compte des contraintes liés à leur environnement d'exécution. Comment sélectionner les informations pertinentes, comment définir des métriques qualitatives et quantitatives, pour une interopérabilité sémantique des systèmes ;
- Verrou 4 : La méthodologie de distribution des informations ainsi récoltées vers, ou dans, les composants du système pour améliorer l'efficacité des flux (physiques et/ou énergétique). En effet, la dimension des systèmes étudiés, leur hétérogénéité, leurs interactions, etc... induisent des objectifs multiples, des contraintes spécifiques, des architectures de modèles adaptées et posent de nouveaux problèmes de formalisation. Cela aboutira alors à la définition d'architectures des systèmes d'information distribués et des modèles de décision associés de type Système Multi-Agents ou holonique ;
- Verrou 5 : La modélisation et l'identification de ces systèmes complexes à des fins d'évaluation/simulation nécessitent une méthodologie de construction des modèles de simulation pour l'évaluation des flux, une maintenance de ces modèles pour suivre l'évolution des systèmes et une interopérabilité avec des modèles de décision de types différents (méthodes exactes, méta-heuristiques...).

Ma contribution s'intéresse à la résolution des **verrous 3 & 4**.

Afin de maintenir une cohérence dans les actions de recherche de l'équipe, plusieurs domaines dits « transversaux » ont été mis en place par l'équipe de direction d'ISET. Un de ces domaines concerne l'Ingénierie Numérique pour la Construction (INC), qui se concentre sur l'amélioration de l'efficacité du domaine de la construction par l'utilisation des méthodes et outils issus de l'ingénierie numérique. Ce domaine est organisé en 3 actions : outils numériques pour la rénovation, efficacité des systèmes industriels constructifs et gestion énergétique du bâtiment (cf. figure 4). Chacune de ces actions est soutenue par un ou plusieurs financements (projet maturation MODIBUILDING, projet ADEME ITE+ et projet CPER Forbois2). Ces trois projets seront présentés dans la suite du document, chapitres 4 et 5.

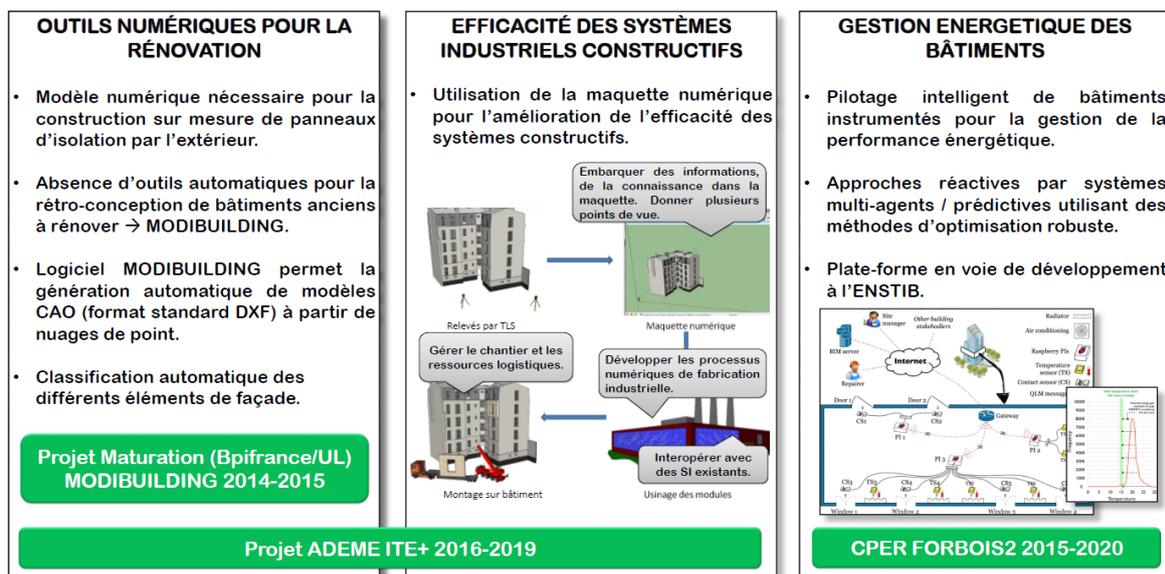


Figure 4. Organisation du projet INC

### Contexte national et international

A l'échelle nationale, je m'intègre dans les communautés défendant l'intérêt du produit intelligent, puisque j'en propose une déclinaison particulière qui est la matière communicante. En France, les laboratoires les plus actifs sont le LS2N de Nantes, le laboratoire LAMIH de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, le CRET-LOG de l'université d'Aix-Marseille. Les travaux de Yves Sallez sur l'augmentation du produit (Salles *et al.*, 2010; Salles, 2012) sont ceux qui s'approchent le plus des aspects que je défends. Tous ces laboratoires s'intègrent dans le GT IMS<sup>2</sup> (Intelligent Manufacturing Systems and Services) du GdR MACS, que je co-anime.c

A l'échelle internationale, la communauté « produit intelligent » est beaucoup plus vaste et compte parmi tant d'autres des acteurs en Angleterre (Auto-ID Lab, If Cambridge), en Espagne (Université de La Mancha), au Portugal (Institut Polytechnique de Bragance, UNINOVA), en Finlande (Université d'AALTO), en Roumanie (Institut Polytechnique de Bucarest) ou en Suisse (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). Dans ce contexte, la thèse de Sylvain Kubler a permis de développer des **relations internationales avec Kary Främling, de**

**l'université d'AALTO (Helsinki, Finlande)** avec qui nous avons participé à 2 conférences ([IC15]&[IC16]) et publié 3 revues ([J5],[J7],[J8]). Un **dépôt de projet européen** sur le thème de l'énergie dans le bâtiment, incluant AALTO, a d'ailleurs été réalisé en juin 2014 (call EE11 de H2020).

Parallèlement, nous avons travaillé au cours du master et de la thèse de Kais Mekki en **collaboration avec Ahmed Zouinkhi, de l'ENIG (Ecole Nationale des Ingénieurs de Gabès)**, et accueilli des stagiaires PFE de l'ENIG ([Stage1, Stage2, Stage3]).

En 2015 et 2016, nous avons aussi collaboré avec le laboratoire SnT, Université du Luxembourg sur les méthodes de décisions multi-critères basés sur FAHP. (résultats : [J2], <http://ims2.cran.univ-lorraine.fr/node/36>).

*Dans la suite, les sections 1.2.2 à 1.2.5 présentent les activités de liées à la recherche.*

## 1.2.2 Organisation de conférences, sessions et journées

### Organisation conférences internationales

Date	Description de la conférence
09/2012	<b>MOSIM 2014</b> : 10 <sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation & Simulation, 5-7 novembre 2014 Membre du comité d'organisation <u>Rôle</u> : hébergement, communication et livret de programme

### Organisations de sessions spéciales dans des conférences ou colloques internationaux

Date	Description de la session
09/2012	<b>MOSIM 2012</b> : 9 <sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation & Simulation Titre de la session : « Ambient Intelligence for Complex Systems » Présidents de session : Y.Sallez, P. Charpentier, <b>W. Derigent</b>
05/2013	<b>IMS 2013</b> : 11 <sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, 22-24 Mai 2013, São Paulo, Brésil Titre de la session : « <i>Intelligent Products, Information Vectors through the Life Cycle</i> » Présidents de session : P. Charpentier, Y. Sallez Autres organisateurs : <b>W. Derigent</b> , K. Främling
10/2016	<b>SOHOMA 2016</b> : 6 <sup>th</sup> Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, 6-7 octobre 2016, Lisbonne, Portugal Titre de la session : « <i>Should Intelligent Manufacturing Systems be dependable and safe?</i> » Présidents de session : A.Thomas, <b>W. Derigent</b> Autres organisateurs : A. Voisin

**Organisations de journées nationales**

Date	Description de la manifestation
11/2017	<b>Journées Sciences et Techniques de la Production (STP) du GDR MACS</b> , 9-10 novembre 2017, Nancy Président du comité d'organisation : <b>W. Derigent</b> Comité de Pilotage : A. Aubry, H. Bril, P. Marangé Nombre de participants : environ 200 personnes <a href="https://journeesstp2017.event.univ-lorraine.fr/">https://journeesstp2017.event.univ-lorraine.fr/</a>
11/2017	<b>Journée AFIA/MACS « Conduite des Systèmes Dynamiques et IA »</b> , 9 novembre 2017, Nancy Comité d'organisation : <b>W. Derigent</b> , O. Cardin (GT IMS <sup>2</sup> du GDR MACS) E. Adam (AFIA) Nombre de participants : 30 personnes <a href="https://afia.asso.fr/2017/10/03/macs-ia-2017/">https://afia.asso.fr/2017/10/03/macs-ia-2017/</a>

**1.2.3 Membres de comité scientifique et présidences de session****Membre de comité scientifique de conférence internationale**

Date	Description de la manifestation
11/2017	<b>FiCloud 2014 : 2<sup>nd</sup> International Conference on Future Internet of Things and Cloud</b> , 27-29 août 2014, Barcelone, Espagne Membre du comité scientifique du Track 4 : « <i>IoT and Cloud Data Management</i> »

**Membre de comité scientifique de colloque national (prévision)**

Date	Description de la manifestation
11/2019	<b>Colloque LaPlagne 2019</b> , organisé par l'AIP Primeca Lorraine

**Présidence de session (hors organisations de session spéciale)**

Date	Description de la manifestation
11/2017	<b>SOHOMA 2017: 7<sup>th</sup> Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing</b> , 19-20 octobre 2017, Nantes, France Président de la session « <i>Big Data Management</i> »

**1.2.4 Participation à des réseaux de recherche**

Membre du GDR Macs depuis 2006, Membre des Groupes Thématiques Easy-DIM et IMS<sup>2</sup> ;

Participe au réseau de recherche européen financé par le projet H2020 RISE RUC-APS (2016-2020) ;

### 1.2.5 Expertise scientifique

Relectures d'articles de nombreuses conférences (SOHOMA, MOSIM, IFAC WC, CAD, IESM, FUZZY IEEE, ...) et revues (CII, JIM, CAD, ESWA, CERA, JESA, JIMS, SERVICE SCIENCE, ...).

*Les sections suivantes 1.2.6 à 1.2.8 présentent les activités liées au rayonnement scientifique.*

### 1.2.6 Invitations dans des universités étrangères / échanges internationaux

Invitation pour un séminaire de deux jours, Université de Cambridge (Angleterre), septembre 2012

Echanges internationaux avec l'Université d'AALTO (Finlande) sur le développement d'une plate-forme BIM lié à l'efficacité énergétique dans le bâtiment, à l'ENSTIB (déplacements en Finlande et venue d'étudiants d'AALTO pour mise en place du standard OMI/OMF) (résultats : [IC6]), avril/juillet 2013

Invitation au 3<sup>ème</sup> workshop franco-chinois sur l'Usine Numérique et la Fabrication Digitale, Université de Beihang (Chine), novembre 2015

### 1.2.7 Participation à des jurys de thèse

Thèse de Xavier Godot, ENSAM Metz, 3 juillet 2013

**Titre :** « *Interactions Projet/Données lors de la conception de produits multi-technologiques en contexte collaboratif* »

**Jury :** B. Eynard (Président), J.-F. Boujut, A. Bouras (Rapporteurs), **W. Derigent**, N. Perry (Examineurs), A. Etienne, A. Siadat (Co-directeur et directeur de thèse)

### 1.2.8 Participation à des comités de sélection

Membre du comité de sélection du poste de Maître de Conférences, N°0711 section 61-27, laboratoire G-SCOP, intitulé « Organisation et pilotage de l'usine du futur »

### 1.2.9 Projets de recherche locaux et nationaux

Cette partie présente la liste des projets de recherche locaux et nationaux, auxquels j'ai participé, présentés tableau 1. Les projets PLM EDF, ITE+ et McBIM seront décrits plus en détails dans le chapitre « Contributions scientifiques ».

Tableau 1. Liste des projets

Période	Nom Projet	Rôle	Recrutements	Budget CRAN
2013-2014	ALIMA	Responsable administratif projet	Pas d'embauche	12k€
2015-2016	PLM EDF	Responsable scientifique partie CRAN	1 post-doctorant [ <b>Post-Doc1</b> ]	90k€
2016-2018	ADEME ITE+	Responsable scientifique partie CRAN	1 ingénieur (1 an) 1 post-doctorant [ <b>Post-Doc2</b> ]	180k€
2016-2020	H2020 Marie Curie RISE RUC-APS	Membre projet	Déplacements uniquement	85k€
2017-2021	ANR PRCE McBIM	Coordinateur du projet	1 thèse CRAN [ <b>Thèse 4</b> ] 1 autre thèse, 1 post-doc et 2 ingénieurs pour les autres partenaires	714k€

Responsable administratif CRAN du projet ALIMA, 2013-2014

Durée : 1 an

Montant total pour le CRAN : 12k€

Partenaires : CRAN, Société Airboxlab (<https://foobot.io>)

Membres du CRAN impliqués : P. Thomas, **W. Derigent**

Résumé : La société Airboxlab commercialise un objet connecté capable d'évaluer la qualité de l'air intérieur en mesurant différentes sources de pollution (CO<sub>2</sub>, COV, humidité, particules fines). La société recherchait à évaluer les possibilités offertes par les algorithmes d'apprentissage de type réseaux de neurones à partir des données produites par l'objet.

Responsable scientifique CRAN du projet PLM-EDF, 2015-2016

Durée : 1 an

Montant total pour le CRAN : 90k€

Partenaires : CRAN, Arts & Métiers PARISTECH, CNEN EDF

Membres du CRAN impliqués : A. Thomas, M. Lombard, **W. Derigent**

Recrutement : 1 post-doctorant (Oliver Boutin [**Post-Doc1**])

Résumé : Le projet PLM EDF visait à étudier comment coupler les outils de gestion de données techniques déjà en utilisation chez EDF avec le processus d'ingénierie système. Dans le cadre de ce projet, nous avons 1) complété le modèle de données utilisé par EDF pour y intégrer les objets nécessaires au support du processus d'ingénierie systèmes (exigences, interfaces, etc.), 2) utilisé les réseaux de dépendances de données afin de tracer le processus d'ingénierie système.

**Responsable scientifique CRAN du projet ADEME ITE+, 2016-2018**

Durée : 3 ans

Montant total pour le CRAN : 180k€

Partenaires : CRAN, Groupe POIROT Construction

Membres du CRAN impliqués : A.Thomas, D. Brie, V. Bombardier, **W.Derigent**

Recrutement : 1 post-doctorant (Djamel Benarab [**Post-Doc2**])

Production scientifique : 1 conférence(**IC2**). 1 conférence soumise (PLM2018) et 1 revue (Automation in Construction) en cours.

Résumé : le projet ITE+ (pour Isolation Thermique par l'Extérieur) a pour objectif de proposer un processus industriel d'Isolation Thermique par l'Extérieur utilisant la préfabrication en atelier, dans une optique de réduction drastique des coûts. Le projet vise à proposer une solution technique d'ITE innovante, couplée à une utilisation poussée des outils de numérisation (scans 3D, maquette numérique, etc.). Dans ce cadre, le CRAN travaille sur l'obtention automatique de modèles 3D de bâtiment, dans des formats compatibles avec les solutions techniques des acteurs de la construction.

**Coordinateur scientifique du projet ANR PRCE McBIM, 2017-2021**

Durée : 42 mois

Montant total de la subvention : 714k€

Montant de la subvention CRAN : 140k€

Partenaires : CRAN, LAAS, LE2I, société 360SC (<http://360sc.io/>)

Membres du CRAN impliqués : A.Thomas, **W.Derigent**

Recrutement : 1 thèse (Hang Wan [**Thèse4**]) pour le CRAN

1 thèse et 1 ingénieur (LAAS), 1 post-doc (LE2I), 1 ingénieur (360SC)

Résumé : le projet McBIM vise à la réalisation d'un béton communicant, intégrant des fonctionnalités de traçabilité et de mesures de ses constantes internes, et cela tout au long de son cycle de vie. Il doit en outre être capable de se connecter à d'autres bétons communicants, de manière à former un réseau capable de remonter des données de surveillance. L'objectif du projet est de développer ce béton communicant et de prouver son intérêt sur les phases de construction et d'usage.

**Membre du projet H2020 Marie Curie RISE RUC-APS, 2016-2020**

Durée : 48 mois

Montant total de la subvention : 1.3M€

Montant de la subvention CRAN : 85k€

Coordinateur : Université de Liverpool, Royaume-Uni

Partenaires : 16 participants de 5 pays de l'UE (France, Italie, Pologne, Espagne et Royaume-Uni) et 3 partenaires de 2 pays tiers (Argentine et Chili)

Membres du CRAN impliqués : H. Panetto, M. Lezoche, **W. Derigent**

Résumé : le projet vise à constituer un réseau d'échange de recherche et d'innovation pour l'industrialisation agricole, pour réfléchir sur les problématiques de recherche primordiales dans ce secteur et réaliser les dépôts de projets H2020 idoines avec les partenaires RUC-APS.

Mon Rôle : apport de mon expertise sur les produits intelligents et technologies IoT.

### 1.2.10 Responsabilités liées à la recherche

Responsable du Groupe Thématique IMS<sup>2</sup> (Intelligent Manufacturing Systems and Services) depuis fin 2015 (<http://ims2.cran.univ-lorraine.fr/>).

Membre titulaire de la CNU 61<sup>ème</sup> section depuis 2015.

Membre élu du conseil de laboratoire du CRAN depuis janvier 2018.

Représentant de l'AIP-PRIMECA Lorraine au Conseil scientifique du GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) S.MART (Systems.Manufacturing.Academics.Resources.Technologies) depuis janvier 2018.

Co-responsable scientifique CRAN du domaine transversal INC depuis 2015  
[http://www.cran.univ-lorraine.fr/francais/plates\\_formes/06-inc.php](http://www.cran.univ-lorraine.fr/francais/plates_formes/06-inc.php)

## 1.3 ENCADREMENT DE RECHERCHE

Le Tableau 2 répertorie les différents encadrements auxquels j'ai participé. La suite de la section fournit le détail, par type de direction.

Tableau 2. Liste des types de direction

Type de direction	Nombre	% encadrement total
Thèses	4 (dont 1 en cours)	200%
Post-Docs	2	80%
Masters	2	100%
Stages	4	400%

### 1.3.1 Thèses

**[Thèse1]** Thèse de Yannick Kibamba (co-encadrement 50%, directeur de thèse : B. Eynard)

Thèse de Doctorat, Université de Technologie Compiègne, soutenue le **01 décembre 2011**.

**Titre :** « *Spécification et développement d'un environnement collaboratif de gestion de cycle de vie de données de simulation numérique* »

**Jury :** Directeur de thèse : B. Eynard  
Co-directeur de thèse : **W. Derigent**  
Président : M. Tollenaere  
Rapporteurs : P. Lafon, P. Veron  
Examineurs : T. Gallet, N. Troussier, L. Fine

**Résumé :** Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit s'intéressent à la gestion du cycle de vie des données de simulation numérique. La simulation numérique occupe de nos jours une place majeure dans le processus de développement de produit. Permettant de minimiser le recours aux prototypes physiques et assurant une analyse réaliste du comportement physique d'un système, la simulation numérique constitue un levier majeur d'amélioration du processus

de développement. Face à une concurrence accrue, les entreprises manufacturières recourent intensivement à la simulation numérique pour améliorer les performances techniques de leurs produits. En regard de cet accroissement du recours à la simulation numérique, des enjeux forts de gestion et de partage de données entre les disciplines impliquées dans la simulation numérique et celles intervenants dans les autres phases du processus de développement se sont faits jour. Cette thèse présente une étude d'amélioration des activités de simulation numérique via la mise en œuvre d'une approche PLM. Cette étude propose deux voies principales d'amélioration. La première concerne la définition d'une structure du produit intégrant au mieux les besoins de la simulation numérique en rapport notamment à la définition des domaines fluide et structure ainsi qu'aux interactions associées. Le deuxième axe se rapporte à la gestion des dépendances entre données de simulation pour une meilleure traçabilité et une capitalisation plus aisée. Cette étude a abouti au développement d'un prototype de système SLM autour de la solution SmarTeam de Dassault Systèmes couplée à des applications métier tels que CATIA de Dassault Systèmes et Workbench d'Ansys.

**Durée :** 02/2008 – 11/2011 (46 mois)  
**Financement :** CIFRE avec la société SNECMA  
**Devenir :** Ingénieur Pétrolier chez Total après un poste de consultant PLM chez Capgemini  
**Publications :** 3 conférences ([IC20], [IC24], [IC25])

[Thèse2] Thèse de Sylvain Kubler (co-encadrement 50%, directeur de thèse : E. Rondeau)

Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, soutenue le **07 novembre 2012**.

**Prix de thèse GDR Macs 2013.**

**Titre :** « *Premiers travaux relatifs au concept de matière communicante : Processus de dissémination des informations relatives au produit* »

**Jury :** Directeur de thèse : E. Rondeau  
Co-directeur de thèse : **W. Derigent**  
Président : D. Trentesaux  
Rapporteurs : K. Främling, D. Trentesaux, D. Jolly  
Examineurs : A. Thomas, J. Rabita

**Résumé :** Depuis de nombreuses années, plusieurs communautés telles que IMS (Intelligent Manufacturing Systems), HMS (Holonc Manufacturing System) ont suggéré l'utilisation de produits intelligents pour rendre les systèmes adaptables et adaptatifs et ont montré les bénéfices pouvant être réalisés, tant au niveau économique, qu'au niveau de la traçabilité des produits, qu'au niveau du partage des informations ou encore de l'optimisation des procédés de fabrication. Cependant, un grand nombre de questions restent ouvertes comme la collecte des informations liées au produit, leur stockage à travers la chaîne logistique, ou encore la dissémination et la gestion de ces informations tout au long de leur cycle de vie. La contribution de cette thèse consiste en la définition d'un cadre de dissémination des informations relatives au produit durant l'ensemble de son cycle de vie. Ce cadre de dissémination est associé à un nouveau paradigme qui change radicalement la manière de voir le produit et la matière. Ce nouveau concept consiste à donner la faculté au produit d'être intrinsèquement et intégralement

« communicant ». Le cadre de dissémination des informations proposé offre la possibilité à l'utilisateur d'embarquer des informations sensibles au contexte d'utilisation du produit communicant. Outre la définition du processus de dissémination des informations, cette thèse offre un aperçu des champs de recherche, tant scientifiques que technologiques, à investiguer à l'avenir concernant le concept de « matière communicante ».

**Durée :** 10/2009-11/2012 (39 mois)

**Financement :** Allocation de recherche ministérielle

**Devenir :** Maître de Conférences au CRAN

**Publications :** 6 conférences ([IC15-19], [IC22-23]), 4 revues ([J7-10]), 1 chapitre d'ouvrage ([O4])

[Thèse3] Thèse de Kais Mekki (co-encadrement : 50%, directeur de thèse : E. Rondeau, pour la partie française)

Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine en cotutelle avec l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Gabès (ENIG), Gabès, Tunisie, soutenue le **02 juin 2016**.

**Prix de thèse GDR-Macs 2017.**

**Titre :** « *Gestion des informations produit dans la matière communicante* »

**Jury :** Directeur de thèse partie française : E. Rondeau

Co-directeur de thèse partie française : **W. Derigent**

Directeur de thèse partie tunisienne : M. N. Abdelkrim

Président : A. Thomas (co-encadrant)

Rapporteurs : T. Val, A. Bouras

Examineurs : M. Aoun

**Résumé :** La thèse aborde le problème de la dissémination des informations liées au produit tout au long de son cycle de vie, par l'exploitation du concept de matière communicante. L'objectif général est de stocker dans la matière communicante ses caractéristiques initiales mais aussi l'évolution de ses propriétés durant son usage, en évitant de les perdre lors par exemple d'une transformation ou d'une destruction d'une partie du matériau. Dans le cadre de cette thèse, ce principe est appliqué dans le domaine des préfabriqués en béton, où des nœuds de réseaux de capteurs sans fil sont intégrés dans le béton. Ces nœuds sont alors utilisés pour stocker des informations relatives au cycle de vie du préfabriqué et à sa surveillance sur la phase d'usage. Un nouveau protocole de communication, nommé USEE, a été proposé et permet de diffuser uniformément les informations dans la matière en considérant qu'elles n'ont pas toutes la même importance. Le protocole USEE évite notamment la saturation rapide des mémoires des nœuds de façon à pouvoir stocker un maximum d'informations différentes. Ensuite, un protocole de lecture, intitulé RaWPG, a été développé. Il est adapté à la récupération d'informations uniformément réparties et consomme peu d'énergie. Ces deux protocoles ont été implémentés dans le simulateur réseau Castalia/OMNeT++ et ont permis de montrer leur intérêt par rapport au contexte applicatif mais aussi par rapport à d'autres protocoles similaires de la littérature.

**Durée :** 09/2014 – 06/2016 (22 mois)

**Financement :** Bourse tunisienne (partie tunisienne), fonds propres (partie française)

**Devenir :** Post-doctorant au CRAN

**Publications :** 5 conférences ([IC10], [IC12-14]), 3 revues ([J1], [J13-J14])

[Thèse4] Thèse de Hang WAN (co-encadrement : 50%, directeur de thèse : A. Thomas)

Thèse de l'Université de Lorraine, en cours, ayant **débutée en février 2018**.

**Titre :** « *Matériaux communicants et BIM : étude des problèmes de gestion des données distribuées* »

**Financement :** Contrat doctoral financé par le projet ANR McBIM

### 1.3.2 Post-doctorants

[Post-Doc1] Olivier Boutin, Post-doctorat de l'Université de Lorraine, 01/2014 – 01/2015 (1an)

Sujet : Gestion des données lors du processus de conception de centrale nucléaire

Encadrement : **William Derigent (40%)**, Muriel Lombard (40%), André Thomas (20%)

Cadre : Projet PLM EDF.

[Post-Doc2] Djamel Benarab, Postdoctorat de l'Université de Lorraine 11/2016 – 11/2018 (2ans)

Sujet : Reconnaissance de formes 3D et modélisation de données géométriques sous format standard.

Encadrement : **William Derigent (40%)**, David Brie (40%), André Thomas (20%)

Cadre : Projet ADEME ITE+

### 1.3.3 Masters

[M2R1] Kais Mekki, Avril 2013 – septembre 2013.

Diplôme préparé : Master Recherche ISC (Université de Lorraine – FST)

Sujet : Application du concept de matière communicante aux réseaux de capteurs sans fil

Encadrement : **William Derigent (50%)**, Éric Rondeau (50%)

Publications : 1 conférence ([IC10])

Devenir : doctorant en cotutelle entre l'ENIG et le CRAN

[M2R2] Imen Bouzarkouna, Avril 2016 – septembre 2016.

Diplôme préparé : Master Recherche ISC (Université de Lorraine – FST)

Sujet : Définition d'un observateur pour les systèmes cyber-physiques : application à l'ingénierie numérique pour la construction bois

Encadrement : **William Derigent (50%)**, André Thomas (50%)

Devenir : doctorante à l'université de Rouen, thèse intitulée « Traitement en temps réel distribué dans les système cyber-physique industriels »

### 1.3.4 Stagiaires

**[Stage1]** Baya Hajjej. Mars 2014 – mai 2014

Etudiante de l'ENIG (Ecole Nationale des Ingénieurs de Gabès), Tunisie

Sujet : intégration de la dimension comportementale dans la matière communicante : un essai par utilisation des réseaux de neurones

Encadrement : **William Derigent** (100%)

**[Stage2]** Assia Cherif. Mars 2014 – mai 2014

Etudiante de l'ENIG (Ecole Nationale des Ingénieurs de Gabès), Tunisie

Sujet : Définition d'un algorithme d'agrégation de données pour la matière communicante et implémentation sur la plate-forme IoT-Lab

Encadrement : **William Derigent** (100%)

**[Stage3]** Imen BOUZARKOUNA. Mars 2015 – mai 2015

Etudiante de l'ENIG (Ecole Nationale des Ingénieurs de Gabès), Tunisie

Sujet : Définition de modèles de données à embarquer sur la matière communicante

Encadrement : **William Derigent** (100%)

**[Stage4]** Etienne DERUELLE. Juin 2017 – Juillet 2017

Etudiant de Telecom Nancy, France

Sujet : Modélisation de données géométriques pour la transformation automatique DXF vers IFC

Encadrement : **William Derigent** (100%)

## 1.4 SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

J'enseigne à l'IUT Nancy Brabois, département Génie Mécanique & Productique. Du fait de ma double qualification 60/61, j'enseigne des matières liées au génie mécanique, génie industriel et génie informatique. J'interviens aussi dans le cadre du master ISC, Ingénierie des Systèmes Complexes, de la Faculté des Sciences et Techniques de Nancy, qui est aussi une composante de l'Université de Lorraine.

### 1.4.1 Présentation des modules enseignés

#### **Conception mécanique (IUT GMP– 1ère année) – section 60**

Ce module a comme objectif pédagogique de former les étudiants aux bases de la conception mécanique ainsi qu'à l'utilisation du logiciel SOLIDWORKS®. Ce module se déploie sur la totalité de l'année scolaire majoritairement sous forme TP's constitués de 3 à 4 séances de 4h qui couvrent la pré-étude sur papier du mécanisme à concevoir, la réalisation sous SOLIDWORKS® du mécanisme puis la production des différents plans d'ensemble et de définitions demandés. En collaboration avec mes collègues, nous développons chaque année de nouveaux supports de TP's. En moyenne, le développement d'un tel support demande une

cinquantaine d'heures de travail dédiées au choix du sujet à traiter, à la conception de la maquette numérique et à la rédaction des différents documents.

### **Gestion de projet (IUT GMP– 1ère année) – section 61**

Ce module a comme objectif pédagogique de former les étudiants aux bases de la gestion de projet. Dans ce module, j'encadre le déroulement d'un TP de 4 séances où les étudiants doivent appliquer leurs connaissances en gestion de projet sur un cas d'étude. Par groupe de 6 voire 7, ils gèrent une entreprise de conception mécanique spécialisée dans le développement de palans et doivent mener à bien le prototypage d'un nouveau palan. Ils doivent réaliser en 16h la maquette du palan au 1/5, en gérant leur temps et leurs ressources, à l'aide principalement du diagramme de Gantt, et de l'application Microsoft Project 2017.

### **Informatique pour la mécanique (IUT GMP– Licence Pro) – section 61**

Dans le cadre de ce module, j'assure une formation de base en programmation pour les étudiants de Licence Pro CMAO (Conception Mécanique Assistée par Ordinateur). Le but de cet enseignement est de permettre aux étudiants de concevoir des applications en VBA capables de se connecter à un logiciel métier (dans notre cas, le programme VBA est conçu sous Excel et capable de se connecter à SolidWorks considéré comme une application tierce) afin de réaliser automatiquement des notices de calcul et de l'édition/modification de documents.

### **Ingénierie Numérique Produit-Processus (Master ISC 1ère année) – section 61**

Le module d'Ingénierie Numérique Produit-Processus cherche à montrer quels sont les outils et méthodologies existants permettant un développement simultané des parties commande et opérative d'un même système de production. Pour ma part, j'interviens dans le développement d'éléments virtuels de partie opérative modélisés à l'aide du logiciel DELMIAV5®. La partie opérative virtuelle (on parle aussi de partie opérative numérique) peut alors être connectée par l'intermédiaire d'un serveur OPC à un automate exécutant un programme, qui aura été spécifié auparavant à l'aide de l'application CONTROLBUILD®. Le système cyber-physique ainsi obtenu permet de vérifier les performances industrielles du futur système de production, et de tester le comportement de la partie commande face à différents scénarios de défaillance.

**Tableau 3. Présentation synthétique des enseignements pour l'année 2017- 2018**

<b>Désignation</b>	<b>Composante</b>	<b>CM</b>	<b>TD</b>	<b>TP</b>
Conception Mécanique	IUT GMP	16h	0h	100h
Gestion de Projet	IUT GMP	0h	0h	62h
Informatique	IUT GMP	0h	48h	0h
Ingénierie Numérique Produit-Processus	Master ISC	8h	8h	8h
Référentiel activités	IUT GMP	0h	18h	0h
	Total	24h	74h	170h
			<b>Total HETD</b>	<b>~250h</b>

## 1.4.2 Responsabilités pédagogiques et collectives

Responsable des activités de communication du Département Génie Mécanique de 2007 à 2012

Responsable des modules conception et informatique pour la mécanique

Responsable projets 1A (suivi de 100 étudiants en 11 groupes sur un projet de 6 mois)

Dans le cadre de cette activité, les étudiants ont à gérer la conception, fabrication et « commercialisation » d'un système mécanique simple, en assurant une gestion correcte des délais. Les thèmes du projet varient en moyenne tous les deux ans (réalisation d'un système poulie/chape, d'un serre-joint, d'un babyfoot, ...). Le projet concerne l'ensemble des étudiants de la promotion, en groupes de 9 à 11 étudiants.

Responsable visites d'entreprises depuis 2011

Ces visites ont lieu courant du mois d'avril et permettent à nos étudiants de 1A de visiter différentes entreprises du domaine mécanique. Au vu de la taille de notre promotion, les visites s'effectuent en parallèle sur plusieurs sites. Pour exemple, le cycle 2016 était constitué de visites de 10 entreprises en parallèle sur 2 jours entre Saint-Dizier et Nogent (Haute-Marne), sur le thème des forges et fonderies, pour une promotion de 100 étudiants, avec repas et logement compris.

Encadrements de projets et visites de stage

J'encadre tous les ans des projets 1A, 3 projets 2A et 2 projets ingénieur. Je réalise en moyenne 3 visites de stage en IUT 2A et 4 visites de stage LP.

Responsable de la plate-forme « prototypage rapide »\_du Département Génie Mécanique & Productique de l'IUT Nancy-Brabois depuis 2010

Cette responsabilité consiste à maintenir la plate-forme de prototypage rapide et à développer des activités pédagogiques et industrielles autour des ressources qui la constituent. Les investissements réalisés depuis 2010 s'élèvent à plus de 30k€. Chaque année, la totalité des étudiants de 1A s'initient à l'impression 3D sur nos machines, en plus des étudiants de 2A utilisant leurs capacités pour la réalisation de pièces prototypes ou de modèles de fonderie pour leurs projets. Nous réalisons en outre des prestations pour des laboratoires, entreprises, écoles ou particuliers. Je forme les étudiants sur nos machines lors de leurs séances de projet 1A.

## 1.4.3 Participation à des jurys

Président du jury de Validation des Acquis de l'Expérience (VAE) du Baccalauréat Professionnel Technicien d'Usinage, de 2009 à 2013.

Membre du jury de Validation des Acquis de l'Expérience (VAE) pour la licence Professionnelle Construction Mécanique Assistée par Ordinateur, session 2015.

Président du jury de Validation des Acquis de l'Expérience (VAE) pour la licence Professionnelle Construction Mécanique Assistée par Ordinateur, session 2017.

Participation régulière aux jurys de soutenance de projets 1A IUT, 2A IUT, ingénieurs 2A (Télécom Nancy), soutenance masters recherche (master ISC)

## 1.5 LISTE DES PUBLICATIONS

Nombre	Type de publication	Référence
14	Revue internationale avec comité de lecture (dont 12 JCR)	[J]
38	Colloques internationaux avec actes et comité de lecture	[IC]
6	Colloques nationaux avec actes et comité de lecture	[CNA]
1	Colloques sans comité de lecture	[SCL]
5	Participation à des ouvrages nationaux	[O]

Dans la liste des publications, mon nom est surligné en gras, afin de repérer rapidement ma position dans la liste des auteurs pour chaque publication. Lorsque la publication a été co-écrite avec un étudiant que j'encadrais, son nom est souligné. J'ai continué de travailler avec Sylvain Kubler & Kaïs Mekki après leurs thèses, ce qui explique que leurs noms ne soient pas toujours soulignés (puisqu'ils n'étaient plus sous ma co-direction).

### 1.5.1 Articles dans revues internationales à comité de lecture référencées dans le JCR

**[J1]** Mekki, K., Derigent, W., Zouinkhi, A., Rondeau, E., Thomas, A., Abdelkrim, N. (2017), "RaWPG: A data retrieval protocol in micro-sensor networks based on random walk and pull gossip for communicating materials" in *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, vol. 4, no 2, p. 414-426. **Impact factor : 2.98**

**[J2]** Kubler, S., Robert, J., **Derigent, W.**, Voisin, A., Le Traon Y. A state-of-the-art survey & testbed of Fuzzy AHP (FAHP) applications (2016). *Expert Systems with Applications*, 65, 398–422. **Impact factor : 2.98**

**[J3]** Mekki, K., Zouinkhi, A., Derigent, W., Rondeau, E., Thomas, A., & Abdelkrim, M. N. (2015). USEE: A uniform data dissemination and energy efficient protocol for communicating materials. *Future Generation Computer Systems*. **Impact factor : 2.78**

**[J4]** Mekki, K., Derigent, W., Zouinkhi, A., Rondeau, E., Thomas, A., & Abdelkrim, M. N. (2015). Non-Localized and Localized Data Storage in Large-Scale Communicating Materials: Probabilistic and Hop-Counter Approaches. *Computer Standards & Interfaces*.

**Impact factor : 0.88**

**[J5]** Kubler, S., Främling, K., **Derigent, W.** (2015). P2P Data synchronization for product lifecycle management. *Computers in Industry*, 66, 82-98. **Impact factor : 1.29**

**[J6]** Kubler S., Voisin A., **Derigent W.**, Thomas A., Rondeau E. (2014), Group fuzzy AHP approach to embed relevant data on "communicating material", *Computers in Industry*, 65(4), pp675-692, ISSN 0166-3615, doi:10.1016/j.compind.2014.01.018. **Impact factor : 1.29**

- [J7] **Kubler S., Derigent W.**, Främling K., Thomas A., Rondeau E. (2013), Enhanced Product Lifecycle Information Management using "communicating materials", *Computer-Aided Design*, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/j.cad.2013.08.009. **Impact factor : 1.8**
- [J8] **Kubler S., Derigent W.**, Thomas A., Rondeau E., Främling K. (2013), Information dissemination framework for context-aware products, *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), pp485-500, ISSN 0360-8352, doi:10.1016/j.cie.2013.07.015. **Impact factor : 1.52**
- [J9] **Kubler S., Derigent W.**, Voisin A., Thomas A., Rondeau E. (2013), Method for embedding context-sensitive information on "communicating textiles" via fuzzy AHP. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 26(2), pp597-610, doi :10.3233/IFS-120753. **Impact factor : 0.79**
- [J10] **Kubler S., Derigent W.**, Thomas A., Rondeau E. (2013), Embedding data on "communicating materials" from context-sensitive information analysis, *Journal of Intelligent Manufacturing*, ISSN 0956-5515, doi:10.1007/s10845-013-0745-y. **Impact factor : 1.27**
- [J11] **Derigent W.**, Thomas E., Levrat E., Iung B. (2009), Opportunistic maintenance based on fuzzy modelling of component proximity, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 58, Issue 1 Pages 29-32. **Impact factor : 2.54**
- [J12] **Derigent W.**, Chapotot, E., Ris, G., Remy, S., & Bernard, A. (2007). 3D digitizing strategy planning approach based on a CAD model. *Journal of computing and information science in engineering*, 7(1), 10-19. **Impact factor : 0.8**

### 1.5.2 Autres articles dans revues internationales à comité de lecture :

- [J13] **Derigent W.**, Remy S., Ris G. a new approach of the visibility calculation of an object, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 6, n°6, pp. 550 – 566, Inderscience ISSN (Print) 1368 - 2148, 2004 .
- [J14] Harik R., Capponi V., **Derigent W.**, Lombard M., Ris G., Computer-aided process planning support functions, *International Journal of Product Lifecycle Management*, Volume 3, n°4, pp. 319-334.

### 1.5.3 Conférences, congrès et colloques internationaux à comité de lecture et actes

- [IC1] Mekki, K., **Derigent, W.**, Rondeau, E., & Thomas, A. (2017), *Communicating Aircraft Structure for Solving Black-box Loss on Ocean Crash*, in 7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA'2017, Nantes, France.
- [IC2] **Derigent, W.**, Thomas, A., (2017), *Situation Awareness in Product Lifecycle Information Systems*, in 7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA'2017, Nantes, France.
- [IC3] Mekki, K., **Derigent, W.**, Rondeau, E., & Thomas, A. (2017), *Data Lifecycle Management in Smart Building using Wireless Sensors Networks*. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12944-12949.
- [IC4] Mekki, K., **Derigent, W.**, Rondeau, E., & Thomas, A. (2017), *Wireless sensors networks as black-box recorder for fast flight data recovery during aircraft crash investigation*. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 814-819.

- [IC5] Kubler, S., **Derigent, W.**, Voisin, A., Robert, J., & Le Traon, Y. (2017). *Knowledge-based consistency index for fuzzy pairwise comparison matrices*. In Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2017 IEEE International Conference on (pp. 1-7). IEEE.
- [IC6] **Derigent, W.**, Voisin, A., Thomas, A., Kubler, S. & Robert, J. (2016), *Application of measurement-based AHP to product-driven control*, in 6th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA'2016, Lisbonne, Portugal.
- [IC7] Mekki, K., **Derigent, W.**, Zouinkhi, A., Rondeau, E., Thomas, A., Abdelkrim, M.N.(2016), *New Communicating Concrete for Data Storage and Retrieval through Integrated Micro Sensor Nodes*, in IEEE 4<sup>th</sup> International Conference on Future Internet of Things and Cloud, FiCloud 2016, Vienna, Austria.
- [IC8] **Derigent, W.**, Thomas, T.,(2015), *End-of-Life information sharing for a circular economy : existing literature and research opportunities*, in 5th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, SOHOMA'2015, Cambridge, United Kingdom.
- [IC9] Thomas, P., **Derigent, W.**, Suhner, M.-C., (2014), *Un ensemble classificateur pour la classification de données dynamiques. Application à un problème de qualité d'air intérieur*, 10<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14, Nov 2014, Nancy, France.
- [IC10] Mekki, K., **Derigent, W.**, Zouinkhi, A., Rondeau, E., Abdelkrim, M.N.(2014), *An uniform data replication algorithm in wireless micro-sensor network for communicating material application*, 10<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14, Nov 2014, Nancy, France.
- [IC11] Kubler, S., Madhikermi, M., Buda, A., Främbling, K., **Derigent, W.**, & Thomas, A. (2014), *Towards data exchange interoperability in building lifecycle management*. Emerging Technology and Factory Automation (ETFa), Sept. 2014 IEEE (pp. 1-8). IEEE.
- [IC12] Mekki, K., **Derigent, W.**, Zouinkhi, A., Rondeau, E., Abdelkrim, M.N.(2014), *Data Dissemination Algorithms for Communicating Materials Using Wireless Sensor Networks*, 2014 International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud2014), Barcelone, Spain.
- [IC13] Mekki, K., **Derigent, W.**, Zouinkhi, A., Rondeau, E., Thomas, A., Abdelkrim, M.N.(2014), *Improvement of Counter-Based Broadcasting Scheme for Long Communicating Material Lifetime*, In Proceedings Engineering & Technology (PET) of IPCO publisher, the International Conference on Automation, Control, Engineering & Computer Science (ACECS'2014), 22-25 March 2014, Monastir, Tunisia, pp. 53-59.
- [IC14] Mekki K., **Derigent W.**, Zouinkhi A., Rondeau E., Abdelkrim M. N. (2013), *Multi-Hop Counter Based Data Dissemination Protocol for Communicating Materials*, 9th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2013), Lyon, France.
- [IC15] Kubler S., **Derigent W.**, Thomas A., Rondeau E., Främbling K. (2013), *Embedded data on intelligent products - impact on real-time applications*, 10th International Conference on Mobile Web Information Systems, Paphos, Cyprus.
- [IC16] Kubler S., **Derigent W.**, Voisin A., Främbling K., Thomas A.(2013), *Methods of aggregation of expert opinions in the framework of intelligent products*, 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, São Paulo, Brazil.

- [IC17] **Kubler S., Derigent W.**, Voisin A., Thomas A., Rondeau E. (2012), *A fuzzy analytic hierarchy process for group decision making: application for embedding information on communicating materials*, IEEE International Conference on Communications, Computing and Control Applications, Marseille, France.
- [IC18] **Kubler S., Derigent W.**, Rondeau E., Thomas A. (2012), *Embedding information on communicating materials from context-sensitive information analysis based on Fuzzy AHP theory*, IEEE International Conference on Internet of Things, Besançon, France.
- [IC19] **Kubler S., Derigent W.**, Rondeau E., Thomas A. (2012), *Storage of information on manufactured products using "communicating materials"*, European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), Montpellier, France.
- [IC20] **Kibamba Y., Derigent W.**, Eynard B. (2012), *A fluid-structure case study in simulation lifecycle management*, ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Nantes, France.
- [IC21] **Derigent W.**, Thomas A. (2012), *Aggregation of product information for composite intelligent products*, 9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Bordeaux, France.
- [IC22] **Kubler S., Derigent W.**, Thomas A., Rondeau E.(2012), *Information dissemination process for context-aware products*, 4th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucarest, Roumania.
- [IC23] **Kubler S., Derigent W.**, ANDRE T., RONDEAU E., *Problem Definition Methodology for the "Communicating Material" Paradigm*, 10<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisbon, Portugal (2010).
- [IC24] **Kibamba Y.**, Eynard B., Troussier N., **Derigent W.** (2009)., *PLM – Digital Engineering and Numerical Simulation for Collaborative Product Development*, International Conference on Research into Design, ICoRD'09 - International Conference on Research into Design, ICoRD'09.
- [IC25] **Kibamba Y.**, Troussier N., **Derigent W.**, Eynard B., Gallet T. (2008), *Towards digital engineering : collaborative management of design, analysis and manufacturing data*, 5th International conference on Digital Enterprise Technology, France.
- [IC26] Durupt A., Remy S., **Derigent W.** (2008), *From a 3D point cloud to a real CAD model of mechanical parts, a product knowledge based approach*, Global Design to Gain a Competitive Edge. An Holistic and Collaborative Design Approach based on Computational Tools - International Conference on Advanced Design and Manufacture, ICADAM 2008, Chine.
- [IC27] Durupt A., Remy S., Ducellier G., **Derigent W.** (2008), *A new knowledge based approach the reverse engineering of a product*, 10th International Design Conference.
- [IC28] Harik R., Capponi V., **Derigent W.** (2007), *Enhanced B-Rep graph-based feature sequences recognition using manufacturing constraints*, Proceedings of the CIRP Design Seminar, The Future of Product Development, Berlin, Germany, March 26-28, 2007.
- [IC29] **Derigent W.**, Lacroix Z. (2006), *Virtual Concept 2006, Using constraint databases to express 3D geometrical data*, Playa del Carmen, Mexique, 26 th nov-1st dec, p102-103, 2006.
- [IC30] Harik R., **Derigent W.**, Ris G. (2006), *Automating the flank milling planar surfaces milling process*, 6th International conference on integrated design and manufacturing in mechanical engineering (IDMME), Alpxpo (Grenoble, France), May 17 - 19, 2006.

[IC31] Harik R., Lombard M., **Derigent W.** (2005), *Product model adjustment methodology to support its product lifecycle management*, Integrated Design and Production, Casablanca (Morocco), 9 - 11 November 2005.

[IC32] **Derigent W.**, Chapotot E., Ris G. (2005), *Contrôle de pièce par capteur laser – définition de fonctions d'aide à la numérisation*, 4<sup>th</sup> International Conference on Integrated Design and Production (CPI'05), 9 – 11 Novembre 2005.

[IC33] **Derigent W.**, Remy S., Bernard A., Ris G. (2005), *A CAD based 3D digitizing strategy determination*, the 2005 International CAD Conference and Exhibition(CAD'05), Bangkok (Thaïlande), 20 – 24 Juin 2005.

[IC34] **Derigent W.**, Harik R., Lombard M., Ris G. (2005), *Development and integration of a 5 axis flank milling feature into a STEP Model*, 17th IMACS World Congress, Paris (France), 11 – 15 Juillet 2005.

[IC35] **Derigent W.**, Harik R., Lombard M., Ris G. (2005), *Definition of the mechanical engineering workstation: towards a multi-viewpoint product modeling*, First International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems, Hammamet (Tunisie), 21 - 23 mars 2005.

[IC36] Remy S., **Derigent W.**, Bernard A., Ris G., Veron M. (2004), *Automatic 3D Digitizing: a visibility based approach*. 14th International CIRP Design Seminar. Caïre (Egypte), 16 - 18 mai 2004.

[IC37] Remy S., **Derigent W.**, Ris G. (2004), *Contribution to scanning strategy determination*, IDMME 2004, 5th International Conference on Integrated design and Manufacturing in Mechanical design, Bath (Royaume-Uni) 5 - 7 Avril 2004.

[IC38] **Derigent W.**, Remy S., Ris G. (2003), *Method of automatic digitalisation: a new approach of the visibility calculation of an object*. 1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP 2003), Leiria (Portugal), 1 - 4 octobre 2003.

#### 1.5.4 Colloques nationaux avec actes et comité de lecture (6)

[CNA1] **Derigent W.**, Bombardier V. (2009), *Extraction de connaissances et reconnaissance automatique d'entités minces en aéronautique par règles linguistiques floues*, 11ème Colloque National AIP PRIMECA, "Produits, procédés et Systèmes industriels : les dernières innovations" (2009).

[CNA2] Harik R., Durupt A., **Derigent W.**, Ris G. (2007), *Identification des entités minces*, 10ème colloque national AIP-Primeca, La Plagne (France), 17 - 20 avril 2007.

[CNA3] **Derigent W.**, Lombard M. (2005), *Proposition d'une architecture de poste de travail du mécanicien: Définition d'un modèle produit de référence*, 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes (France), 29 Août – 2 Septembre 2005.

[CNA4] **Derigent W.**, Harik R., Ris G. (2005), *Détermination des directions de visibilité par opérations volumiques*, 9ème colloque national AIP-Primeca, La Plagne (France), 5 - 8 avril 2005.

[CNA5] **Derigent W.**, Harik R., Lombard M., Ris G (2004). *Intégration conception/génération automatique de gammes en conception intégrée à partir de connaissances métiers*. 2ème Colloque du groupe de travail C2EI, Nancy (France), 1 - 2 décembre 2004.

[CNA6] **Derigent W.**, Remy S., Ris G. (2003), *Méthodes de numérisation automatique : une nouvelle approche du calcul de la visibilité d'un objet*. 8ème colloque national AIP-Primeca, La Plagne (France), 31 mars - 2 avril 2003.

### 1.5.5 Colloques nationaux sans comité de lecture

[SCL1] **Derigent W.**, Ris G., Lombard M. (2005), *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO*, présentation au GT IS3C, axe Conception du GdR MACS pôle STP, pour les journées doctorales du GDR Macs, 5 – 7 Septembre 2005.

### 1.5.6 Ouvrages individuels et collectifs

J'ai inclus dans ce passage les chapitres d'ouvrage, ainsi que le numéro spécial réalisé sous ma co-direction.

[O1] Aubry, A., **Derigent, W.** (2016), « *Modélisation, optimisation et simulation pour le développement durable* », In Journal Européen des Systèmes Automatisés, Lavoisier. (Direction d'ouvrage).

[O2] **Derigent, W.**, Voisin, A., Thomas, A., Kubler, S., & Robert, J. (2017). *Application of Measurement-Based AHP to Product-Driven System Control*. In Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing (pp. 249-258). Springer, Cham.

[O3] **Derigent, W.**, & Thomas, A. (2016). *End-of-Life information sharing for a circular economy: existing literature and research opportunities*. In Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing (pp. 41-50). Springer International Publishing.

[O4] Kubler, S., **Derigent, W.**, Thomas, A., & Rondeau, E. (2012). *Key factors for information dissemination on communicating products and fixed databases*. In Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control (pp. 89-102). Springer Berlin Heidelberg.

[O5] **Derigent W.**, Lombard M. (2006), *Contribution à la conception de système d'information Produit : méthode pour une approche par modélisation multi-points de vue*, chapitre 16, du livre « Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits » (traité IC<sup>2</sup>, série Productique), ISBN : 2-7462-1214-5



# Chapitre 2. CONTEXTE SCIENTIFIQUE & POSITIONNEMENT

## Rappels & Objectifs du chapitre

*Le chapitre précédent a permis de présenter mon curriculum vitae, mes activités de recherche et pédagogiques. Un premier cadre y a été ébauché de manière à pouvoir mettre rapidement mes activités scientifiques en contexte.*

*Ce deuxième chapitre a pour objectif d'explicitier plus en profondeur le contexte scientifique dans lequel s'intègrent les travaux présentés dans ce mémoire, en précisant les différents éléments le constituant (section 2.1). Ces éléments vont permettre de mieux cerner les paradigmes, contraintes, hypothèses, ... pris comme points de départ de nos travaux. Une fois ce cadre posé, la deuxième partie de ce chapitre détaille notre positionnement et liste les verrous scientifiques auxquels nous nous sommes attaqués (section 2.2).*

## 2.1 CONTEXTE SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX

Toute recherche scientifique s'inscrit dans un cadre, un contexte scientifique. Le mien peut se caractériser par plusieurs éléments en interaction :

- Les systèmes d'information supports du cycle de vie du produit ;
- Le pilotage holistique des systèmes manufacturiers et en particulier le concept de « produit intelligent » ;
- L'intelligence ambiante.

Ces différents éléments de contexte sont respectivement introduits et détaillés dans les 3 prochaines sections.

### 2.1.1 Système d'information support du cycle de vie du produit

Notre domaine de recherche s'intéressant à la gestion des informations produit tout au long de son cycle de vie, il est nécessaire de définir la notion de cycle de vie du produit. Le « cycle de vie du produit » ou PLC (Product Life Cycle) est un concept issu du domaine économique et fût pour la première fois introduit, d'après (Muhs, 1985), par Conrad Jones qui a déclaré lors de la conférence AMA (American Medical Association) en 1957 : « *There are compelling forces behind this drive for new products. There is a life cycle that is characteristic of many - if not most - products. Since all products are "new" at their outset, we can call it the basic life cycle for new products* ». L'idée centrale du concept est qu'un produit a une vie limitée de manière similaire aux êtres vivants, composé de plusieurs phases. (Rink, 1979) en liste 5 : introduction, croissance, maturité, saturation et déclin. Graphiquement, ces phases peuvent être représentées en fonction du temps par une courbe dont l'ordonnée correspond aux bénéfices engendrés comme illustré figure 5. Cette figure montre, d'une part, que le produit évolue à des vitesses différentes dans les 5 phases du cycle de vie et, d'autre part, que les bénéfices

augmentent considérablement dans la phase de croissance du PLC et commencent à baisser dans la phase de maturité (cette baisse est liée à la compétitivité du marché). Ce modèle économique a depuis été largement remis en cause (Dhalla et Yuspeh, 1976; Grantham, 1997) et, bien qu'encore répandu, n'est plus la théorie marketing dominante qu'elle a pu être dans les années 1970.

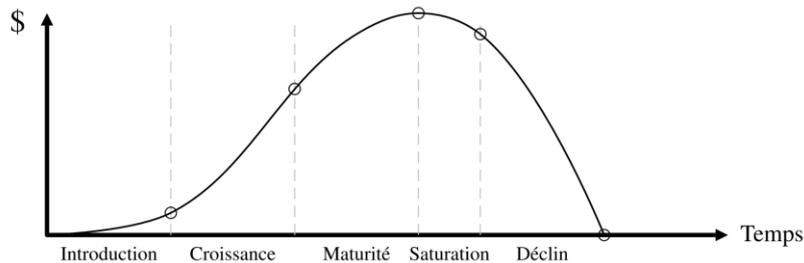


Figure 5. Phases du PLC (Rink, 1979)

Si l'origine du concept est économique, (Cao et Folan, 2012) montrent que le monde technologique s'est emparé du concept de cycle de vie produit dans le milieu des années 1980, en ne se concentrant pas seulement sur la vie « marketing » du produit, mais en examinant la vie réelle et complète d'un item produit, depuis sa conception jusqu'à son recyclage en passant par sa production et son usage. Trois phases principales sont communes à toutes les approches de modélisation technique du cycle de vie produit (Terzi *et al.*, 2008; Stark, 2011):

- Le début de vie (*BOL* – Beginning Of Life), réunissant les étapes de conception et de production (fabrication) du produit ;
- Le milieu de vie (*MOL* – Middle Of Life), comprenant les étapes de distribution/logistique et d'utilisation (incluant les activités d'entretien) du produit ;
- La fin de vie (*EOL* – End Of Life), comportant les étapes de logistique inverse (collecte), de reconditionnement (démontage et autres traitements) et de recyclage.

Ces trois phases principales mettent en lumière le lien qui existe entre le cycle de vie du produit, et les différents processus (ou chaînes) logistiques<sup>1</sup> qui le constituent. Afin de correctement poser notre propos, il est nécessaire de clarifier ce qu'est une chaîne logistique. Il en existe de nombreuses définitions (Lee et Billington, 1993; Lambert, Stock et Ellram, 1998; Tayur, Ganeshan et Magazine, 1999; Govil et Proth, 2002; Chopra et Meindl, 2007) mais nous retiendrons la définition de (Tayur, Ganeshan et Magazine, 1999) considérant qu'une chaîne logistique est un « Système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients, et des flux d'informations dans les deux sens ».

Cette définition souligne la nécessité de gérer les échanges de flux matériels mais aussi informationnels tout au long de la chaîne, ainsi que la nécessité de coopération entre les différents partenaires de cette chaîne. La notion de flux d'informations dans les deux sens (fournisseur vers client et inversement) nous semble aussi un point important de cette définition, en accord avec la notion de *closed-loop lifecycle*, introduite dans le premier chapitre. Ainsi,

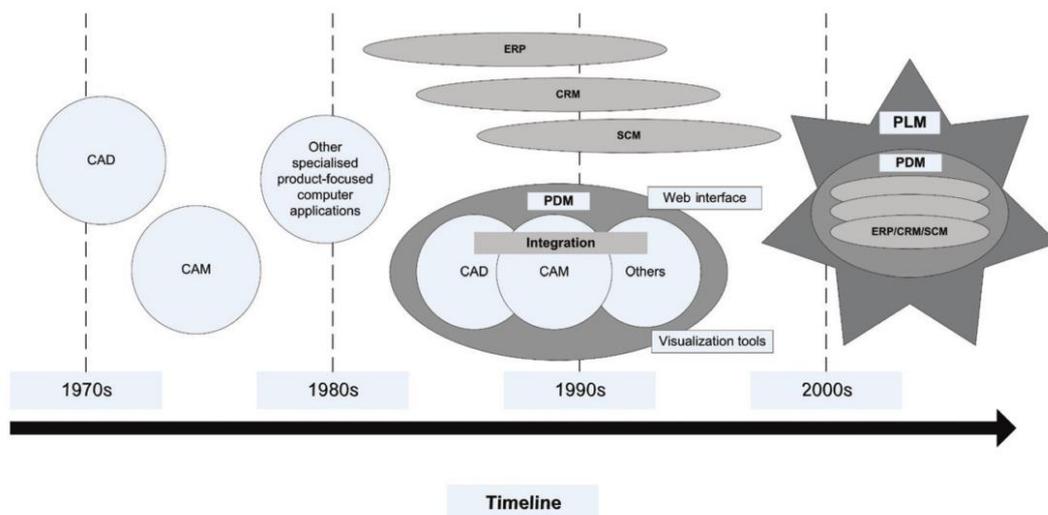
<sup>1</sup> «logistique» au sens large (et pas seulement au sens «transport»)

cycle de vie et chaîne logistique sont liés, et la mise en place d'une chaîne logistique efficace passe par la gestion ainsi que la mise à disposition d'informations du produit aux acteurs de la chaîne logistique, thématique proche du domaine du *Product Lifecycle Management* (PLM).

Le PLM a émergé dans les années 1990 et s'est popularisé dans les années 2000. Il s'est formé autour de deux courants à savoir (Lee, Fiedler et Smith, 2008) :

- La gestion des « informations produit » : de nombreux aspects/secteurs de l'entreprise sont connectés à la vie du produit, ce qui génère de grandes quantités d'informations à stocker, à échanger et à gérer. Dans ce contexte, l'intégration des systèmes tels que CAD, CAM, CAE (Computer Aided-Design, Manufacturing and Engineering) ou encore PDM (Product Data Management) à travers le système PLM facilite la collaboration entre les entreprises virtuelles (Ameri et Dutta, 2005) ;
- La gestion des entreprises : elle se compose de systèmes de planification des ressources matérielles et de l'entreprise (ERP - Enterprise Resource Planning), de systèmes de gestion des relations clients (CRM - Customer Relationship Management) et de gestion de la chaîne logistique (SCM – Supply Chain Management). Puisque l'on dispose d'une vision complète du cycle de vie des produits, les risques peuvent être estimés et en ce sens, le PLM offre un ensemble d'outils, de bases de données pour gérer les données ;

Chronologiquement, la gestion des entreprises s'est emparée un peu plus tard de ce concept, comme le montre la figure 6, issue de (Cao et Folan, 2012). Cette figure illustre le nombre important et croissant de systèmes d'information ou briques applicatives à prendre en compte dans le cycle de vie du produit. Cette multitude de systèmes posent des problématiques importantes d'interopérabilité. Divers standards et initiatives ont vu le jour comme IEC62264, B2MML, ISA-88, ISA-95 (Tursi *et al.*, 2009) et seront abordés plus tard dans ce document.



**Figure 6. Développement du PLM** (Cao et Folan, 2012)

Les communautés s'intéressant au Product Lifecycle Management se penchent depuis 2006 sur la notion de « Closed-loop PLM » (Jun, Kiritsis et Xirouchakis, 2007; Kiritsis, 2011), où, comme représenté figure 2, on considère que les flux d'informations, tout comme les flux matière recyclés, peuvent être récupérés par les activités amont du cycle de vie du produit.

## 2.1.2 Pilotage holonique des systèmes industriels & notion de produit intelligent

Le système d'information vient donc en support des différents processus logistiques en interaction avec le produit dans son cycle de vie. Il est présent en particulier pour répondre aux requêtes du système de pilotage, tel que le définit (Lemoigne, 1977) avec le modèle canonique de tout système, composé de 3 sous-systèmes : système « physique » ou « opérant », système d'information et système de décision. La manière de gérer ces données est donc liée aux processus qui les consomment, et plus particulièrement aux prises de décisions ayant lieu dans ces processus. En effet, toute donnée produite n'est là que pour être consommée par un processus (décisionnel) connu ou supposé. La structure du système de pilotage mise en place dans l'usine ou la chaîne logistique touche donc l'organisation du système d'information.

Dans le cas de systèmes complexes, le schéma présenté figure 7 ne peut pas être mis en œuvre sous une forme aussi simplifiée. Il est ainsi nécessaire de décomposer le système de décision en sous-systèmes, organisés en *centres de décision*, en la réalisant par fonctions (approvisionnements, production, commercial, qualité, maintenance, etc.) ou par niveaux de globalité et horizon des décisions, ce qui pour une fonction donnée, correspond à une structuration hiérarchique du système de décision (Pujo et Kieffer, 2002).

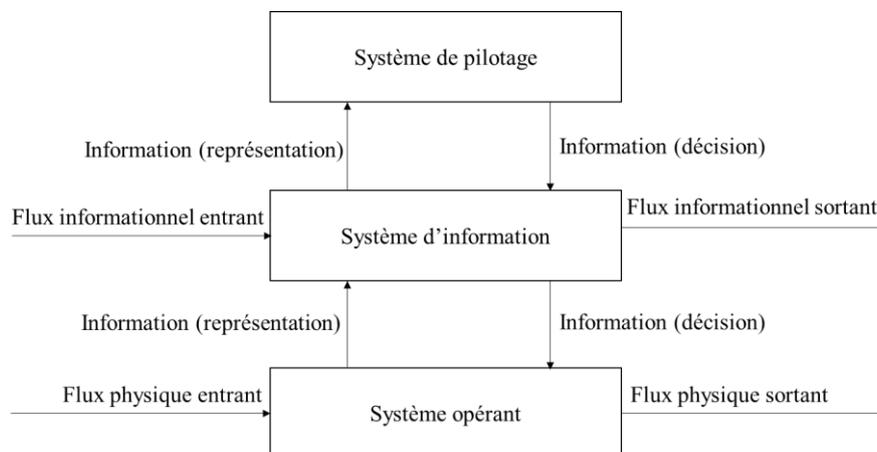
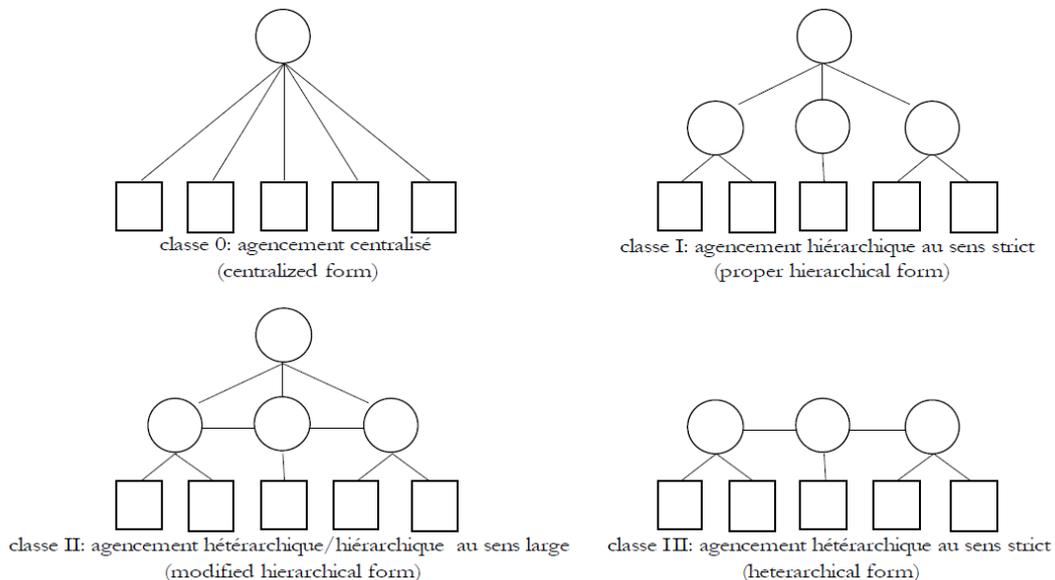


Figure 7. Liens entre les systèmes, adapté de (Lemoigne, 1977)

Il existe de nombreuses manières de structurer le système de décision. (Trentesaux, 2002) fournit à ce sujet un travail d'inventaire et de classification d'un très grand nombre de contributions scientifiques. Globalement, il n'est pas réducteur de considérer les 4 grands types de structuration suivants (figure 8) :

- *Structure centralisée (classe 0)* : type de structure la plus classique, toutes les ressources étant dirigées par un même centre de décision qui concentre tous les flux informationnels et décisionnels. Le pilotage est localisé au sein d'une ressource unique qui supervise la production, gère en temps réel les événements qui surviennent et réalise ainsi la synchronisation et la coordination de toutes les tâches. Cette structure est par essence peu robuste et peu résistante aux perturbations.

- *Structure hiérarchique (classe 1)* : cette structure est une extension de la précédente. Le système de pilotage est découpé en niveaux et chaque niveau coordonne les unités de pilotage du niveau inférieur, et ce jusqu'au niveau le plus bas. Ce type de structure présente des difficultés en termes de maintenance du système de décision et d'accessibilité au système d'information, car il est par exemple difficile d'agréger des informations venant de branches différentes de l'arborescence de pilotage et de garder des performances dynamiques acceptables.
- *Structure hétérarchique/hiérarchique (ou distribuée) (classe 2)* : structure hiérarchisée complétée par l'existence d'une coopération par niveau. Cela accroît la capacité de décision locale au sein de chaque niveau et favorise la réactivité par une meilleure intégration en temps réel des perturbations.
- *Structure hétérarchique au sens strict (ou décentralisée, isoarchique pour (Pujo, 2011)) (classe 3)*: dans cette structure, la hiérarchie des centres de décision disparaît. Les centres de décisions doivent alors coopérer pour assurer des tâches globales cohérentes.



**Figure 8. Classification issue de (Trentesaux, 2002)**

La réalisation de ces structures peut passer par plusieurs types d'approches, listées aussi dans (Trentesaux, 2002) telles que les approches par processus, les approches multi-agents, les approches bioniques, fractales ou les approches holoniques. Les approches holoniques se sont beaucoup développées en France depuis les années 2000, sous l'impulsion de divers laboratoires dont le CRAN.

Le terme « holon » a été introduit par (Koestler, 1967), résultat de la contraction du mot grec « holos » (le tout) et « on » (la particule). Un holon est une entité décisionnelle (avec entrées et sorties) constituée d'une partie physique associée à une partie informationnelle. Cette entité peut être composée « récursivement » d'un ensemble de holons de sous-niveau. Ainsi un holon peut faire, en même temps, partie d'une organisation plus large composée de holons de niveau supérieur et composé d'holons qu'il contrôle (cette dualité est appelée « effet Janus » dans (Koestler, 1979)). Enfin, les holons sont des entités autonomes capables de coopérer avec leurs « pairs » pour former une holarchie (réseau d'holons). Les systèmes de production ayant adopté

cette représentation holonique sont qualifiés de *systèmes holoniques manufacturiers* (HMS – *Holonic Manufacturing Systems* en anglais). Un HMS est une holarchie où chaque entité du système manufacturier est définie comme un holon, autonome et coopératif, dédié à la transformation, au transport, au stockage et/ou à la gestion des objets physiques et informationnels (Van Brussel *et al.*, 1998).

C'est dans cette approche holonique que s'inscrivent les travaux initiés au CRAN sur les Systèmes Contrôlés par le Produit (SCP). Ce concept, formalisé par (Morel *et al.*, 2003) sur les fondements des systèmes holoniques (Valckenaers *et al.*, 1997; Van Brussel *et al.*, 1998), propose de combiner avec plus de flexibilité les modes de pilotage centralisés avec les modes de pilotages distribués en tenant compte des capacités du produit à jouer un rôle actif de synchronisation des échanges entre différents systèmes d'entreprise centralisés (ERP, PLM, MES) et distribués dans le système physique (automates, machines à commande numérique, transpalettes auto-guidés, etc.). Dans ce cadre, le produit devient capable de prise de décisions, alors même qu'il constitue un média interopérable de communication intra- et inter-entreprises, se devant d'assurer la diffusion d'informations qui lui sont associées. Le produit passe donc d'un état *passif* à un état *actif* au sens de (Lemoigne, 1977), et même *intelligent*. Au CRAN, ces travaux incluent ceux de (Bajic, Chaxel et Véron, 1993; Chaxel, 1995) sur les objets nomades de production.

Les travaux menés sur le paradigme SCP se sont donc logiquement intéressés aux problématiques de pilotage, de protocoles de communication et d'interopérabilité centrés sur le produit intelligent. Les travaux de (Pannequin, 2007; El-haouzi, 2008; Klein, 2008; Herrera, 2011; Noyel, 2015) ont traité des aspects pilotage du système de production par le produit intelligent. Les travaux de (Cea, Dobre et Bajic, 2006; Dobre et Bajic, 2008) se sont intéressés à la modélisation du produit intelligent et des interactions entre le produit et le processus qu'il contrôle (cas de la thèse de D. Dobre, appliquée à la conduite de processus de production d'énergie) ou par qui il est transformé (cas de la thèse de A. Cea, appliquée à la chaîne logistique).

En particulier, les travaux menés par (Baïna, 2006; Auzelle, 2009; Tursi *et al.*, 2009) se sont intéressés à l'interopérabilité centrée sur le produit, en postulant que le produit, rendu « actif » par ses propriétés, collabore avec les applications constituant le système d'information d'entreprise aux moments opportuns et à la volée pour que ces dernières puissent permettre son évolution durant son cycle de vie. L'agilité du système d'information (qui devient alors complètement distribué) vient en appui du pilotage lui aussi distribué, le tout devant bien sûr garder une cohérence tout au long de l'axe du temps.

Ces différentes initiatives scientifiques ont été menées en France depuis plus de 20 ans et ont donc précédé la naissance de la mouvance « Usine du Futur », qui se fonde sur le concept d'une usine intelligente où des unités flexibles, adaptatives, automatisées et interconnectées collaborent afin de réaliser la production, laquelle est suivie en temps-réel grâce à la mise en place de capteurs et de logiciels au sein de ces machines complexes. L'Usine du futur utilise massivement les technologies en lien avec l'*IoT* (*Internet of Things*), le *Machine Learning*, le

*Big Data* et la communication *Machine to Machine* (M2M). Elle génère des flux de données importants qu'il faut savoir contrôler. En ce sens, nous considérons que les systèmes de pilotage et d'information distribués ont toute leur place dans une usine si connectée, si complexe, et qui se doit donc d'être robuste, flexible et adaptative quelques soient les éventuelles perturbations (prévisibles ou non).

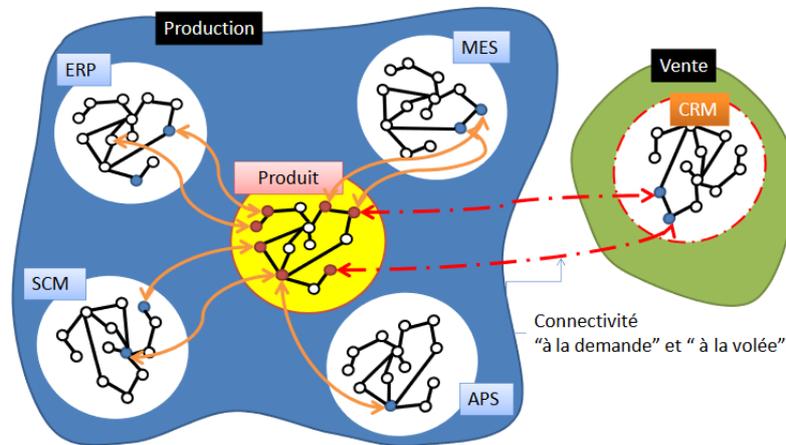


Figure 9. Le produit vecteur d'interopérabilité entre les SI (Auzelle, 2009)

L'ensemble de ces technologies informatiques mobiles, ayant envahi le monde domestique et industriel, se regroupe sous le terme d'*informatique ambiante* et constitue notre 3<sup>ème</sup> et dernier élément de contexte.

### 2.1.3 Intelligence ambiante

Au fil du temps, la notion de « système informatique » a évolué. Il y a eu tout d'abord l'époque où plusieurs personnes partageaient un même ordinateur, puis l'époque où chaque personne disposait de son propre ordinateur et est arrivée l'époque où chaque personne dispose d'une panoplie d'équipements informatiques. Cela peut aller du simple objet muni d'une puce RFID jusqu'au téléphone, PC portable, en passant par tout objet connecté domestique (montres connectées, capteurs intelligents, ...). La figure 10(a) illustre l'évolution de notre société vers cette société d'objets communicants, où les avancées technologiques ont favorisé la miniaturisation des composants électroniques et ont permis d'embarquer de l'intelligence dans tout type d'objet. Cette profusion d'appareils communicants, capables de créer un réseau de collaboration, de communication de données, voire de partage de connaissances a donné lieu à de nombreux concepts dont les plus connus sont rappelés ci-après.

Citons en premier lieu le concept d'informatique ubiquitaire/pervasive dans lequel chaque objet peut entrer en relation de façon intelligente avec son environnement (Weiser, 1991). Cette notion a par la suite évolué vers celle plus générique d'intelligence ambiante. Il est même désormais courant de parler de communication ambiante, de calcul ambient ou bien de système diffus. L'objectif est de réaliser un espace communicant, sans contrainte de structure, permettant à des utilisateurs et à des équipements d'interagir sans connaissance préalable du contexte. Une caractéristique forte de ces environnements est de permettre à ces technologies

de se « fondre » dans l'environnement, jusqu'à se confondre avec lui. On parle dès lors de *disappearing computer* (Streitz et Nixon, 2005).

Plus récemment, le concept d'Internet des objets (*Internet of Things - IoT*) a vu le jour avec les avancées du Web. Une formulation consensuelle de l'IoT a été proposée par (Tan et Wang, 2010) le définissant comme : « des objets ayant des identités et des personnalités virtuelles, opérant dans des espaces intelligents et utilisant des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer au sein de contextes d'usages variés ». L'IoT est en quelque sorte un monde où, aussi bien les objets physiques que les données et environnements virtuels interagissent entre eux dans le même espace-temps (Sundmaeker *et al.*, 2010).

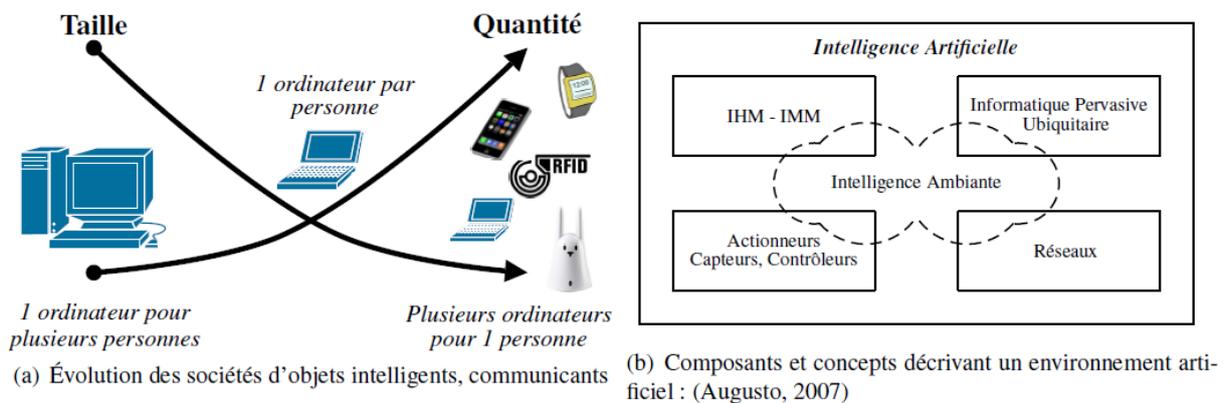


Figure 10. Evolution vers l'informatique ambiante

Il est difficile de définir une frontière claire entre tous ces concepts (IoT, intelligence pervasive, intelligence ambiante, etc.) car ils tendent tous vers un objectif commun, celui de « donner vie » aux objets, de les rendre interactifs et collaboratifs au sein de l'environnement, créant ainsi des environnements artificiels qui nous aident de manière proactive et réactive. La figure 10(b) extraite de (Augusto, 2007) peut aider à placer ces différents concepts dans le cadre de l'intelligence artificielle. La finalité de tous ces concepts est l'augmentation de l'espace physique au moyen de services numériques formant un tout adapté à l'homme, c'est-à-dire adaptable et adaptatif.

Les concepts précédemment énumérés mettent ainsi en œuvre des structures et des sociétés d'objets communicants/intelligents. La notion « d'intelligence » varie, dans sa mise en œuvre, de la simple étiquette RFID associée au produit à des unités de traitement embarquées beaucoup plus performantes (Meyer *et al.*, 2009). La littérature décrit de nombreuses applications et systèmes intelligents dans des domaines divers et variés (secteurs médical, militaire, domotique, animalier et bien sûr industriel). Dans le secteur industriel, l'instrumentation des matières premières, des produits semi-finis ou finis permet principalement de faciliter l'accès à l'information, d'assurer une traçabilité de ces produits tout au long de leur processus de production ou de logistique et d'aider à l'interopérabilité au sein de la chaîne d'approvisionnement (McFarlane et Sheffi, 2003; Parlikad *et al.*, 2003; Kärkkäinen, Ala-Risku et Främling, 2004). Cela concerne aussi bien le secteur automobile, que le secteur du bois, la chaîne du froid, le secteur agroalimentaire ou encore l'aéronautique.

Ainsi, l'intelligence ambiante est une voie permettant de doter le produit de fonctions supplémentaires, par le biais de technologies infotroniques. Dans le cadre de nos travaux, nous considérons ces technologies comme étant les supports nécessaires à l'application des concepts proposés.

Les éléments présentés précédemment ont permis de définir plus clairement le contexte des travaux présentés dans ce mémoire. Ceux-ci s'intéressent donc principalement à :

- **La gestion des informations du produit tout au long de son cycle de vie** (1<sup>er</sup> élément de contexte) ... ;
- ... dans l'objectif **d'améliorer l'interopérabilité des systèmes d'information distribués intra- et inter-entreprises** par le biais de **produits/matériaux intelligents portant leurs informations** (2<sup>ème</sup> élément de contexte) ... ;
- ... à l'aide **des technologies issues de l'intelligence ambiante** (3<sup>ème</sup> élément de contexte).

## 2.2 POSITIONNEMENT DES TRAVAUX PRESENTES

Une fois ce contexte des travaux présenté, il devient maintenant possible de décliner le positionnement scientifique de nos travaux et de préciser les différents verrous scientifiques abordés dans notre recherche.

### 2.2.1 Produit intelligent comme vecteur d'information pour les SCP

Comme présenté précédemment, dans le cadre des systèmes contrôlés par le produit, (Morel et Grabot, 2003) propose de distribuer système de pilotage et système d'information en partie sur le produit. Augmenté de fonctionnalités supplémentaires, il peut alors devenir *intelligent*. L'intelligence d'un produit étant une notion relative au contexte d'application, de nombreuses définitions existent pour ce concept.

#### Définitions du concept de produit intelligent

L'état de l'art exhaustif réalisé par (Sallez, 2012) est une très bonne ressource pour accéder à un éventail exhaustif des différentes définitions issues de la littérature, des typologies existantes ainsi que des contributions nationales/internationales produites par les différentes communautés du PLM, de l'automatique/productique ou de l'informatique. Les définitions principales sont rappelées table 1. L'objectif ici n'étant pas de produire un état de l'art similaire mais bien de montrer en quoi notre positionnement s'inscrit dans les travaux existants, nous ne présenterons pas en détail toutes ces définitions et invitons le lecteur à consulter le travail de Sallez.

Dans le cadre de nos travaux, les définitions qui nous semblent les plus proches de notre domaine de travail sont celles relatives à la notion d'« Intelligent Product » (définitions entourées d'un cadre en gras dans la table 1). Plusieurs auteurs en ont proposé des définitions qui peuvent couvrir plusieurs aspects.

**Table 1. Inventaire des définitions relatives au produit intelligent, adapté de (Sallez, 2012)**

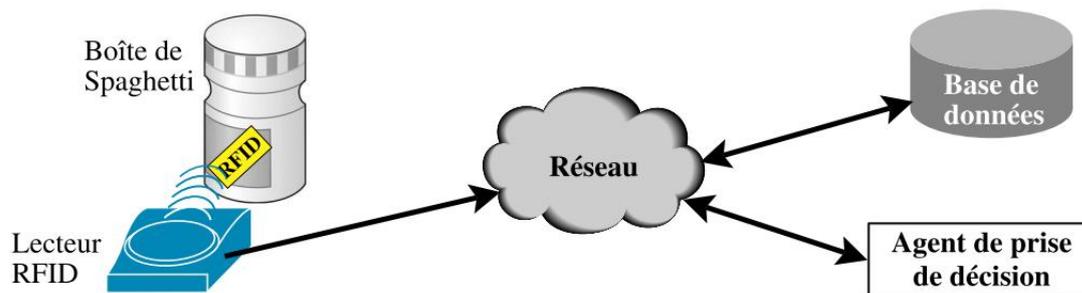
Désignation	Auteurs	Propriétés
Objet nomade de production	(Chaxel, 1995)	Objet capable de : <ul style="list-style-type: none"> <li>- De fournir des données aux clients (<i>classe 1</i> : informé),</li> <li>- De coopérer avec les autres entités participant à son évolution (<i>classe 2</i> : objet décidant),</li> <li>- D'adapter ses règles de décision en tenant compte de l'expérience acquise durant les phases précédentes de son cycle de production, (<i>classe 3</i> : objet mémorisant),</li> <li>- De gérer des processus de décision (<i>classe 4</i> : objet coordonné),</li> <li>- Pour le niveau le plus avancé, de s'auto-finaliser, c'est-à-dire de (<i>classe 5</i> : objet auto-finalisé).</li> </ul>
Active product, I_produit	(Brun-Picard <i>et al.</i> , 1997; Pujo, Broissin et Ounnar, 2009)	Entités autonomes coopèrent et coordonnent leurs actions pour atteindre un but commun. Chaque entité est capable de communiquer, de décider et d'agir. La prise de décisions repose également sur une base de données locale à chaque entité, qui dispose de ses propres informations (identifiant, gamme opératoire, etc.) et des connaissances sur le processus de production.
Objet communicant	(Ramirez, 2006)	Objet physique qui : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interagit avec son environnement physique, avec d'autres objets communicants et les utilisateurs ;</li> <li>- Peut acquérir, recevoir et distribuer une information dans un environnement proche ou distant ;</li> <li>- De réaliser et/ou faire réaliser par d'autres objets des actions diverses.</li> </ul>
Intelligent Product	(McFarlane <i>et al.</i> , 2003)	Objet avec les 5 caractéristiques suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possède une identification unique ;</li> <li>- Est capable de communiquer avec son environnement ;</li> <li>- Peut conserver des informations le concernant ;</li> <li>- Déploie un langage pour présenter ces caractéristiques, exigences de production, etc. ;</li> <li>- Est capable de participer à la prise de décisions le concernant.</li> </ul>
	(M Kärkkäinen, Ala-Risku et Främpling, 2003)	Le produit possède les caractéristiques suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possède un code d'identification unique ;</li> <li>- A des liens vers les sources d'informations concernant le produit au-delà des frontières des organisations, soit incluses dans le code d'identification ou accessibles par des mécanismes de recherche ;</li> <li>- Peut communiquer les opérations à effectuer sur le produit à des systèmes d'information et des utilisateurs lorsque nécessaire (même de manière proactive).</li> </ul>
	(Ventä, 2007)	Le produit doit posséder les caractéristiques suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Surveille en continu son état et son environnement ;</li> <li>- Réagit et s'adapte à l'environnement et aux conditions opérationnelles ;</li> <li>- Maintient une performance optimale dans des circonstances variables, même dans des cas exceptionnels ;</li> <li>- Peut communiquer actuellement avec son utilisateur, son environnement et d'autres produits et systèmes.</li> </ul>
Smart part	(Wycisk, McKelvey et Hülsmann, 2008)	Entités logistiques qui possèdent des capacités d'interaction et de décision en faisant usage des communications modernes et des technologies de l'information comme le RFID, GPD and sensor networks.
PEID	(PROMISE, 2009)	Lien entre le produit et sa représentation électronique. 4 types de PEID (product embedded information device) peuvent être distingués du code barre jusqu'au système ayant des puissances de calcul plus importante.
Avatar	(Cassina, Cannata et Taisch, 2009)	Représentation virtuelle du produit, contenant toute les informations et la connaissance qui le concernent.

(McFarlane et Sheffi, 2003) définissent le produit intelligent comme « a physical and information-based representation of a product ». Il dispose des caractéristiques suivantes :

1. Il possède une identification unique ;
2. Il est capable de communiquer de manière efficace avec son environnement ;
3. Il peut stocker ou conserver les données le concernant ;
4. Il peut déployer un langage pour décrire ses caractéristiques, ses contraintes de production,
5. Il est capable de participer à ou prendre des décisions importantes pour son devenir.

En se basant sur cette définition, deux niveaux d'intelligence sont alors définis par (Wong *et al.*, 2002). Le premier couvre essentiellement les points 1 à 3, où le produit est capable de communiquer son état (forme, localisation, composition, etc.) et le second couvre les points 1 à 5, permettant au produit d'évaluer et d'influencer le cours de sa vie. Il devient ainsi proactif en complément du fait qu'il soit capable de communiquer ses états.

L'exemple de la boîte de conserve de spaghetti proposé dans (Wong *et al.*, 2002) illustre ce concept dans lequel la boîte de conserve est un objet physique dont les informations sont stockées dans une base de données distante, et l'intelligence est fournie par l'agent de prise de décision. La connexion entre le produit physique et la représentation de l'information appropriée se fait via un lecteur de tag RFID.



**Figure 11. Boîte de conserve de spaghetti, adapté de (Wong *et al.*, 2002)**

(Mikko Kärkkäinen, Ala-Risku et Främling, 2003) défendent l'idée que le produit intelligent est un moyen de contrôle d'entrée-sortie des produits sur la chaîne logistique. En d'autres termes, les produits individuels dans la chaîne logistique contrôlent leur destination ainsi que leur itinéraire. Pour cela, les auteurs expliquent que le produit doit posséder les caractéristiques suivantes :

1. Il possède une identification unique ;
2. Il est un moyen pour accéder aux informations qui le concernent dans l'organisation, que ce soit grâce au code d'identification ou par d'autres mécanismes ;
3. Il peut communiquer.

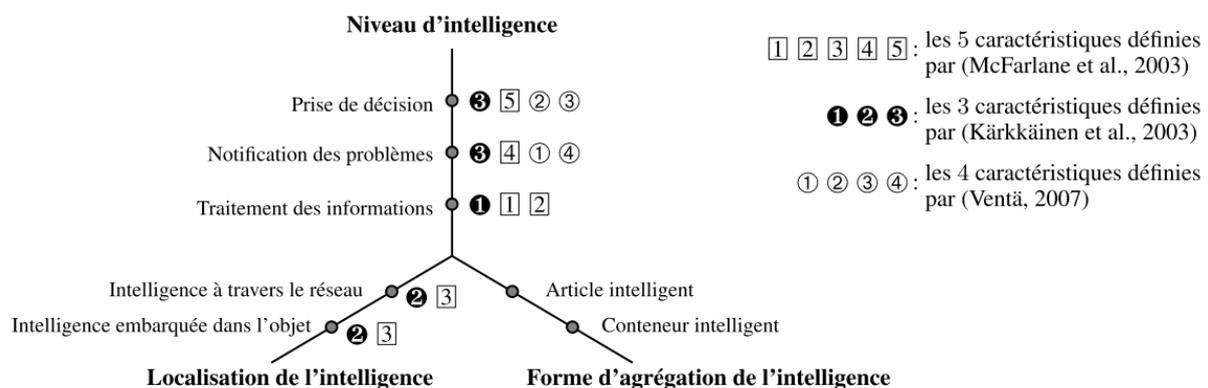
(Ventä, 2007) fournit une autre définition de l'intelligence d'un produit ou d'un système, laquelle se rapporte essentiellement à des produits capables de prendre des décisions, c'est-à-dire une extension du point 5 de la première définition et du point 3 de la seconde. L'intelligence y est définie comme :

1. Une surveillance continue de son statut et de son environnement ;
2. Une réactivité et une adaptation aux conditions opérationnelles et environnementales ;

3. Un maintien des performances optimales, quelles que soient les circonstances (même dans des cas non prévus) ;
4. Une communication active avec l'utilisateur, l'environnement ou autres systèmes/produits.

Cette définition est majoritairement axée sur les produits embarquant des capacités de traitement et de communication suffisantes pour dialoguer avec des systèmes externes. Ce point met en évidence une différence notable avec les définitions précédentes, dans lesquelles les produits possèdent uniquement des identifiants utilisés pour accéder aux informations et aux agents de décisions déportés sur le réseau.

(Meyer et al., 2009) proposent une classification à trois dimensions des travaux traitant du produit intelligent, qui reprend les aspects introduits dans les définitions précédentes, en ajoutant une dimension liée au niveau d'agrégation de l'intelligence (décrite ci-après). Cette classification est illustrée sur la figure 12.



**Figure 12. Classification des produits intelligents, d'après (Meyer, Främling et Holmström, 2009)**

Nous faisons également apparaître sur cette figure les différents critères relatifs aux précédents auteurs afin de mettre en évidence les points de recouvrement. Les trois dimensions de la classification sont :

- Niveau d'intelligence, comprenant trois niveaux :
  - *Traitement des informations* : le produit doit être au minimum capable de gérer ses propres informations (provenant des capteurs, des lecteurs RFID, etc.). Sans cette capacité, il serait difficile de parler de produit intelligent ;
  - *Notification de problème* : en complément de la capacité à porter de l'information, le produit peut aussi notifier/avertir son propriétaire lorsqu'une anomalie ou tout autre événement se produit. À ce stade, le produit n'est pas encore capable de gérer son comportement, ni de modifier son devenir ;
  - *Prise de décisions* : le produit le plus intelligent est celui qui est complètement autonome, capable de prendre des décisions quant à son devenir et ce sans intervention extérieure.
- Localisation de l'intelligence, comprenant deux niveaux :

- *Intelligence à travers le réseau* : l'intelligence du produit est déportée sur des bases de données distantes. (Ramparany et Boissier, 2002) nomment cela des plates-formes portails (*portal platforms*). Néanmoins, comme cela est souligné dans (Främling et Rabe, 2006), le portail est uniquement une interface graphique présentant les informations pour l'abonné. Les questions liées à la gestion de l'information, comme par exemple relier des informations à des éléments spécifiques du produit et de la prise en compte de la place du produit dans la nomenclature, demandent des solutions supplémentaires.
  - *Intelligence embarquée dans l'objet* : toute l'intelligence prend place dans l'objet. (Ramparany et Boissier, 2002) nomment cela des plates-formes embarquées (*embedded platforms*).
- Forme d'agrégation de l'intelligence, qui est une dimension nouvelle n'ayant pas été prise en considération dans les précédentes définitions. (Meyer, Främling et Holmström, 2009) soulignent néanmoins que cette dimension est importante et qu'elle ne doit pas être négligée. En effet, un produit peut être considéré comme une composition hiérarchisée de composants plus élémentaires.

L'analyse de cette dimension amène à la structuration suivante :

- *Article intelligent* : l'objet ne gère que les informations, les notifications et/ou décisions sur lui-même. S'il est composé de plusieurs composants (parties), ils ne pourront pas être distingués comme des objets individuels.
- *Conteneur intelligent* : le conteneur intelligent ne gère pas uniquement ses propres informations, notifications et/ou prises de décisions, il est aussi conscient des composants qui le forment. Si le conteneur intelligent est démonté ou des pièces sont supprimées, les parties sont capables de continuer à fonctionner comme des articles intelligents (point précédent). Un exemple serait celui d'un moteur de voiture que l'on enlève, rénove, dont on ajoute de nouveaux composants tels qu'un alternateur, radiateur, etc.

### **Limites de concept de produit intelligent**

Un certain nombre de problématiques concernant les différentes solutions et technologies des produits intelligents subsiste encore, comme le soulignent (Thomas, 2009; McFarlane *et al.*, 2012). Ces derniers déclarent qu'il y a encore un grand nombre de questions ouvertes comme la collecte des informations liées au produit, leur stockage à travers la chaîne logistique, ou encore la distribution et la gestion de ces informations tout au long de leur cycle de vie. En effet, dans la littérature, les produits dits « intelligents » sont des produits « discrets ». Par exemple, un produit embarque le plus souvent une puce RFID unique afin d'accéder à l'information déportée sur le réseau. Il peut aussi embarquer un nœud de capteurs afin de réaliser des mesures sur son environnement. Par conséquent, cette notion d'intelligence discrète est limitée, à savoir :

- *Lecture discrète* : il est parfois nécessaire de « lire le produit » suivant un positionnement particulier, bien que la technologie RFID ait résolu en grande partie ce problème principalement lié à la technologie des codes à barres. Ce qui ne diffère cependant pas entre

- ces deux technologies, c'est le fait que l'étiquette RFID ou papier est localisée à un endroit particulier du produit, rendant de fait l'information discrète (l'information ne peut pas être attachée à des morceaux/zones différent(e)s de matière durant le cycle de vie de produit) ;
- *Risque d'endommagement de composant électronique attaché* : si les composants (puce RFID ou nœud de capteurs) sont endommagés, le flux d'information relatif au produit sera dès lors rompu. (Tajima, 2007) souligne la grande proportion de tags RFID défectueux et de lectures impossibles dans des projets pilotes, pouvant atteindre 20 à 50% ;
  - *Problème de transfert de l'information* : lorsqu'un produit subit une transformation (p.ex. le produit est coupé en deux sous-ensembles ou pièces), une des parties résultantes de l'opération est alors vierge d'informations (excepté si l'on ajoute un composant électronique à cette nouvelle pièce). Dans la filière bois par exemple, ce problème est très présent, car les différentes transformations physiques subies par le bois empêchent de mettre en œuvre des stratégies de traçabilité efficace, ce qui a pour effet de multiplier les zones de perte d'informations entre les partenaires de la chaîne de production du bois (cf. figure 13 issue de (Ginet et Golja, 2007)). On perçoit par cet exemple l'importance de pouvoir gérer l'agrégation/désagrégation de produits dont la forme va évoluer au cours du temps.

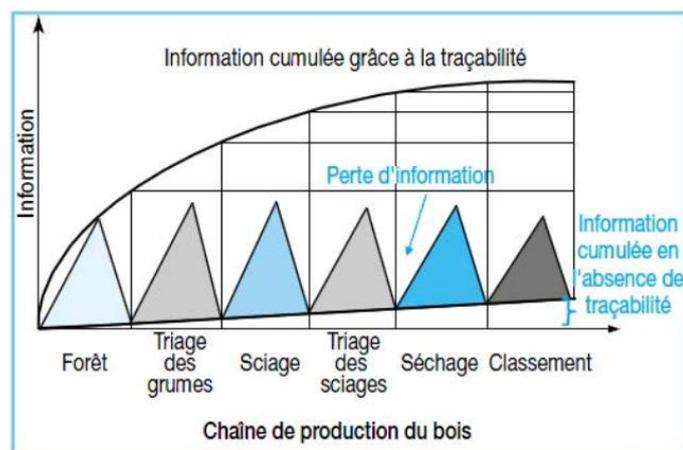


Figure 13. Pertes d'information successives dans l'industrie du bois (Ginet et Golja, 2007)

- *Faible capacité mémoire* : la capacité mémoire actuelle des tags RFID et des nœuds de capteurs est limitée et souvent corrélée à la dimension du composant (plus le tag ou le nœud est petit, plus la capacité mémoire décroît).

## 2.2.2 Paradigme de la matière communicante

### Définition du concept

Afin de répondre aux limites du concept de produit intelligent présentées précédemment, un nouveau paradigme est proposé par (Thomas, 2009) qui change radicalement la manière de voir le produit et la matière. Ce nouveau concept consiste à donner la faculté au produit d'être intrinsèquement et intégralement communicant. « Intrinsèquement » signifie que le produit est par essence communicant (d'un point de vue purement conceptuel, toute la matière est communicante). On ne se soucie pas de la localisation des composants de communication (p.ex. les tags RFID, les nœuds de capteurs) dans le produit puisque toute sa matière est communicante (capable de communiquer des informations en tout point de la surface du produit). De plus, le

concept indique que la matière doit rester communicante même après des opérations de transformation de forme, d'espace ou de temps afin d'assurer le transfert des informations qu'elle porte. Ce concept, qui reste futuriste (et qui l'était bien plus lors de sa formulation initiale en 2009), ne peut pas encore être appliqué en l'état car il n'existe pas encore de procédés permettant de diffuser de l'information de manière continue dans la matière. Actuellement, nous avons recours aux technologies de l'informatique ambiante (RFIDs, réseaux de capteurs) pour le concrétiser.

Ce concept est clairement aligné avec les 3 éléments de contexte indiqués dans la première partie de ce chapitre, puisque la matière communicante permet de **gérer l'information (du matériau ou du produit) tout au long de son cycle de vie** depuis sa fabrication jusqu'à son recyclage, afin **d'améliorer l'interopérabilité dans l'entreprise mais aussi entre les entreprises**, par le biais des **technologies de l'informatique ambiante**.

### Travaux connexes

Parallèlement à nos travaux, le paradigme de matière communicante a été abordé par diverses contributions, que nous présentons ici brièvement.

(Jover, 2013; Jover *et al.*, 2013) présentent une solution de traçabilité du bois qui permet de conserver l'information relative à son origine tout au long de son cycle de vie. La solution proposée repose sur le fait que si on est capable d'attacher au bois d'un arbre, dans son intégralité, un marqueur qui lui soit propre, il devient alors possible de connaître, tout au long de son cycle de vie, les informations le concernant. Les auteurs proposent une approche par marquage chimique du bois en noyant dans le billon un assemblage de plusieurs produits chimiques identificateurs, ainsi qu'une méthode de spectroscopie nommée *RQN* (Résonance Quadripolaire Nucléaire) pour identifier ce marquage. Ces études montrent la faisabilité de l'identification d'un produit chimique imprégné et recristallisé dans un échantillon de bois et prouvent qu'il est possible de marquer l'origine du bois dans la masse avec un assemblage de plusieurs produits chimiques.

(Krommenacker, Charpentier et Peña, 2013) s'intéresse à la mesure des dimensions spatiales d'un matériau communicant. Les auteurs proposent un principe d'auto-mesure, nommé *SMS* (pour Self-Measurement System), d'un matériau embarquant un réseau de nano-capteurs sans fil. Des multitudes de nœuds de capteurs déployés en surface ou dans le volume du matériau permettent de localiser les nœuds situés en bordure de produit. Par la suite, l'estimation de la distance entre les nœuds de bords fournit les informations sur les dimensions du produit.

Les travaux présentés par (Tran-Dang, Krommenacker et Charpentier, 2014) visent à mesurer les dimensions d'un produit embarquant dans sa matière des nano-nœuds de capteurs distribués uniformément sous forme d'une grille de dimension 100 cm x 100 cm qui communiquent dans la bande Terahertz (0.1-10 THz). Ces travaux détectent les nœuds de bordure et les nœuds au coin du produit en se basant sur la même technique de densité de voisinage SMS. Ces travaux sur l'auto-mesure sont actuellement appliqués à la détection de la position de PI-conteneurs

dans un contexte d'Internet Physique (Tran-Dang, Krommenacker et Charpentier, 2015), afin de construire une représentation numérique de la zone de stockage.

### 2.2.3 Elicitation des verrous scientifiques

En résumé, la vision initiale SCP a amené logiquement à travailler avec le concept de produit intelligent. Cependant, les limitations induites par ce dernier ont poussé à la formalisation d'un nouveau paradigme dit de « matière communicante ». Cette dernière a été étudiée sous des aspects divers, mais pas sous l'angle de la gestion des données distribuées, qui correspond à notre contexte. *Dans ce cadre, nous nous positionnons dans une recherche en rupture, traitant de systèmes d'information interagissant totalement ou partiellement par le biais d'un matériau communicant utilisé comme vecteur d'interopérabilité technique et sémantique, ceci de manière à garantir une synchronisation des flux physique et informationnel tout au long du cycle de vie du produit. En relation avec notre positionnement, notre objectif de recherche est de mettre en place les théories, méthodes et outils permettant de réaliser ce type de système d'information distribué.* Nous envisageons donc un système à deux niveaux comme illustré figure 14 :

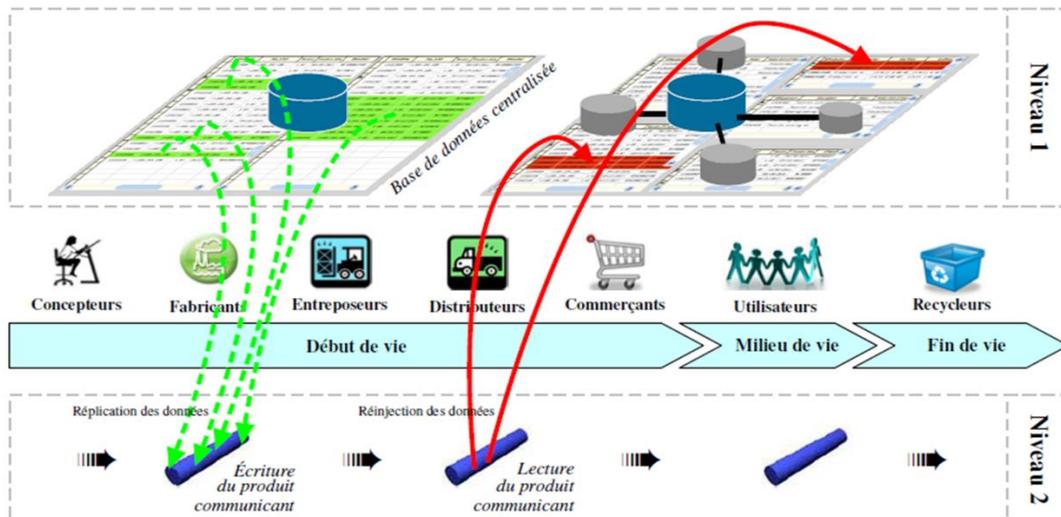


Figure 14. Système d'information à deux niveaux, spécifique à nos travaux

Le premier niveau concerne l'extraction/ la synchronisation des données entre le SI concerné et la matière communicante, alors que le deuxième niveau s'intéresse à la distribution de l'information dans la matière communicante. La réalisation de ces deux niveaux implique de répondre aux 4 verrous scientifiques déjà posés dans la partie « Curriculum vitae et notice d'activités » et rappelés ci-dessous :

1. *Comment modéliser les données portées par la matière communicante ?*
2. *Comment synchroniser l'état virtuel de la matière communicante avec son état réel ?*
3. *Comment sélectionner les données à mettre dans la matière communicante ?*
4. *Comment distribuer/recomposer les données dans/depus la matière communicante ?*

Comme explicité précédemment, la matière communicante est une spécialisation du concept de produit intelligent : tout comme un produit intelligent, elle est capable de stocker de l'information et de la communiquer à son environnement. Néanmoins, contrairement au produit intelligent, l'information stockée dans la matière communicante est « diffuse », c'est-à-dire

disséminée dans toute sa structure. Gérer les informations présentes sur la matière communicante revient donc à gérer un produit intelligent avec des aspects très spécifiques à la matière, liés à la sélection et la diffusion d'informations.

Par conséquent, les verrous (1 – *Modélisation des données*) et (2 – *Synchronisation des données*) ne sont pas des aspects spécifiques à la matière communicante mais relèvent plus de la gestion des informations appliquée au produit intelligent en général, alors que les verrous (3 – *Sélection des données*) et (4 – *Dissémination/Recomposition des données*) sont une véritable spécificité de la matière communicante. Ainsi, conformément au chapitre précédent, ces 4 verrous scientifiques ont été regroupés dans les deux thèmes présentés dans le graphe synthétique de la carrière introduit figure 3. Le thème « modélisation des données portées par le produit tout au long de son cycle de vie » s'est plutôt intéressé aux verrous (1) et (2) tandis que le thème « gestion des données dans la matière communicante » s'est plutôt intéressé aux verrous (3) et (4).

La suite du document est structurée comme suit : le chapitre 3, «Etat de l'art des modèles et mécanismes» traitera des travaux issus de la littérature sur chacun des verrous élicités. Le chapitre 4, «Contributions scientifiques » listera les contributions réalisées en regard de chacun des verrous, décomposées pour chaque verrou en une ou plusieurs actions de recherche.



# Chapitre 3. ETAT DE L'ART DES MODELES ET MECANISMES

## Rappels des chapitres précédents & Objectifs du chapitre

*Les chapitres précédents ont permis de poser le cadre scientifique de nos travaux et de préciser notre positionnement. Nous avons aussi montré qu'ils peuvent être regroupés en deux thèmes, l'un tourné autour de la modélisation des données portées par le produit tout au long de son cycle de vie et l'autre sur la gestion des données dans la matière communicante. Enfin, nous avons élicité nos 4 verrous scientifiques.*

*La première partie de ce chapitre (section 3.1) présente l'organisation de l'état de l'art. Elle introduit un éclairage nouveau sur nos verrous scientifiques, en montrant qu'ils sont nécessaires pour maintenir la cohérence sémantique et la conservation du flux d'informations. Notre état de l'art est structuré en regard de ces verrous, puisqu'il comporte 4 sections traitant chacune d'un verrou (sections 3.2,3.3,3.4,3.5).*

*Chaque section présente de manière synthétique les différents travaux issus des communautés génie industriel, automatique, informatique et mécanique ayant abordé les mêmes types de problèmes. La quantité importante de travaux sur chacun de ces verrous ne nous permet pas de développer ici 4 états de l'art exhaustifs. Nous avons donc fait le choix de réaliser 4 sections à « géométrie variable », dont la « profondeur » dépend du temps que nous avons passé à traiter le verrou correspondant.*

*Chaque section comporte aussi une courte synthèse mettant en lumière les apports et les faiblesses des travaux d'intérêt par rapport à notre contexte de travail. Une conclusion générale permet de faire le point sur les différents travaux sur lesquels nous nous sommes appuyés ainsi que sur les manques relevés. Ce sont ces manques qui ont conduit aux travaux développés dans le chapitre 4 « Contributions scientifiques ».*

## 3.1 ORGANISATION DE L'ETAT DE L'ART

Comme nous l'avons souligné, nos travaux considèrent que la matière est porteuse de son information. Ceci nécessite qu'elle soit capable d'échanger de l'information avec les Systèmes d'Information (SI) qu'elle peut rencontrer tout au long de son cycle de vie, ce qui implique qu'elle soit interopérable avec eux.

Nous considérons qu'un SI est constitué d'un ensemble de ressources (matériels, logiciels, données, procédures, humains, ...) structurées pour acquérir, traiter, mémoriser, transmettre et rendre disponible l'information (sous forme de données, textes, sons, images, ...) dans et entre les organisations (définition adaptée de (Reix *et al.*, 2016)). Il est fréquent de voir coexister au

sein d'une même entreprise une multitude de systèmes informatiques différents de type PDM, ERP, MES, APS, etc.

Une littérature foisonnante existe sur l'interopérabilité des SI. (Panetto, 2006) présente la très grande variété de définitions existantes. Une définition simple de l'interopérabilité pourrait être celle définie dans (Paviot, 2010) comme « la capacité qu'ont deux systèmes à échanger et utiliser cette information ». (Panetto et Molina, 2008) listent les principaux modèles de maturité d'interopérabilité, incluant la classification de (EIF, 2004) qui indique les 3 niveaux d'interopérabilité suivants :

- **Niveau technique** : pour pouvoir échanger des informations, il faut au préalable s'assurer que le transport des données d'un système à l'autre soit possible ;
- **Niveau sémantique** : les données échangées doivent pouvoir être comprises par les deux systèmes. Les données reçues deviennent alors des informations (données structurées) pour être traitées par les SI en question ;
- **Niveau organisationnel** : une organisation adaptée doit être prévue pour assurer l'échange des informations.

Cette décomposition en 3 niveaux, qui est communément acceptée par la communauté SI, sera celle que nous retiendrons pour nos travaux. La norme (ISO-14258-1998, 1998), relative à la modélisation des entreprises, précise que l'interopérabilité entre deux (ou plusieurs) SI peut être traitée de 3 manières :

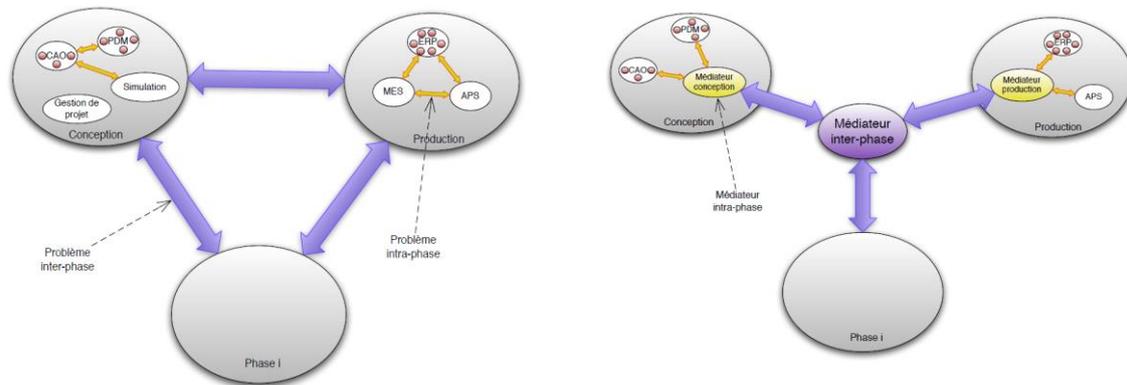
- **Intégration** : un standard commun de modèles de données est utilisé pour tous les composants du système. Le processus d'intégration revient à fusionner les modèles de données ;
- **Unification** : un méta-modèle commun à tous les composants du système fournit un moyen pour établir des correspondances sémantiques ;
- **Fédération** : des modèles distincts sont associés dynamiquement. Cette approche s'appuie habituellement sur des outils semi-automatiques, basés sur des méthodes heuristiques qui comparent principalement la terminologie et la structure des données afin de détecter les couples de concepts qui sont reliés au niveau sémantique (similarité ou équivalence), et nommés *mappings*.

De façon organisationnelle et structurelle, combiner des SI entre eux consiste à appliquer un mécanisme de médiation afin d'améliorer les interactions entre ces mêmes SI, mais aussi entre les différentes parties prenantes de ceux-ci, entre les services, voire les entreprises auxquels ils appartiennent. Ainsi, différents scénarii d'intégration sont possibles (Vernadat, 2007; Chen, Li et Kotz, 2008) :

- Une **intégration « complète »** signifie que les éléments constitutifs des systèmes ne se distinguent plus du système bénéficiaire auquel ils appartiennent puisqu'ils forment un tout indissociable et cohérent ;
- Une **intégration « forte »** signifie que les éléments constitutifs des systèmes se distinguent des uns des autres, mais cependant toute modification sur un des éléments impacte directement les autres ;

- Une **intégration « faible »** signifie que les éléments constitutifs des systèmes continuent d'exister par eux-mêmes et peuvent participer comme un élément d'un système intégré.

(Paviot, 2010) montre par ailleurs que l'interopérabilité peut être relative soit à une phase donnée du cycle de vie (interopérabilité intra-phase) ou alors entre deux phases du cycle de vie (interopérabilité inter-phase), comme illustre Figure 15(a).



(a) Problèmes d'interopérabilité dans le cycle de vie

(b) Architecture de médiation multi-échelle

**Figure 15. Catégories des problèmes d'interopérabilité et classes de médiateur**

La résolution du problème d'interopérabilité peut passer par l'utilisation d'un médiateur, système supplémentaire assurant la continuité du flux sémantique (Bénaben *et al.*, 2008), pouvant être intra- ou inter-phases, ces médiateurs pouvant être combinés en une structure multi-échelles (Figure 15(b)).

Par sa nature, la matière communicante réalise (et doit réaliser) une interopérabilité technique entre les différents SI en assurant la continuité du flux d'informations, ainsi qu'une interopérabilité sémantique en portant des données compréhensibles pour les différents SI connectés. Si on considère la matière communicante comme un médiateur d'information (ou un résultat du médiateur d'information), elle a donc pour rôle d'assurer la **continuité du flux d'informations** tout en en conservant sa **sémantique**. On se trouve alors proche du schéma directeur des travaux de (Cheutet, 2012), qui considère que ces deux objectifs constituent le socle de l'interopérabilité entre systèmes d'informations.

Ainsi, notre état de l'art est structuré en 4 parties (figure 16). Les parties 3.1 « Modélisation des données » et 3.4, « Synchronisation de données » s'intéressent à la conservation de la sémantique des données entre systèmes d'information en traitant les modèles, ontologies et standards existants dans la littérature du PLM, et en s'intéressant à l'utilisation des technologies de synchronisation pour le maintien en cohérence du flux sémantique. Les parties 3.2, « Sélection de données » & 3.3, « Distribution des données », concernent la conservation de la continuité du flux d'informations, mais dans le contexte d'intelligence ambiante distribuée caractéristique de la matière communicante. Ces parties répertorient les travaux existants en sélection et distribution de données.

Il faut noter que chacun des objectifs énoncés précédemment correspond à un des thèmes déjà présentés lors de la première partie du mémoire (chapitre « Curriculum vitae et notice d'activités ») et que chaque partie de l'état de l'art répond à un des verrous énoncés au chapitre précédent.

<i>Thèmes</i>	<i>Objectifs</i>	<i>Parties de l'état de l'art</i>
Modélisation des données portées par la matière communicante	Cohérence sémantique flux informations	Modélisation des données (Partie 3.2)
		Synchronisation des données (Partie 3.5)
Gestion des données dans la matière communicante	Conservation flux informations	Sélection des données (Partie 3.3)
		Distribution des données (Partie 3.4)

Figure 16. Structuration de l'état de l'art

## 3.2 MODELISATION DES DONNEES

Comme expliqué précédemment, nous considérons la matière communicante comme un médiateur d'informations intra- et inter-phases, porteur de son information, c'est-à-dire de données structurées à l'aide d'un modèle compréhensible par l'ensemble des acteurs du cycle de vie du produit. Dans un contexte où l'hétérogénéité et la distribution des systèmes d'information sont importantes, les acteurs nombreux et/ou pas encore identifiés, la littérature recommande de choisir prioritairement un **modèle d'unification standard et extensible** (aussi appelé modèle de référence), seul capable de garantir la mise à l'échelle dans un contexte industriel (Chen et Vernadat, 2004; Chen, Doumeingts et Vernadat, 2008; Paviot, 2010; Cheutet, 2012). Ce chapitre se concentre donc sur les initiatives normatives et scientifiques proposant des standards ou assimilés pour le cycle de vie du produit.

### 3.2.1 Standards supports du cycle de vie du produit

De par le contexte de nos travaux, nous nous sommes intéressés aux produits issus de l'industrie manufacturière et de la construction. Ces deux domaines ont donné lieu à deux courants distincts de modélisation de données aboutissant à des travaux différents. Les travaux issus de la communauté manufacturière ont emprunté le terme PLM, alors que les travaux issus de la communauté de la construction se regroupent sous l'acronyme BIM, pour *Building Information Modelling*. Cette section a pour objet de présenter les travaux de ces deux communautés.

#### Standards du PLM et du BIM

De nombreuses initiatives essaient de lister les différents travaux normatifs autour du PLM, mais il est en général difficile d'avoir un panorama clair et exhaustif des standards en vigueur. Un rapport récent du NIST<sup>2</sup> (Lu, Morris et Frechette, 2016) présente l'ensemble des standards actuels pour les systèmes de production intelligents, en les plaçant dans un écosystème cohérent, prenant en compte les 3 dimensions d'un système intelligent de production, à savoir le cycle de vie des produits fabriqués, le cycle de vie du système de production qui les fabrique, ainsi que le cycle de vie de la chaîne logistique qui soutient/intègre le système de production. Outre la description des standards, cet écosystème permet de mieux se représenter les relations

<sup>2</sup> NIST: National Institute of Standards and Technology

existantes entre ces différents cycles de vie. Ce document, extrêmement complet, permet d'évaluer le nombre important de ces standards.

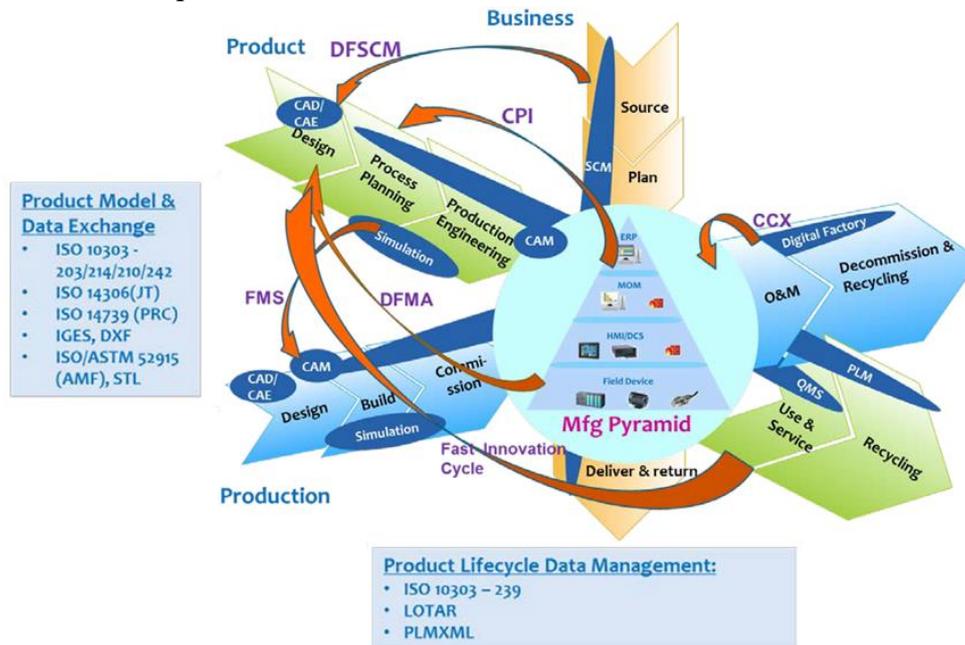


Figure 17. Standards pour les systèmes intelligents de production<sup>3</sup>

Sur l'axe produit (« Product ») se situent les standards pour l'échange des données produit, listés Table 2. On y retrouve des normes très utilisées telles que STEP ISO 10303 (Pratt, 2005), IGES (Association et others, 1996) ou STL (Wan, 1999), permettant respectivement d'échanger des données géométriques volumiques (conception mécanique classique), surfaciques (surfaces de style, reconception) et des maillages triangulaires (prototypage rapide, impression 3D).

Table 2. Standards d'échange de données produit

Standards	Description
ISO 10303 - 203/214/210/212/242	203: Configuration controlled 3D designs of mechanical parts and assemblies – aerospace and defense 214: Core data for automotive mechanical design processes 210: CAD systems for printed circuit board 212: CAD systems for electrical installation and cable harness 242: specifies the application protocol for Managed model based 3d engineering.
ISO 14306(JT)	A CAD file format described in ISO 14306:2012 is used primarily in industrial use cases as the means for capturing and repurposing lightweight 3D product definition data.
ISO 14739(PRC)	Document management -- 3D use of Product Representation Compact (PRC) format
IGES	An ASCII-based exchange format adopted by the American National Standards Institute (ANSI) since 1976. All meaningful development of IGES stopped in 1996 at version 5.3.
STL	A de-facto file format describe only the surface geometry of a three-dimensional object for additive manufacturing.
ISO/ASTM 52915 (AMF)	A new and open XML based standard developed as a replacement for STL format. AMF has many additional features compared to the STL format, including curved patches, recursive subdivision, multiple materials, graded materials, internal structures, material properties, colors, graphics, constellations, and metadata support.

<sup>3</sup> Significations des acronymes: *SCM* : Supply Chain Management, *DFSCM* : Design For Supply Chain Management, *CPI* : Continuous Process Improvement, *CCX* : Continuous Commissioning, *DFMA* : Design For Manufacturing and Assembly, *FMS* : Flexible Manufacturing System.

On y voit aussi apparaître des standards de gestion des données du cycle de vie comme ISO 10303 AP 239 (aussi connu comme PLCS pour Product Life Cycle Support) et PLM XML. En sus de ces standards, le B2MML est aussi un standard d'intérêt pour nos travaux, car il permet l'intégration entre les systèmes ERP et PDM.

(Terzi *et al.*, 2010), en se basant sur (Rachuri *et al.*, 2008), propose une cartographie 2D des standards existants. L'axe des abscisses représente les phases du cycle de vie alors que l'axe des ordonnées s'intéresse au triptyque Produit/Processus/Organisation (Services). Ce graphe permet de distinguer les chevauchements entre standards appartenant à d'autres cycles de vie selon (Lu, Morris et Frechette, 2016), mais en recouvrement avec les standards permettant de décrire les données produit.

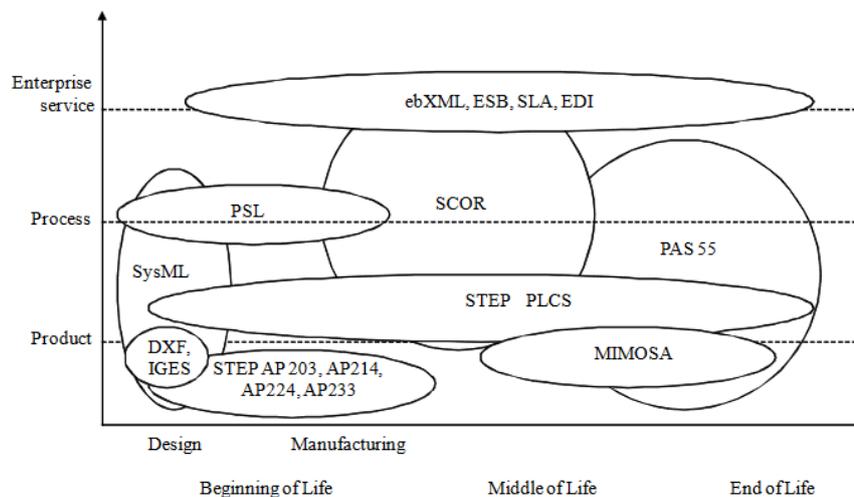


Figure 18. Cartographie 2D des standards du PLM (Terzi *et al.*, 2010)

La modélisation des données du bâtiment (BIM) a débuté en recherche dans les années 1980 (Eastman, 1975). Cependant, la normalisation en terme d'échanges de données dans le BIM est arrivée plus récemment : le standard COBie (pour *Construction Operations Building information exchange*) a été proposé en 2007 (East, 2007) et publié en 2011. La norme d'échanges de données dans le BIM, l'ISO 16739 (ISO, 2013) n'a été publiée qu'en 2013. Cette norme aussi appelée *IFC* (pour *Industry Foundation Classes*) a pour objectif d'assurer l'interopérabilité entre les différents logiciels de la maquette numérique. Basée sur la norme STEP ISO 10303 pour la description des formes géométriques, elle intègre notamment une couche spécifique adaptée aux métiers de la construction proposant un ensemble d'objets standards constitutifs du bâtiment physique, ayant une sémantique pour les acteurs de la construction. Contrairement aux formats tels que le DXF (Autodesk, 2010) ou le DWG (Alliance, 2014), issus du PLM et déjà utilisés en construction, l'IFC est basée sur une modélisation « d'objets métier », permettant d'identifier de manière unique chaque élément du bâtiment et de les associer sous la forme d'un graphe.

### 3.2.2 Ontologies présentes dans la littérature du PLM et du BIM

Les années 2000 ont vu l'émergence, le développement et l'adoption des technologies du « web sémantique ». Parmi celles-ci, les ontologies constituent un moyen de représenter de manière

formelle les connaissances. (Gruber, 1993) définit une ontologie comme « une spécification explicite d'une conceptualisation ». (Borst, 1997) spécifie plus en détails une ontologie comme « une spécification formelle d'une conceptualisation partagée », « formelle » signifiant que cette représentation doit être compréhensible par une machine et « partagée » que l'information contenue dans l'ontologie peut venir de différentes sources.

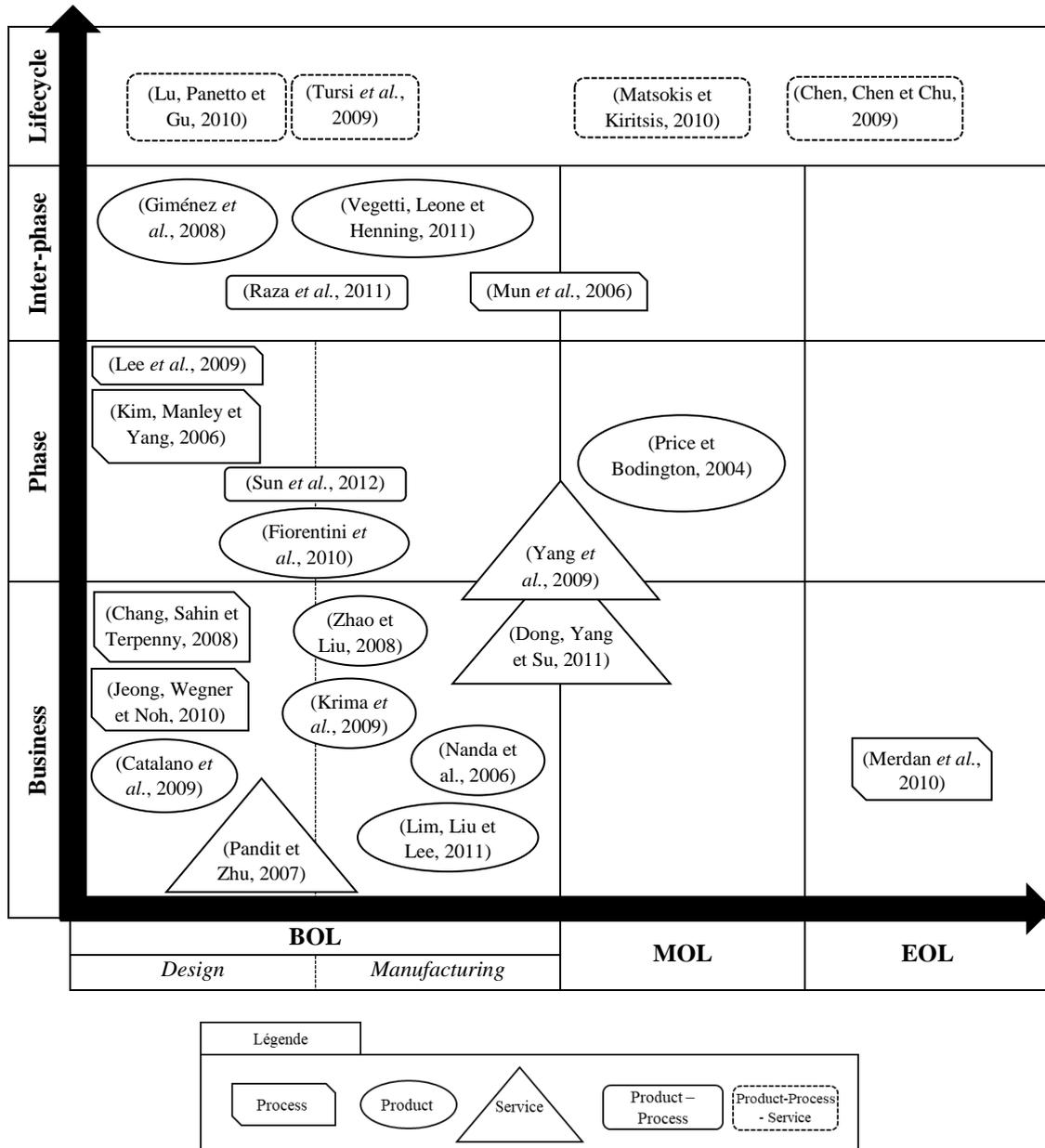


Figure 19. Classification de l'utilisation des ontologies PLM (Fortineau, Paviot et Lamouri, 2013)

Le diagramme issu de (Fortineau, Paviot et Lamouri, 2013) permet d'avoir une vue d'ensemble des différents types d'ontologies proposées dans la littérature, placées sur deux axes, l'axe des abscisses représentant les diverses phases du cycle de vie (BOL/MOL/EOL) et l'axe des ordonnées l'échelle du modèle proposé (figure 19). Le niveau *Business* signifie que l'ontologie est dédiée à une tâche spécifique sans considérer les autres domaines de la phase considérée alors que le niveau *Phase* est relatif aux ontologies gérant une phase complète. Le niveau *Inter-*

*phase* permet de distinguer les ontologies englobant plusieurs phases, et le niveau *Lifecycle*, celles ayant pour objectif de gérer l'ensemble des phases. Chaque contribution possède une forme relative au domaine qu'elle propose de modéliser. Dans le domaine des ontologies relatives au produit, on peut citer :

- OntoSTEP (Krima *et al.*, 2009), qui est une traduction de l'AP 203 et de la Part 21 de STEP depuis le format EXPRESS vers OWL (Web Ontology Language) ;
- OntoPDM (Tursi *et al.*, 2009), dont l'objectif est de définir une ontologie support à l'interopérabilité entre les systèmes ERP/MES/PDM ;
- PRONTO (Giménez *et al.*, 2008; Vegetti, Leone et Henning, 2011) définit une ontologie relative au produit complexe et décrit plus spécifiquement la nomenclature du produit ;
- Semantic Object Model (SOM) (Matsokis et Kiritsis, 2010) est une ontologie de plus haut niveau permettant de capitaliser l'évolution du produit tout au long de son cycle de vie.

Malgré le grand nombre d'ontologies publiées, les ontologies issues de la communauté PLM souffrent d'un manque de standardisation (El Kadiri et Kiritsis, 2015). Cependant, dans le monde du BIM, l'ontologie IfcOwl (Pauwels et Terkaj, 2016; Pauwels *et al.*, 2017), transcription de l'IFC sous forme d'ontologie, est en cours d'évaluation et devrait être normalisée prochainement. De plus, Building Smart propose les outils de transcription de l'intégralité de la norme IFC vers IfcOwl.

### 3.2.3 Conclusions sur la 1<sup>ère</sup> partie de l'état de l'art

Cette 1<sup>ère</sup> partie de l'état de l'art a permis de lister les différents modèles et ontologies permettant d'échanger des données du produit, tout au long de son cycle de vie. La matière communicante étant amenée à évoluer dans un contexte multi-métiers, multi-acteurs, inter-phase, nous avons choisi de considérer que l'interopérabilité sémantique de la matière communicante se limiterait à de l'unification. En ce sens, les modèles de données utilisés seront soit des standards (principalement B2MML et IFC), soit des ontologies en passe d'être standardisées (telles que IfcOwl) afin de pouvoir utiliser le mécanisme d'inférence ontologique, surtout dans le cadre de la synchronisation des données (voir section 3.5).

## 3.3 SELECTION DE DONNEES

---

La 1<sup>ère</sup> partie de l'état de l'art a permis de définir les modèles de données que nous allons utiliser par la suite. Il est maintenant nécessaire de déterminer comment les données vont être sélectionnées depuis le système d'information. Une fois sélectionnées, les données seront alors distribuées dans la matière communicante, ce qui fera l'objet de la section suivante. Plusieurs raisons peuvent justifier le fait que ce processus soit automatique : 1) le choix des informations est fonction du produit, et peut être complètement différent à chaque fois, 2) la sélection de ces informations peut dépendre de nombreux critères. Par exemple, le fait de savoir qu'une information est publiable ou non pour un produit donné est hautement contextuelle, 3) la recherche manuelle de ces informations prendrait un temps important, non compatible avec les caractéristiques d'un système de production.

### 3.3.1 Principes de distribution des informations

Afin de procéder à la sélection des données, nos travaux se sont inspirés de ceux issus de la communauté informatique traitant des bases de données distribuées. La thèse de S. Kubler [Thèse2] présente un état de l'art des méthodes de sélection de données dans les systèmes distribués. Nous en présentons ici une synthèse rapide permettant de comprendre les principes et les fondements de la distribution de l'information, en partant d'une taxonomie générale présentée figure 20, qui sert de base pour classer les travaux de la littérature.

Dans le contexte des bases de données distribuées, le terme « distribution » est utilisé pour regrouper deux processus que sont :

- La *fragmentation* : première étape dont l'objet est de subdiviser les tables du modèle physique de données en éléments simples appelés *fragments* ;
- L'*allocation* : deuxième étape qui consiste à allouer les fragments de données résultants à l'ensemble des sites composant le système d'information.

Notre objectif est de l'adapter à notre cas d'étude pour réaliser la sélection des données à mettre dans la matière communicante.

La taxonomie des travaux en distribution de données se compose de deux branches principales liées respectivement à la phase de fragmentation et à la phase d'allocation des données. Ces deux phases peuvent être soit *statiques* soit *dynamiques*. Une fragmentation ou une allocation statique signifie que le schéma de découpage des données n'est jamais amené à évoluer au cours du temps. En effet, le résultat de ces opérations n'est jamais remis en cause, ce qui s'avère problématique lorsque les caractéristiques de l'application évoluent fortement (p. ex. nombre de requêtes exécutées). Les approches dynamiques permettent de solutionner ce problème en réalisant une nouvelle fragmentation ou une réallocation des fragments de données lorsque cela est nécessaire. La taxonomie montre que trois types de fragmentation existent : *verticale* (V), *horizontale* (H) et *hybride/mixte* (M), et qu'il est possible d'effectuer un chevauchement d'attributs ou de tuples, appelé *overlapping*. Les trois types de fragmentation et la notion d'*overlapping* sont introduits par la suite. On remarque également que l'allocation de fragments de données peut se faire avec ou sans réplifications. Dans le cas où une réplification est mise en oeuvre, plusieurs mécanismes peuvent être implémentés pour assurer la cohérence et la disponibilité des données. Il s'agit des mécanismes *Synchrone* (S), *Asynchrone* (As), *Primary Copy* (Pc) et *Update Everywhere* (Ue).

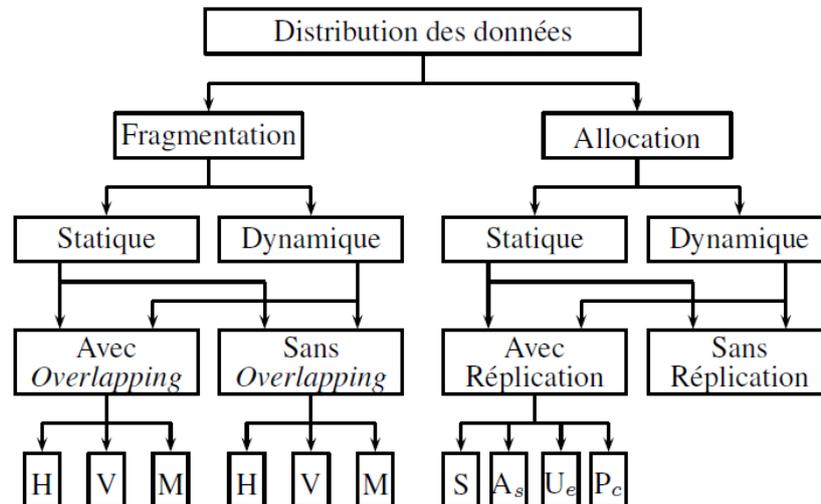


Figure 20. Taxonomie de distribution de l'information

### Etape de fragmentation

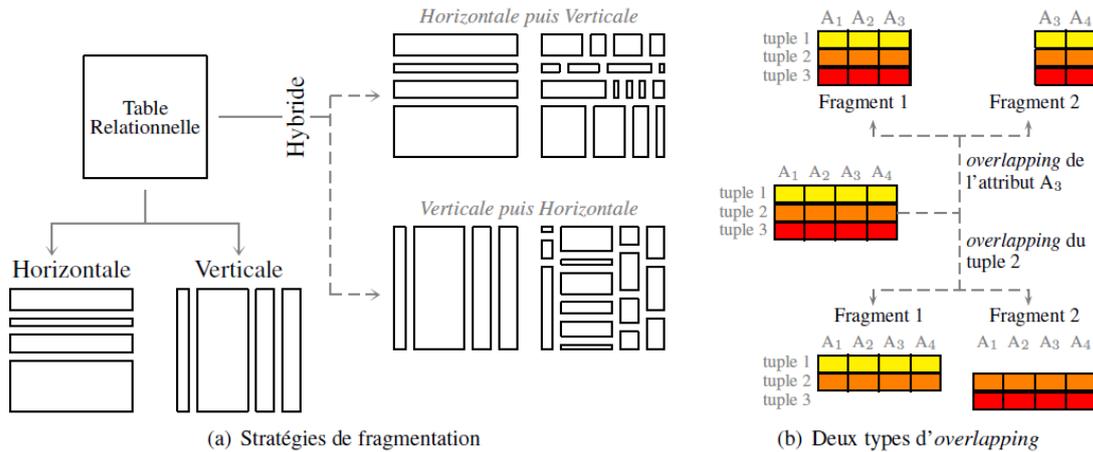
L'étape de fragmentation des données consiste à diviser puis regrouper des données issues d'une table, aussi appelée « *relation* ». Les attributs de la table correspondent aux colonnes, les lignes sont appelées des « *tuples* » ou « *instances* » de la relation et l'intersection entre une ligne et une colonne correspond à une cellule de la table, appelée également « *data item* » en termes anglo-saxon (figure 21).

Nom de la relation/table ↘	Attribut 1	Attribut 2	Attribut 3
VOITURE	Marque	Couleur	N° d'immatriculation
tuple/instance 1 →	Audi	Argent	AC 369 FF
tuple/instance 2 →	Renault	Rouge	BE 934 YY
tuple/instance 3 →	Volvo	Blanc	DD 101 AC
tuple/instance 4 →	Toyota	Noir	RU 888 CY

┌─┐ Data item de l'intersection du tuple 3 et de l'attribut 2, dont le contenu est « Blanc »

Figure 21. Exemple de relation

La fragmentation verticale (*V*) consiste à fragmenter les attributs d'une relation. La fragmentation horizontale (*H*) consiste à fragmenter un grand nombre d'instances en sous-ensembles disjoints (c.-à-d., à grouper les tuples d'une relation). Enfin, la fragmentation hybride/mixte (*M*) divise dans un premier temps les relations horizontalement, puis chaque fragment obtenu est divisé à son tour de manière verticale ou vice-versa (figure 22 (a)). La fragmentation verticale est généralement utilisée durant la phase de conception de la base de données (Navathe *et al.*, 1984) et par conséquent, est plus appropriée aux phases dites statiques. À l'inverse, la fragmentation horizontale est plus appropriée pour les mécanismes dynamiques. Dans les deux types de fragmentation, il est possible de réaliser de l'*overlapping* : *overlapping* d'attributs dans le cadre de la fragmentation verticale et *overlapping* de tuples dans le cadre de la fragmentation horizontale. Par définition et comme introduit précédemment, on dit qu'il y a *overlapping* lorsque l'intersection de deux fragments n'est pas vide, comme illustré sur la figure 22.



**Figure 22. Stratégies de fragmentation et principe d'overlapping**

La table 3 positionne les travaux significatifs selon la taxonomie générale présentée dans la figure précédente. L'intitulé de chaque colonne correspond à un aspect précis de la taxonomie (branche dédiée à la fragmentation).

**Table 3. Travaux majeurs en fragmentation de bases de données**

	Fragmentation	Overlapping	Dynamique	Statique
(Navathe <i>et al.</i> , 1984)	V	✓		✓
(Apers, 1988)	M		✓	✓
(Navathe et Ra, 1989)	V	✓		✓
(Navathe, Karlapalem et Ra, 1995)	M	✓		✓
(Son et Kim, 2004)	V			✓
(Tamhankar et Ram, 1998)	M			✓
(Baião, Mattoso et Zaverucha, 2002)	M			✓
(Ezeife et Barker, 1998)	V			✓
(Bellatreche, Karlapalem et Simonet, 1997)	H			✓
(Chakravarthy <i>et al.</i> , 1994)	V			✓
(Hauglid, Ryeng et Nørvåg, 2010)	H		✓	
(Abuelyaman, 2008)	V			✓
(Sleit <i>et al.</i> , 2007)	M		✓	
(Khan et Hoque, 2010)	H			✓
(Fung, Karlapalem et Li, 2002)	V			✓
(Malinowski et Chakravarthy, 1997)	V			✓
(Darabant, Campan et Navroschi-Szasz, 2004)	H			✓
(Ezeife et Zheng, 1999)	H		✓	
(Pinto et Torres, 2002)	H	✓	✓	
(Adrian Runceanu, 2007)	M			✓

Pour réaliser la fragmentation, les différentes méthodes listées dans la table reposent sur l'optimisation de fonctions objectifs portant sur les critères suivants :

- Ensemble des attributs de la classe (fragmentation verticale) ;
- Affinités entre attributs ;
- Ensemble des tuples (fragmentation horizontale) ;
- Ensemble des méthodes de la classe (cas particulier des bases de données objets) ;
- Ensemble des requêtes de données (lecture/écriture) ou des transactions ;
- Fréquence de chaque requête ou transaction.

### Etape d'allocation

La phase d'allocation intervient à la suite de la fragmentation. Elle a pour but d'établir l'assignation optimale des fragments de données sur les différents sites composant l'architecture informatique. La figure 23 illustre l'assignation de 4 fragments de données verticaux sur différents sites. Certains sites disposent de fragments (*PC portable*, *Serveur 1*, *PC2*, *Serveur 2*) et d'autres non (*PDA*, *PC1*).

Habituellement, les méthodes tendent à assigner les fragments aux sites y accédant le plus afin de réduire les coûts de communication.

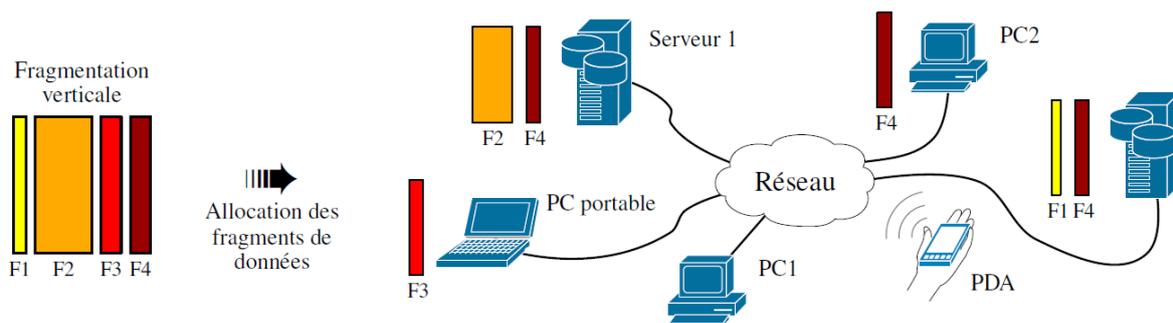


Figure 23. Exemple d'allocation des fragments de données

### Note sur la réplication des fragments

Lors de l'étape d'allocation, il est possible de répliquer un même fragment sur plusieurs sites comme illustré sur la figure 23 (le fragment *F4* est répliqué sur *Serveur 1*, *PC2* et *Serveur 2*). Ceci permet de garantir la fiabilité du système, mais également d'optimiser ses performances (Padmanabhan *et al.*, 2008) (p. ex., réduction du trafic sur le réseau, gain de temps pour les utilisateurs). Cependant, la réplication des données nécessite des mécanismes gérant à la fois la diffusion des modifications (c.-à-d. les mises à jour des répliques) et les règles d'accès aux informations (autoriser un site ou un groupe de sites à modifier des répliques). Les informations et les attentes applicatives influent fortement sur les mécanismes à mettre en œuvre. L'identification du mécanisme de réplication le plus approprié dépend de deux facteurs :

- *Quand est-ce que les mises à jour doivent être propagées ?* Deux modes existent :
  - *Mode Synchrone (S)* : il est nécessaire d'avertir et de recevoir l'acquittement de l'ensemble des sites avant d'effectuer une modification d'un fragment de données ;
  - *Mode Asynchrone (As)* : il permet de réaliser des modifications localement, sans en avertir ses pairs.
- *Où est-ce que les mises à jour doivent être effectuées ?* Deux principes existent :

- Principe de la *Copie Primaire* (Primary copy - Pc) : il n'autorise qu'un seul site à effectuer la modification du fragment,
- Principe de la *mise à jour par « tout le monde »* (Update everywhere - Ue) : il autorise un groupe de sites à effectuer des mises à jour sur le fragment.

La Table 4 présente une classification des travaux traitant des mécanismes d'allocation. Chaque intitulé de colonne correspond à un aspect particulier de la taxonomie et a été décrit dans la section 2.2. Notons que dans les colonnes intitulées « Allocation » et « Réplication », nous spécifions si la méthode d'allocation requiert une fragmentation particulière (H, V, M) et si la réplication repose sur un mode particulier (Pc, Ue, S, As). Si uniquement le symbole « ✓ » est précisé, cela signifie qu'aucune information n'a pu être extraite à ce sujet.

**Table 4. Travaux majeurs sur l'allocation de fragments**

	Fragmentation	Allocation	Réplication	Dynamique	Statique
(Apers, 1988)	M	M	✓	✓	✓
(Loukopoulos et Ahmad, 2004)		✓	Pc	✓	✓
(Huang et Chen, 2001)		M	Ue	✓	
(Ahmad <i>et al.</i> , 2002)		✓			✓
(Tamhankar et Ram, 1998)	M	M	Pc		✓
(Ulus et Uysal, 2003)		M		✓	
(Brunstrom, Leutenegger et Simha, 1995)		H		✓	
(Hauglid, Ryeng et Nørvåg, 2010)	H	H	Pc	✓	
(Singh et Kahlon, 2009)		✓		✓	
(Chin, 2002)		✓		✓	
(Hababeh, Bowring et Ramachandran, 2005)		✓	✓		✓
(Sleit <i>et al.</i> , 2007)	M	M	✓	✓	
(Blankinship, Hevner et Yao, 1991)		✓			✓
(Chaturvedi, Choubey et Roan, 1994)		M	✓	✓	
(Uysal et Ulus, 2007)		M		✓	
(Petrescu, 2010)		✓	Pc-Ac	✓	
(Grebla <i>et al.</i> , 2004)		H		✓	
(Tasharofi et Basseda, 2006)		✓		✓	
(Alavizadeh et Sabouri, 2006)		✓	Ue		✓

Comme dans le cas des méthodes de fragmentation, beaucoup de critères sont communs aux fonctions objectifs et aux algorithmes implémentés. Les principaux sont :

- L'ensemble des fragments/objets dans le système ;
- La taille de chaque fragment/objet ;
- L'ensemble de sites composants le système de bases de données (clients et serveurs) ;
- La capacité de stockage de chaque site ;
- L'ensemble des requêtes (lecture/écriture) ou des transactions ;

- La fréquence des requêtes ou des transactions ;
- Le coût associé aux requêtes de lecture/écriture ;
- Le coût de communication entre sites ;
- Le coût de stockage de chaque fragment de données sur chaque site.

Beaucoup de ces méthodes sont dédiées à des architectures fixes et sont utilisées pour la distribution de « grands » systèmes d'informations, où on ne considère généralement pas la présence de vecteurs d'informations mobiles tels que des ordinateurs portables, des téléphones mobiles ou encore la présence de produits/matières communicant(e)s. Par conséquent, la prochaine section s'intéresse aux solutions et mécanismes utilisés dans le cadre d'environnements mobiles. En effet, notre matière communicante soulève des problèmes particuliers comme sa capacité mémoire limitée, ou la perte de connexion au réseau qu'elle occasionne du fait de sa mobilité.

### 3.3.2 Travaux sur les environnements dits « mobiles »

Les équipements mobiles ont des ressources limitées comparativement aux équipements fixes (batterie plus limitée, puissance de calcul plus faible, bande passante plus faible). De plus, les communications entre les nœuds peuvent être interrompues du fait de leur mobilité. Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans la définition des méthodes de fragmentation et d'allocation des données. Par exemple, la réplication des données est primordiale au sein d'environnements mobiles afin de maintenir un niveau de disponibilité de l'information acceptable.

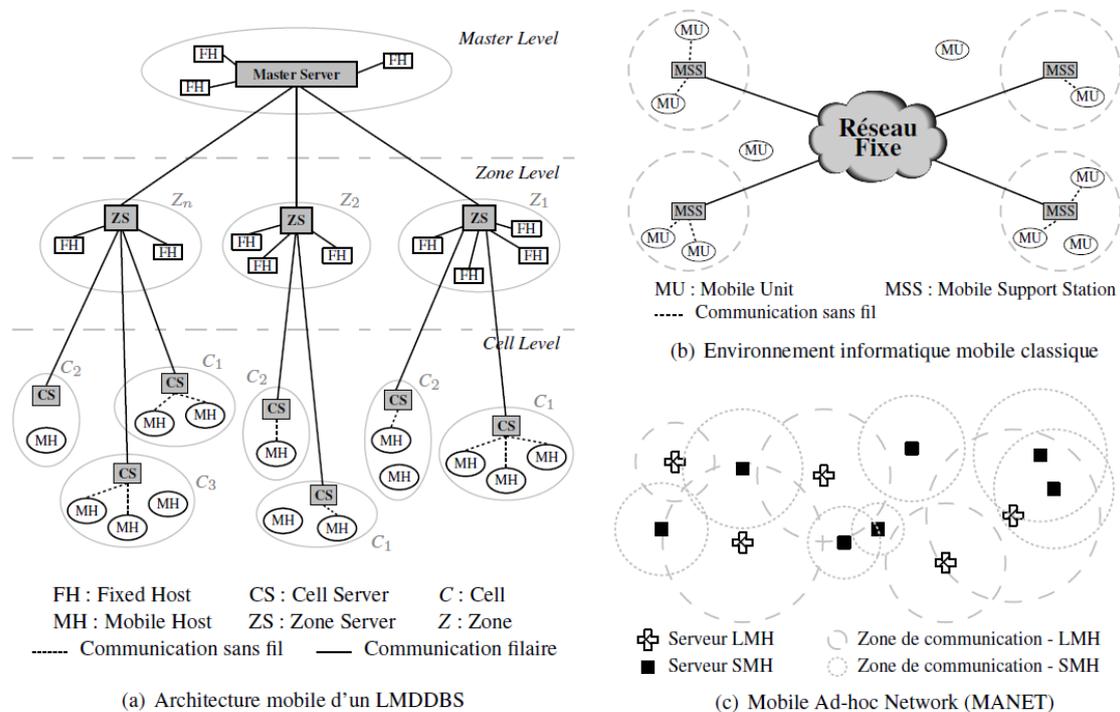


Figure 24. Types d'architectures de base de données en environnement mobile

### Architectures de bases de données distribuées en environnement mobile

Les équipements mobiles et fixes communiquent par l'intermédiaire d'une architecture réseau. Plusieurs types d'architectures ont été conçus et sont aujourd'hui utilisés pour la distribution des données.

(Madria, Mohania et Roddick, 1998; Barbará, 1999; Chan et Roddick, 2003; Moiz et Rajamani, 2009) proposent des environnements informatiques mobiles classiques qui reposent sur une architecture cellulaire similaire à celle utilisée dans les réseaux GSM (figure 24(b)). Elle se compose de stations de supports mobiles (*MSS* - Mobile Support Station) et d'unités mobiles (*MU* - Mobile Unit). Les *MSS* sont des équipements stationnaires responsables d'une aire géographique appelée cellule et sont connectés entre eux via un réseau filaire. Le *MU* est un équipement mobile qui peut passer d'une cellule à une autre et qui communique sans fil avec les *MSS*.

On retrouve également, comme type d'architecture, les *LMDDBS* (Large scale Mobile Distributed DataBase System) qui se caractérisent par un grand nombre de répliques de fragments de données (jusqu'à des milliers de répliques) et par un grand nombre de mises à jour. Ces répliques sont distribuées à la fois sur des zones mobiles et fixes. (Ashraf *et al.*, 2010) proposent une nouvelle stratégie de réplication des données basée sur une architecture réseau hiérarchisée, comme illustrée sur la figure 24(a). Ils divisent les répliques en trois niveaux (*Master level*, *Zone level*, *Cell level*) afin de fournir une plus grande flexibilité de distribution des répliques sur de vastes zones et afin d'augmenter la disponibilité des informations.

Table 5. Méthodes de distribution destinées aux environnements mobiles

	Fragmentation	Allocation/ Réplication	Dynamique	Statique	Type de nœud	Capacité de stockage	Pertinence de l'info.
(Huang, Sistla et Wolfson, 1994)		✓	✓		M-F		
(Hara et Madria, 2006)		Pc-As	✓		M	✓	
(Bobineau <i>et al.</i> , 2000)			✓	✓	M-F	✓	✓
(Phatak et Badrinath, 1999)	H			✓	M-F		
(Chan et Roddick, 2003)		✓	✓	✓	M-F	✓	✓
(Lubinski et Heuer, 2000)		✓	✓		M-F	✓	✓
(Madria, Mohania et Roddick, 1998)				✓	M-F	✓	
(Pabmanabhan et Gruenwald, 2006)		Pc-As	✓		M	✓	
(Zabovsky, 2008)		✓	✓		M		
(Lubinski, 2000)		✓	✓	✓	M-F	✓	
(Ashraf <i>et al.</i> , 2010)		✓	✓		M-F		
(Moiz et Rajamani, 2009)		Pc-As		✓	M-F		

Un autre type d'architecture connu est le *MANET* (Mobile Ad-hoc NETWORK) qui est une collection de serveurs et de clients mobiles. Tous les nœuds sont sans fil, mobiles, à autonomie

limitée et peuvent être classés en fonction de leur capacité comme expliqué dans (Fife et Gruenwald, 2003). La figure 24(c) illustre un MANET dans lequel un client (ou Small Mobile Host – *SMH*) est un noeud muni de ressources de traitement, de stockage, de communication et de puissance limitées comparativement à un serveur (ou Large Mobile Host – *LMH*). Cette notion de puissance est représentée graphiquement sur la figure 24(c) par une zone circulaire autour de chaque équipement (zone dans laquelle sa transmission peut s'effectuer), laquelle varie en fonction de sa puissance. Habituellement, les serveurs *LMH* contiennent le système complet de gestion de la base de données et gèrent les requêtes clients. Les clients *SMH* n'ont pas suffisamment de ressources pour stocker le système complet, mais stockent généralement une partie de la base de données ainsi que certains modules de traitements (Pabmanabhan et Gruenwald, 2006).

### Travaux de distribution en environnement mobile

La Table 5 dénombre des travaux menés sur les bases de données distribuées mobiles. Trois nouveaux critères sont introduits dans cette classification en complément de ceux définis dans les tables précédentes :

- *Le type de noeud* : on spécifie si la méthode considère un environnement exclusivement mobile (*M*) ou hybride (c.-à-d., Mobile et Fixe : *M-F*),
- *La capacité de stockage* : on spécifie si la méthode tient compte de l'espace mémoire des équipements et/ou si une technique de réduction des données y est développée/utilisée (compression, agrégation des données, etc.),
- *La pertinence de l'information* : elle traduit l'aspect lié à la sémantique de l'information, à savoir si la méthode intègre l'objectif de l'usage de l'information dans la sélection/distribution des données. Ce critère est particulièrement important dans le cadre d'applications où la capacité est critique.

La notion de pertinence de l'information est introduite par (Lubinski, 2000). Dans ce papier, un cadre est présenté pour le choix du protocole de réplication à mettre en œuvre. Des stratégies de réplication « pessimiste » et « optimiste » sont présentées, ainsi qu'un modèle triparti reflétant les critères incontournables pour le choix du protocole, à savoir : la cohérence des informations, la disponibilité des informations et la minimisation des coûts de communication, qui conduisent vers un compromis à établir. Ces travaux soulignent l'influence importante de la « pertinence de l'information » sur le choix du mécanisme de réplication à mettre en œuvre, pertinence étant définie à partir des besoins des utilisateurs. Deux exemples sont fournis par (Lubinski and Heuer, 2000) :

- *Application santé* (cas 1, figure 25) : en milieu hospitalier, les docteurs et infirmières traitent un grand nombre de patients et les informations médicales sont de grandes importances. Par conséquent, la cohérence des informations est de priorité majeure. Ceci peut être respecté uniquement en réduisant la disponibilité (peu de répliques engendre moins d'incohérences) et/ou en s'assurant que les propagations des modifications soient effectuées de manière immédiate, ce qui augmente les coûts de communication. Ce compromis est illustré par la position 1 dans le triangle figure 25. Bien entendu, cette position varie en fonction des niveaux de disponibilité et de cohérence attendus ;

- *Guide touristique* (cas 2, figure 25) : considérons un guide touristique disponible sur téléphone mobile. Les touristes requièrent essentiellement des informations liées aux sites géographiques. De telles informations ne sont pas amenées à changer fréquemment, mais lorsqu'elles le sont, les coûts de communications sont significatifs. Bien entendu, la disponibilité est essentielle comme le traduit la position 2 figure 25.

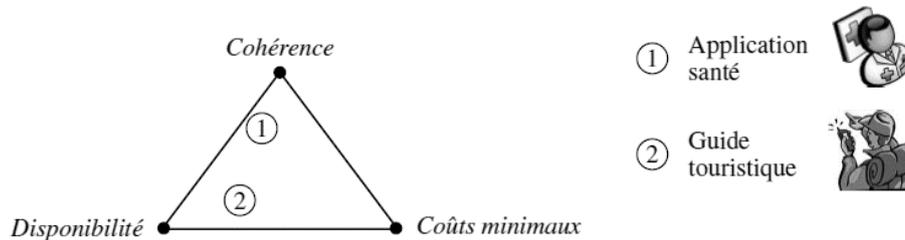


Figure 25. Différents compromis en fonction de la pertinence de l'information

(Lubinski, 2000) propose donc une méthode de réduction graduelle des données qui tient compte de la localisation des données (proches ou lointaines de l'utilisateur). En fonction de cette localisation, la méthode décide de transmettre des informations plus ou moins complètes à l'utilisateur en fonction de leur pertinence.

(Chan et Roddick, 2003) considèrent trois modes de communication : i) mode « connexion complète », ii) mode « déconnecté » iii) mode « connexion partielle ou faible ». Pour chaque mode, ils développent un processus de réduction des données qui dépend de la localisation des équipements mobiles, ainsi que des informations pertinentes pour l'utilisateur. Cette approche est intéressante dans le sens où elle tente de faire correspondre le contexte avec les données et ce, afin de sélectionner des informations les plus pertinentes en regard du contexte (*context-sensitive information*). Cette approche permet de tenir compte d'une multitude de critères tels que les contraintes liées à l'environnement de la base de données mobile, des utilisateurs, des attentes des acteurs du cycle de vie et permet ainsi de sélectionner des informations sensibles et pertinentes au contexte d'usage, qui sont ensuite répliquées sur la base de données mobile.

### 3.3.3 Conclusions sur la 2<sup>ème</sup> partie de l'état de l'art

Cette 2<sup>ème</sup> partie de l'état de l'art a permis de lister les travaux issus de la communauté base de données distribuées traitant de la distribution de données. Après avoir présenté les concepts de fragmentation, d'allocation et de réplication, nous avons listé les approches existantes dans les environnements mobiles. A la lumière de ces travaux, nous considérons que l'ensemble constitué par les systèmes d'information et les matières communicantes en interaction peut être considéré comme un environnement hybride simple (de type *LMDDBS* ou *MSS-MU*), où les différents systèmes d'information seraient des nœuds fixes (connectés entre eux ou non) et les matières communicantes des nœuds mobiles à capacité limitée.

Pour sélectionner les données pertinentes à mettre dans la matière communicante, nous proposons d'adopter une approche de type réduction des données s'appuyant sur le contexte. En ce sens, l'utilisation des travaux de (Chan et Roddick, 2003) nous semble être très pertinente, à ceci près qu'aucune méthode de réglage des différents facteurs impactant le choix des fragments n'est proposée dans ces travaux.

## 3.4 DISTRIBUTION DES DONNEES

---

La sélection de données conduit à un sous-ensemble de fragments. Dans notre processus, ces fragments doivent alors être distribués dans la matière communicante. Attention : Ici, le terme *distribution* réfère à la dissémination dans la matière des fragments de données issus du système d'information et reçus par la matière.

Bien que le concept de matière communicante soit innovant et préconise de considérer toute la matière comme communicante de façon continue, il n'est pas encore possible technologiquement de disséminer de la donnée sur la matière communicante sans l'aide d'éléments « discrets » de types infotroniques. Nos différents prototypes ou simulations ont été bâtis en utilisant deux types d'éléments infotroniques :

- Les *puces RFID* : dans le cadre de la thèse de S. Kubler [**Thèse2**], plusieurs dizaines de puces RFID passives par m<sup>2</sup> sont embarquées dans la matière. Dans ce cas, la lecture ou l'écriture est complètement gérée par l'environnement extérieur, avec une architecture de communication comportant un ou plusieurs lecteurs RFID. On lui donnera alors le nom de *matière passive* ;
- Les *réseaux de micro-capteurs sans fil* : dans le cadre de la thèse de K. Mekki [**Thèse3**], la matière est infiltrée par des dizaines de micro-nœuds de capteur sans fil, qui auront la capacité de recevoir de l'information depuis l'extérieur, d'en générer depuis l'intérieur de la matière, d'en émettre si nécessaire. Dans ce cas, on qualifie la matière de *matière active*.

La matière active présente donc des caractéristiques très différentes de la matière passive : en effet, les micro-nœuds de capteur sans fil qu'elle contient forment un réseau capable de stocker les données reçues, de les disséminer dans la matière de manière complètement autonome, et de les reconstruire pour répondre à des requêtes de lecture. On parle alors d'« *In-Network Data Storage* ». Il faut néanmoins prendre garde à la consommation énergétique des protocoles mis en œuvre dans le réseau, afin d'optimiser sa durée de vie.

La suite du document présente une courte introduction aux réseaux de capteurs sans fil, suivie d'une synthèse des protocoles existants de lecture/écriture en « *In-Network Data Storage* ».

### 3.4.1 Présentation des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent composés d'un nombre très important de nœuds. Ces nœuds sont des entités capables d'opérer en toute autonomie afin de collecter, traiter et envoyer des données relatives à leur environnement. Déployés de façon à couvrir un territoire donné, les capteurs communiquent par voie radio afin de concentrer l'information sur une station collectrice située au cœur ou en bordure du territoire, appelée « nœud puits ». Ces entités doivent être équipées d'une batterie qui est une source d'énergie non durable, ce qui représente la contrainte la plus gênante pour la survie de tels réseaux.

Les nœuds de capteurs sont habituellement dispersés dans un champ à surveiller. Ils forment ainsi un réseau sans fil multi-sauts (un saut étant l'action de passer d'un nœud vers un autre situé dans son voisinage atteignable avec sa puissance d'émission). Chaque nœud a pour

mission la collection des données et leurs routages vers le nœud puits. A son tour, le nœud puits transmet les informations reçues à l'utilisateur final à travers un réseau local (par exemple Ethernet, l'Internet ou un satellite). Les architectures dans les réseaux de capteurs dépendent des applications et des techniques utilisées pour faire acheminer l'information des capteurs au nœud puits (Akyildiz *et al.*, 2002). Le processus d'acheminement de l'information des capteurs au nœud puits peut prendre quatre formes. Dans les architectures à plat, les capteurs peuvent communiquer directement avec le puits en utilisant une forte puissance de transmission radio (figure 26(a)) ou via un mode multi-sauts avec des puissances très faibles (figure 26 (b)) alors que dans les architectures hiérarchisées, le nœud chef de cluster transmet directement les données au puits (figure 26 (c)) ou via un mode multi-sauts entre les chefs des clusters (figure 26 (d)).

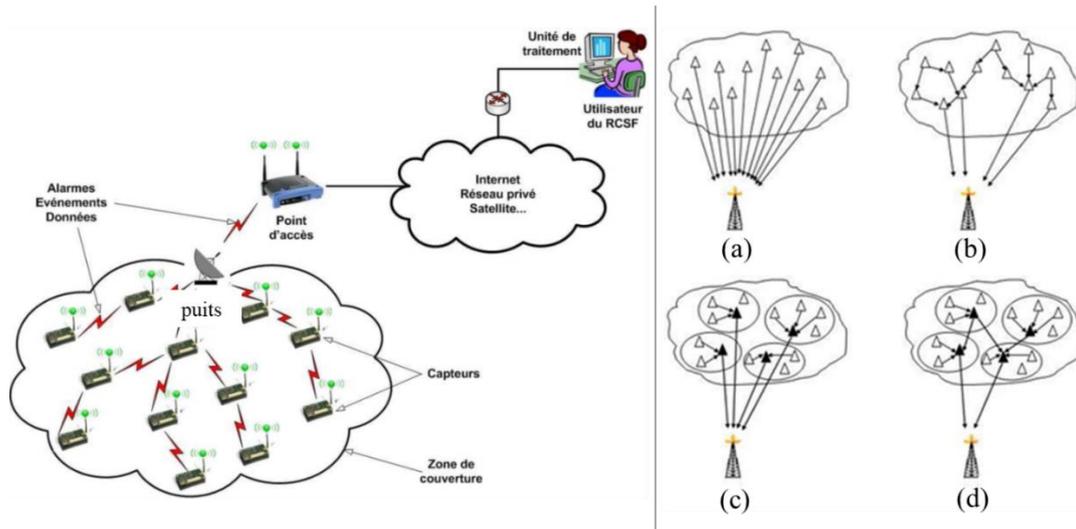


Figure 26. Architecture de réseaux de capteurs

Les sections suivantes présentent une synthèse rapide des protocoles d'écriture (section 3.4.2) et de lecture (section 3.4.3) dans les réseaux de capteurs sans fil. Une description plus complète de l'ensemble de ces protocoles est disponible dans [Thèse3].

### 3.4.2 Protocoles de stockage de données

Les protocoles de stockage et répliquion des données dans les réseaux de capteurs sans fils ont été développés principalement dans la littérature pour la gestion des nœuds puits étant mobiles (Tunca *et al.*, 2014). Ils sont listés sur la figure 27.

Il existe deux approches principales : *réactive* et *proactive*. Dans l'approche réactive, les nœuds réagissent à un événement en diffusant les données vers les nœuds qui sont situés à proximité des positions de l'événement. Ces approches sont basées sur la connaissance des positions du puits et des nœuds dans le réseau de capteurs. Les protocoles tels que ALURP (Wang *et al.*, 2009), QBDCS (Cheng *et al.*, 2009), BPPDD (Liu, Huang et Zhang, 2007) et MobiQuery (Lu *et al.*, 2005) appartiennent à cette catégorie.

Dans l'approche proactive, les nœuds distribuent leurs données vers tous les nœuds ou vers un sous-ensemble des nœuds qui ont le rôle d'unité de stockage, en prévision des futurs événements. L'approche proactive est divisée en stratégies *structurées* et *non structurées* comme illustré sur la figure 27. Dans la première catégorie de stratégie, les nœuds de stockage

forment généralement une structure virtuelle (grille, ligne, rail, etc. comme indiqué figure 28) dans le réseau de capteurs, les données pouvant être ensuite récupérées en envoyant une requête de lecture vers la structure de stockage. Pour les stratégies non structurées, les données sont stockées dans tout le réseau. Dans ce dernier cas, la façon de distribuer les données dans le réseau détermine si l'information est stockée uniformément ou non.

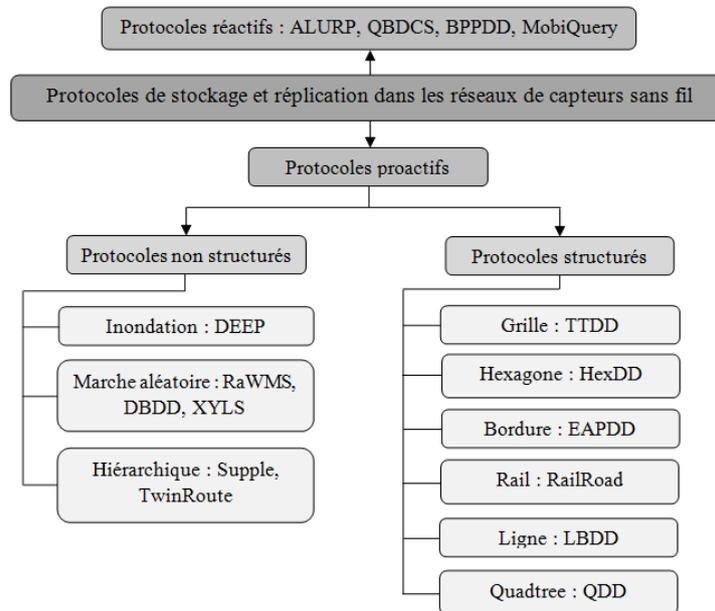


Figure 27 .Classification des protocoles de stockage de données dans les réseaux de capteurs sans fil

### Protocoles proactifs structurés

En approches proactives structurées, les nœuds forment généralement une structure de stockage virtuelle (grille, ligne, rail, etc.) comme expliqué précédemment. Lors de réception de nouvelles données, le nœud de capteurs renvoie les données reçues vers des nœuds particuliers appelés *points d'agrégation*. Ces points d'agrégation stockent la donnée en attendant de recevoir une requête de lecture.

### Protocoles non structurés

Les protocoles non structurés utilisent des processus aléatoires pour réaliser la distribution d'informations. Par exemple, DEEP (Density-based proactive data dissemination Protocol – (Vecchio *et al.*, 2010)) est un protocole de distribution basé sur la densité de déploiement de l'information dans le réseau de capteurs sans fil. Son but est d'obtenir une distribution uniforme de données avec un taux de communication réduit, afin de permettre à un nœud puits mobile se déplaçant dans le réseau de rapidement récupérer l'information concernant l'ensemble du réseau complet.

Pour ce faire, il combine l'algorithme d'inondation probabiliste RAPID (Drabkin *et al.*, 2007) avec une solution de stockage probabiliste : lors de la 1<sup>ère</sup> réception d'un message  $m$ , le nœud  $i$  stocke  $m$  avec une probabilité  $ps$ , qui dépend de la taille souhaitée de la vue partielle du nœud, La vue partielle correspondant à la quantité d'informations stockées dans un nœud, provenant d'autres nœuds les ayant disséminées dans le réseau. La table 6 présente l'ensemble des protocoles de stockage de la littérature.

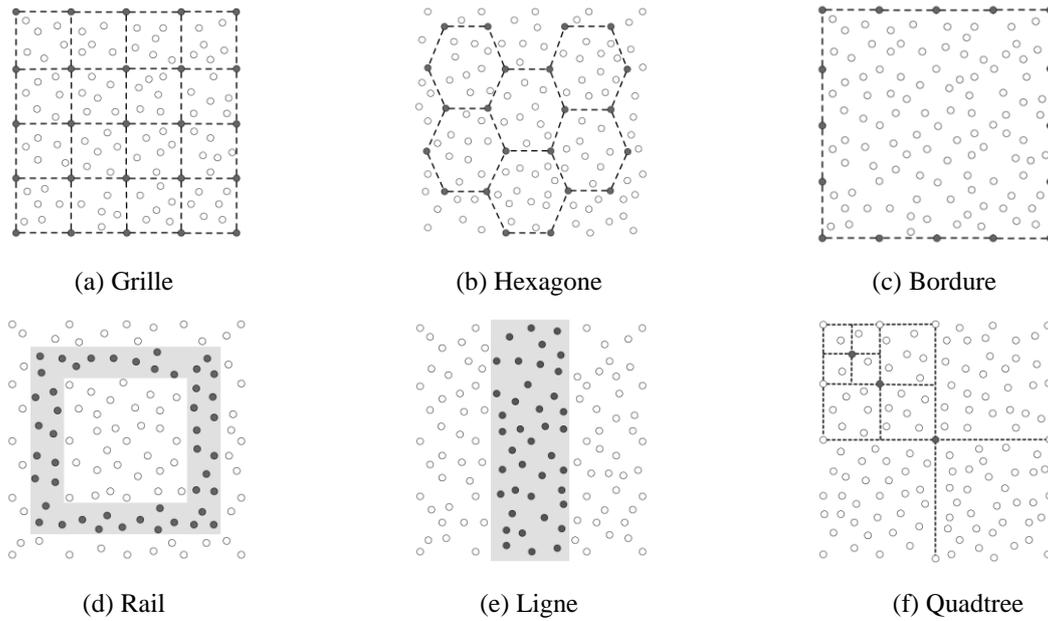


Figure 28. Stratégies de stockage proactif structuré dans les réseaux de capteurs sans fil

Table 6. Protocoles de stockage d'informations dans les réseaux de capteurs sans fil

Protocoles de stockage	Réactif	Proactif	Structuré	Non-structuré	Stockage probabiliste	Stockage par compteur de sauts	Stockage déterministe	Uniformité de réplication	Localisation géographique	Distance entre les nœuds	Hierarchique
<b>ALURP</b> (Wang <i>et al.</i> , 2009)	✓						✓	✓			
<b>QBDCS</b> (Cheng <i>et al.</i> , 2009)	✓						✓	✓			
<b>BPPDD</b> (Liu, Huang et Zhang, 2007)	✓						✓	✓			
<b>MobiQuery</b> (Lu <i>et al.</i> , 2005)	✓						✓				✓
<b>TTDD</b> (Luo <i>et al.</i> , 2005)		✓	✓				✓	✓	✓		
<b>HexDD</b> (Erman, Dilo et Havinga, 2012)		✓	✓				✓	✓	✓		
<b>EAPDD</b> (Doss <i>et al.</i> , 2010)		✓	✓				✓	✓			
<b>RailRoad</b> (Shin <i>et al.</i> , 2005)		✓	✓				✓	✓	✓		
<b>LBDD</b> (Hamida et Chelius, 2008)		✓	✓				✓	✓	✓		
<b>QDD</b> (Mir et Ko, 2007)		✓	✓				✓	✓	✓		
<b>DEEP</b> (Vecchio <i>et al.</i> , 2010)		✓		✓	✓			✓			
<b>RaWMS</b> (Bar-Yossef, Friedman et Kliot, 2008)		✓		✓		✓		✓			
<b>DBDD</b> (Shi <i>et al.</i> , 2012)		✓		✓		✓				✓	
<b>XYLS</b> (Das, Pucha et Charlie Hu, 2005)		✓		✓			✓		✓		
<b>Supple</b> (Carneiro Viana <i>et al.</i> , 2010)		✓		✓	✓			✓			✓
<b>ProFlex</b> (Maia <i>et al.</i> , 2013)		✓		✓	✓			✓			✓
<b>TwinRoute</b> (Wohlers <i>et al.</i> , 2009)		✓		✓			✓				✓

### 3.4.3 Protocoles de lecture et recherche d'informations dans les réseaux de capteurs

Les protocoles de recherche d'informations pour les réseaux de capteurs sont de type orienté requêtes. Le puits envoie une *requête* à un nœud ou à un groupe de nœuds distants pour obtenir les informations de leurs capteurs ou des informations stockées dans leurs mémoires. Les nœuds qui ont l'information demandée répondent par un message *réponse* qui contient ces données. Cet échange de message pour la recherche d'informations est nommé *requête/réponse*. Différents protocoles de recherche d'informations ont été proposés dans la littérature pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils peuvent être classés en protocoles à *deux phases requête/réponse* et protocoles à une *seule phase requête/réponse* comme l'illustre la Table 7.

**Table 7. Protocoles de recherche d'informations dans les réseaux de capteurs sans fil**

Protocoles de stockage	Deux phases requête/réponse	Une phase requête/réponse	Agent de recherche	Multi-chemins	Coûté de liaison
<b>DD</b> (Intanagonwivat, Govindan et Estrin, 2000)	✓				
<b>DCHT</b> (Li <i>et al.</i> , 2010)	✓				
<b>BMR</b> (Ganesan <i>et al.</i> , 2001)	✓				
<b>EAR</b> (Shah et Rabaey, 2002)	✓				
<b>GBR</b> (Schurgers et Srivastava, 2001)	✓				
<b>RR</b> (Braginsky et Estrin, 2002)	✓	✓			
<b>DRR</b> (Shokrzadeh <i>et al.</i> , 2007)	✓	✓			
<b>EEQR</b> (Ahvar, Mahdavi et Ahvar, 2012)	✓	✓			
<b>IEEQR</b> (Hamida et Chelius, 2008)	✓	✓			
<b>EQSR</b> (Ben-Othman et Yahya, 2010)	✓			✓	
<b>N-to-1</b> (Lou, 2005)	✓			✓	
<b>MR2</b> (Maimour, 2008)	✓			✓	
<b>REAMR</b> (Hassanein et Luo, 2006)	✓			✓	
<b>MARP</b> (Sen et Ukil, 2009)	✓				✓
<b>MCFA</b> (Ye <i>et al.</i> , 2001)	✓				✓
<b>GRAB</b> (Ye <i>et al.</i> , 2005)	✓				✓

#### Protocoles à deux phases requête/réponse

Avec la classe deux phases requête/réponse, le puits identifie les données demandées par un ensemble d'attributs. Ces attributs se propagent à travers le réseau dans un message *requête*. Les informations mises en cache à partir de recherches antérieures, comme l'information géographique des nœuds ou des filtres spécifiques à l'application, peuvent être utilisés pour

optimiser la propagation de la requête. Cependant, sans ces informations, la requête doit inonder<sup>4</sup> le réseau pour trouver les données recherchées.

Lorsqu'une requête arrive à un nœud source (le nœud contenant la donnée), ce dernier envoie un message *réponse*. Comme avec le message *requête*, soit ce transfert est limité en utilisant des informations mises en cache soit il est envoyé à tous les nœuds. Lorsque la réponse atteint le puits, ce dernier renforce son voisin préféré pour établir un chemin vers la source (p.ex. nœud voisin à faible latence, qualité de la liaison radio ou énergie). Le voisin renforcé par le puits, à son tour, renforce son voisin vers la source. Cela continue jusqu'à la construction d'un chemin à haute qualité de service qui lie le puits à la source. Finalement, la source envoie ces données uniquement sur le chemin renforcé plutôt que vers tous les voisins.

### **Protocoles à une seule phase requête/réponse**

Dans les réseaux de capteurs, la minimisation du nombre d'inondation réduit le taux de consommation d'énergie. La recherche par une seule phase requête/réponse permet d'éviter deux phases d'inondations qui existent dans les deux phases requête/réponse (données exploratoires et renforcements). Le puits inonde une requête dans tout le réseau en établissant des gradients à chaque saut. Contrairement à un protocole à deux phases, lorsqu'une requête arrive à un nœud source, celui-ci envoie les données recherchées en remontant les chemins construits par la requête. Les chemins avec les meilleures qualités de service sont sélectionnés en priorité. Les protocoles à une seule phase requête/réponse sont classés en :

- Protocoles basés sur le coût de liaison entre les nœuds de capteur ;
- Protocoles multi-chemins ;
- Protocoles basés sur l'agent de recherche.

### **3.4.4 Conclusions sur la 3ème partie de l'état de l'art**

La matière communicante a comme caractéristique de rester communicante et de conserver ses informations après une transformation physique. Dans ce contexte, nous considérons que les protocoles de stockage proactif sont plus adaptés que ceux étant réactifs : si les informations sont déjà présentes de manière uniforme partout dans la matière, une modification de sa forme physique n'impacte pas son contenu. De plus, une densité uniforme d'informations permettrait au nœud puits de les récupérer plus rapidement (à la manière du protocole DEEP détaillé précédemment). Enfin, plus le fragment est important, plus il faut maximiser les chances de le lire. Ainsi, nous considérons que la densité d'une information doit être proportionnelle à son importance.

L'analyse précédente a permis de distinguer 6 protocoles proactifs (2 structurés et 4 non structurés), qui permettraient d'obtenir une réplique uniforme d'une information dans un réseau de capteurs (TTDD, HexDD, DEEP, RaWMS, Supple et ProFlex). De plus, les nœuds dans la matière étant identiques (pas d'utilisation des nœuds plus puissants que les autres) et non localisables, seuls DEEP, RaWMS et Supple conviendraient à notre contexte. Cependant, ceux-ci utilisent les paramètres physiques du nœud de capteurs (p.ex. la mémoire et l'énergie),

---

<sup>4</sup> Le terme « inonder » signifie que la requête doit être transmise dans tout le réseau.

la topologie du réseau et la connaissance de son voisinage pour répliquer les données à travers le réseau de capteur, et ne considèrent pas les propriétés et les caractéristiques des données diffusées telle que la pertinence de l'information introduite par (Lubinski, 2000).

Pour la recherche d'informations, l'utilisation de protocoles classiques à une ou deux phases requête/réponse n'est pas adaptée car elle risque d'épuiser rapidement les batteries des nœuds du réseau, si elle est couplée à des protocoles de stockage probabiliste. En effet, ces types de protocoles conduisent à ce que toutes les informations soient présentes uniformément dans la matière. L'utilisation des algorithmes précédents conduira donc à la duplication de réponses, à la congestion du réseau, à la surcharge des nœuds et finalement à l'épuisement rapide des batteries des nœuds du réseau après plusieurs phases de recherche.

### 3.5 SYNCHRONISATION DE DONNEES

---

Les deux dernières sections aboutissent à une distribution de fragments sur la matière communicante. Une des questions qui se posent alors relève du maintien de la cohérence entre les répliques des mêmes informations, entre les informations hébergées et mises à jour sur les systèmes d'information, et celles stockées sur la matière communicante. Nous appelons ce processus « synchronisation des données » en référence aux travaux issus du domaine des bases de données distribuées, et avons défini deux types de problèmes de synchronisation :

- Synchronisation *technique* : les différentes répliques doivent être les mêmes sur tous les sites considérés, mobiles ou fixes. Elle est abordée par les techniques issues soit des bases de données distribuées, soit des travaux de l'Internet of Things ou du Génie Industriel ;
- Synchronisation *sémantique* : la modification de l'information portée par les répliques en impacte d'autres qui lui sont liées, et il est important de synchroniser leurs états par rapport à celle de la réplique modifiée. Dans le cadre de données produit, ce type de synchronisation peut être abordé via les réseaux de dépendances produit.

La figure 29 présente graphiquement la différence entre les deux types de synchronisation. La synchronisation technique vise à mettre à jour de la valeur de la donnée 3, sur le système d'information actuel ou vers les autres systèmes d'information possédant la donnée 3, tandis que la synchronisation sémantique s'intéresse à évaluer l'impact de ce changement et à le mettre en œuvre. Dans la figure, les données 4 et 5 sont touchées par la synchronisation sémantique (puisque liées à la donnée 3). Ces données délimitent ainsi une zone des données impactées. Il est à noter que le système d'information peut représenter un système réel, dont le produit est un composant, mais aussi le produit lui-même (le SI constitue alors son « jumeau numérique »).

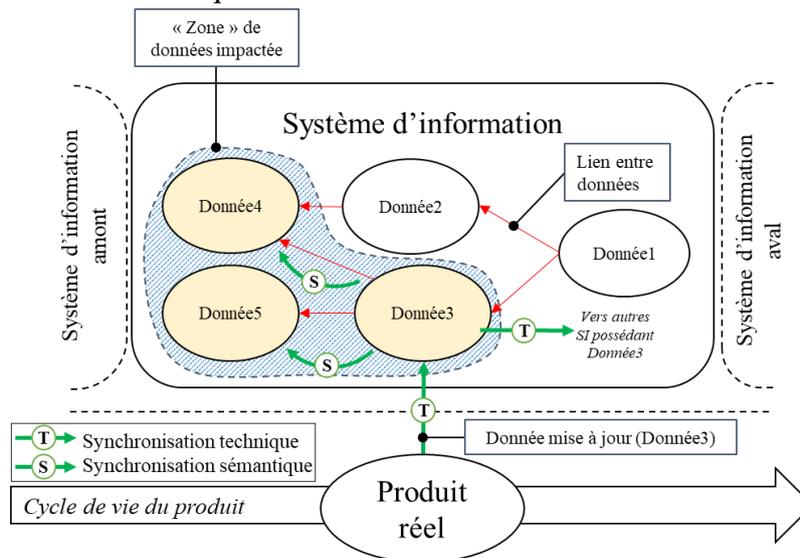
Ces deux types de synchronisation sont abordées dans la suite de la section.

#### 3.5.1 Synchronisation technique

La synchronisation technique consiste à essayer de faire qu'une même donnée, répliquée sur plusieurs systèmes d'information, ait toujours la même valeur quel que soit le site considéré. Cette problématique a été très abordée dans le domaine des bases de données distribuées ainsi

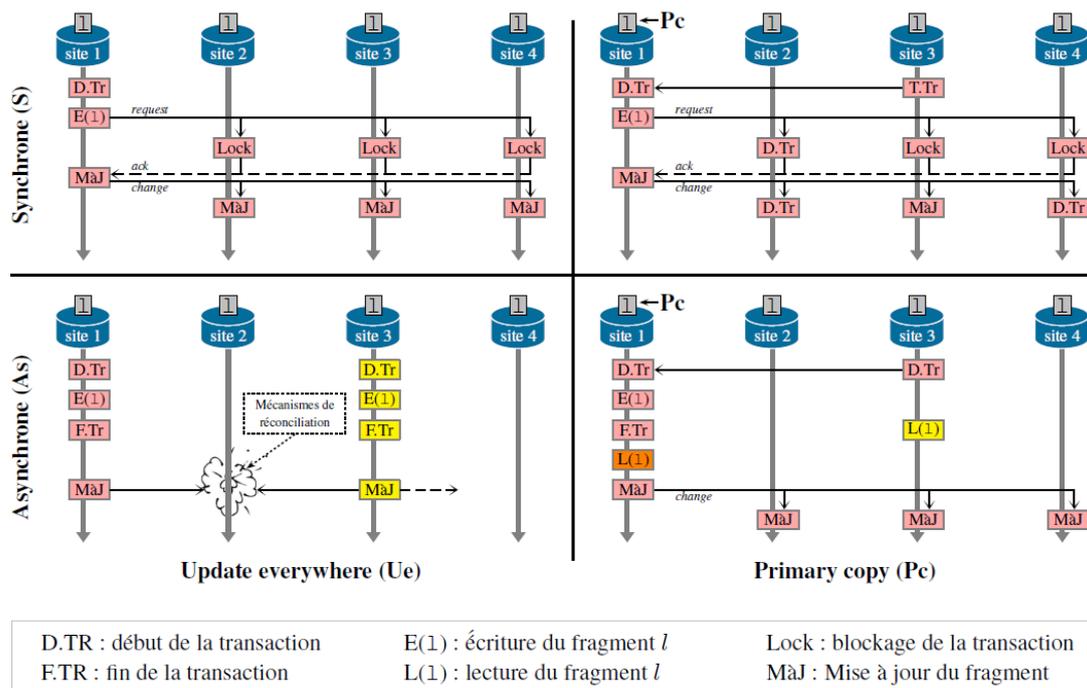
que dans des initiatives du domaine manufacturier. Elle est présentée ici pour la cohérence de notre état de l'art car nos travaux ont, à ce jour, peu abordé cette thématique.

Comme expliqué dans la section 3.3.1, une gestion de la réplication des fragments est essentielle afin de garantir la cohérence des données distribuées sur l'ensemble des sites. La mise à jour des répliques peut se réaliser soit de manière asynchrone (*Asynchronous – As*) ou synchrone (*Synchronous*), en autorisant la mise à jour que par un seul site (*Primary copy - Pc*) ou par tout le monde (*Update everywhere – Ue*). Il est alors possible de combiner ces 4 modes deux-à-deux afin d'obtenir 4 types de réplifications. La figure 30 illustre le comportement de ces différents types de synchronisation technique.



**Figure 29. Synchronisations technique et sémantique**

Considérons quatre sites numérotés de 1 à 4, sur lesquels un fragment  $l$  est alloué/répliqué. Dans un premier temps, on autorise tous les sites à mettre à jour ce fragment basé sur le mode synchrone (principe du *Ue-S*). Le site 1 désire mettre à jour ce fragment, il effectue donc une demande aux sites 2, 3, 4 (sites disposant d'une réplique) et attend l'acquiescement de ces derniers afin de procéder à sa transaction. Nous remarquons que dans le cadre d'une réplification *Ue-As*, des conflits peuvent survenir puisque l'on autorise tous les sites à modifier leurs données, sans se soucier des répliques. Dans le monde des bases de données distribuées, des mécanismes de réconciliation existent pour solutionner ce type de problème (Gray *et al.*, 1996; Petersen *et al.*, 1997).



**Figure 30. Techniques de synchronisation technique**

À l’opposé, le principe du Primary Copy ( $Pc$ ) oblige les sites désirant faire une mise à jour sur un fragment à faire une demande à un site particulier, appelé « *Primary Copy* », qui lui seul décide de où et quand réaliser la transaction et répliquer les mises à jour (selon que l’on est en mode  $S$  ou  $As$ ). Nous pouvons voir sur la figure 30 que le site 3 désire faire une mise à jour du fragment et, par conséquent, il doit transmettre sa demande au site dit  $Pc$ , c’est-à-dire le site 1. Dans le monde des bases de données distribuées, la gestion du processus de réplication est gérée par le SGDB réparti.

Ce problème de BDD distribuées se retrouve aussi en logistique, où cette gestion ne peut pas être réalisé par un système unique. Dans le domaine de la chaîne logistique, de nombreuses études ont démontré qu’une qualité médiocre de données (i.e. données obsolètes ou erronées) impacte significativement les bénéfices que les partenaires recherchent en mettant en place des collaborations (Gemini, 2005; Harrison et Parlikad, 2006; Tajima, 2007).

(Harrison et Parlikad, 2006) ont dans le cadre du projet AERO-ID travaillé sur la synchronisation de données entre le produit et la (ou les) base(s) de donnée distante(s) contenant une copie des données du produit. Ils définissent 4 niveaux de synchronisation :

- *Niveau 0 – Synchronisation dans un environnement toujours connecté, avec des informations sur le produit* : l’information relative au produit est présente dans une base de données, toujours disponible. Le produit peut contenir un sous-ensemble de cette information. Le client peut alors accéder à l’information soit sur le produit soit sur la base de données, mais l’information n’est modifiable que sur la base de données, et mise à jour sur le produit automatiquement. On est clairement dans un cas *Synchrone-Primary Copy* sur la base de données;

- Niveau 1 – *Opération en mode déconnecté possible avec une réplique de l'information sur le produit* : ce niveau est proche du niveau 0, sauf que la base de données n'est pas toujours disponible. Cela signifie que l'information est d'abord modifiée sur la base de données, puis mise à jour sur le produit lorsqu'il est à nouveau connecté. Comme pour le cas précédent, l'information de référence est celle associée à la base de données distante. On est dans un cas *Asynchrone-Primary Copy* sur la base de données ;
- Niveau 2 – *Opération en mode déconnecté possible avec mises à jour sur le produit* : ce niveau est proche du niveau 1, à ceci près que des mises à jour peuvent être faites sur le produit lui-même, même s'il est déconnecté du réseau de communication. La modification de l'information relative au produit, contenue dans la base de données distante, n'est pas possible tant que le produit ne s'est pas reconnecté. Contrairement au niveau 1, l'information de référence est sur le produit. On est dans un cas *Asynchrone-Primary Copy* sur le produit ;
- Niveau 3 – *Opération en mode déconnecté possible avec mises à jour sur le produit et sur la base de données* : dans ce dernier niveau, le produit ainsi que la base de données peuvent être modifiés en mode déconnecté. Le mécanisme de synchronisation est plus complexe puisqu'il nécessite des politiques de gestion de conflits pouvant arriver entre les répliques hébergées par le produit et la base de données. On est dans un cas *Asynchrone-Update Everywhere*.

Pour répondre à ce problème, des initiatives de gestion de la synchronisation des données logistiques ont vu le jour. GDSN (*Global Data Synchronisation Network* – (Lockhead, 2011)) est un des exemples les plus connus d'écosystème de synchronisation de données entre partenaires de la chaîne logistique. C'est un réseau de banques de données qui autorisent les partenaires collaborant dans la chaîne logistique à synchroniser de manière sécurisée une base de données de référence. Ce type de structure permet une synchronisation de type 0.

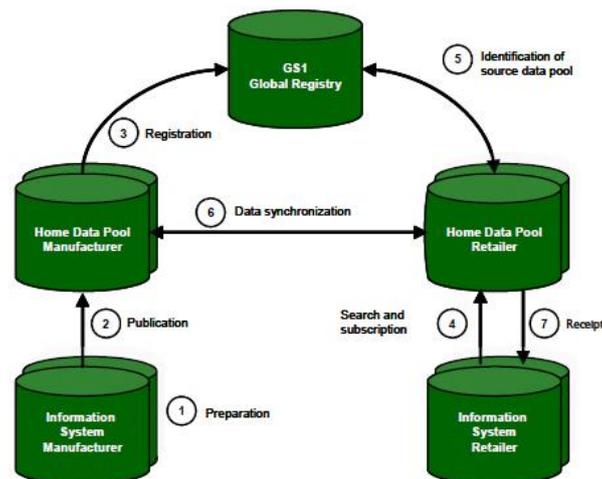


Figure 31. Description du GDSN (Schemm, Legner et Otto, 2007)

De plus, GDSN est plutôt orienté SCM et ne gère pas les autres phases du cycle de vie du produit.

Dans le cadre du projet FP7 PROMISE (PROMISE, 2006, 2009), deux spécifications, le SOM (PROMISE System Object Model) ainsi que le PMI (PROMISE Messaging Interface), ont été proposées pour de mettre en place ce même type de mécanisme dans un contexte de communication de données libres en mode Peer-to-Peer entre systèmes d'information distants. Elles ont plus tard été fusionnés dans un standard de L'Open Group, nommé O-MI/O-DF (pour Open Messaging Interface/Open Data Format) (The Open Group, 2014a, 2014b). Cependant, ces différentes initiatives n'incluent pas de mécanismes de synchronisation supérieur à 2.

### 3.5.2 Synchronisation sémantique

La synchronisation sémantique correspond à la mise en cohérence sémantique des informations liées à l'information modifiée. Nos premiers travaux de synchronisation sémantique se basent sur l'utilisation de réseaux de dépendances.

Une *dépendance* peut être définie comme un lien ou une relation de causalité réciproque ou non entre des données. Selon (Kusiak et Wang, 1995), une dépendance entre deux variables représente l'impact de la modification de l'une des variables sur l'autre. Les auteurs déterminent deux aspects relatifs aux dépendances : *qualitatif* et *quantitatif*. L'aspect qualitatif est en rapport avec la nature de la dépendance entre les données et l'aspect quantitatif est relatif à l'importance de l'impact sur une donnée de la modification d'une autre. Au-delà de ces deux point-de-vues, les différentes natures de dépendances identifiables sont selon (Ouertani et Gzara, 2008) :

- Les *dépendances naturelles* (ou physiques) décrivant les interactions physiques au sein du produit et avec son environnement ;
  - Les *dépendances de produit* décrivant les relations fonctionnelles, comportementales, technologiques et géométriques au sein du produit (Bronsvoort, 2004; Gero et Kannengiesser, 2004; Sudarsan *et al.*, 2005) ;
  - Les *dépendances de tâche* concernant les contraintes de ressources entre deux activités ;
  - Les *dépendances de ressources* relatives au besoin de collaboration entre deux activités.
- (Ouertani et Gzara, 2008) définissent une autre spécification des dépendances, s'appuyant sur les relations suivantes :
- *Relation de dépendance à la création* : deux informations sont dites dépendantes à la création si la création de l'une dépend de la création de l'autre ;
  - *Relation de dépendance à la modification* : deux informations sont dites dépendantes à la modification si la modification de l'une implique la modification de l'autre ;
  - *Relation de redondance* : deux informations sont dites redondantes si les deux décrivent le même objet avec des expressions différentes ;
  - *Relation de cohérence* : deux informations sont dites liées par cohérence si elles obéissent à une relation (Nuseibeh, Easterbrook et Russo, 2001).

Les dépendances permettent de mettre en relation l'ensemble des données d'un domaine, aboutissant ainsi à la définition d'un réseau. Les réseaux de dépendances de données sont formalisés au travers des graphes, composés de nœuds ou sommets correspondant aux données, et d'arêtes (pour les graphes non-orientés) ou arcs (pour les graphes orientés) représentant les liens entre les données. Les graphes de données ont démontré leur intérêt dans de nombreux domaines notamment dans la gestion de connaissances (Chen, Wu et Occeña, 2002; Dibia-

Barthélemy, Haemmerlé et Salvat, 2006), la gestion de contraintes et règles (Lee et Kim, 1996; Ducellier, Eynard et Caillaud, 2007), la gestion de conflits en conception (Klein, 2003; Ouertani et Graza, 2008) et la gestion des relations au sein du produit (Roucoules *et al.*, 2006; Demoly, 2010).

Pour exemple, dans le cadre de la conception de systèmes complexes, (Ouertani et Graza, 2008) propose un outil baptisé DEPNET (pour *DEP*endency *NET*work) qui permet de capitaliser les relations de dépendances entre les données du processus de conception, tout au long de son exécution. La méthode se compose de deux parties : la première capitalise le processus de conception par le biais d'une base de données spécifique, et la deuxième applique des requêtes SQL sur la base de données ainsi constituée pour reconstruire le réseau de dépendances, dont les liens correspondent aux différents types de relation de dépendances énoncés précédemment (cf. figure 32). Chaque lien possède un poids reflétant l'impact que pourrait avoir le changement d'une donnée sur la donnée lui étant liée. Une fois le graphe calculé, il est alors possible de déterminer l'impact en délimitant des zones du réseau dites *critiques*, composées de données étant liées par des relations dont le poids dépasse un seuil fixé par l'utilisateur.

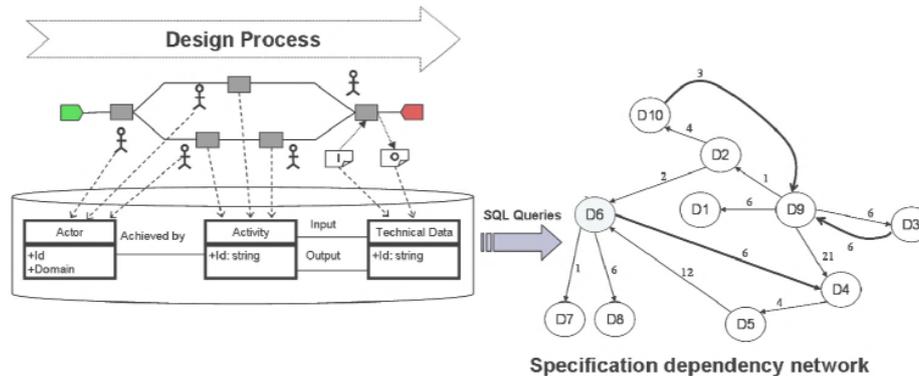


Figure 32. Approche d'identification du réseau de dépendances (Ouertani et Graza, 2008)

Cette méthode a le désavantage de devoir gérer un système supplémentaire, non intégré aux systèmes PLM existants. De plus, elle découple l'aspect représentation des données de la propagation du changement.

### 3.5.3 Conclusions de la 4<sup>ème</sup> partie de l'état de l'art

Cette partie s'est intéressée à la synchronisation technique et sémantique des données sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Des écosystèmes tels que GDSN existent déjà pour gérer la synchronisation technique des données plutôt orientées Supply Chain, dans des environnements plutôt fermés. Dans un contexte d'IoT et d'informatique ambiante, les protocoles tels que O-MI/O-DF nous semblent plus adaptés. Cependant, ces protocoles n'intègrent pas de couche de résolution de conflits lors de la synchronisation des données, dans un mode de mise à jour par tous. Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de mixer les mécanismes issus des bases de données distribuées avec ces protocoles de l'IoT.

La synchronisation sémantique permet de mesurer l'impact du changement d'une donnée sur l'ensemble des autres données du système PLM. Deux commentaires peuvent être faits sur les méthodes de synchronisation sémantique : capitaliser les dépendances entre les données

nécessite un système support. Plutôt que d'exister dans un système séparé, nous proposons de l'intégrer au système PLM initial. De plus, le mécanisme de propagation est souvent découplé du système de capitalisation des dépendances, ce qui complique le processus. (Cheutet, 2012) suggère qu'une approche basée sur l'utilisation d'ontologies permettrait de simplifier le processus. En ce sens, pour les travaux sur le BIM, l'utilisation de l'ontologie IfcOwl pour les réseaux de dépendances sera investiguée.

### 3.6 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

Le travail bibliographique réalisé dans ce chapitre permet de faire une synthèse des travaux existants sur chaque verrou scientifique tout en identifiant les travaux d'intérêt pour notre contexte. La Table 8 fait le bilan des différentes méthodes considérées comme intéressantes dans notre cadre de travail, ainsi que des manques relevés. Afin de répondre à ces manques, nous détaillerons nos propositions dans le chapitre suivant.

Table 8. Synthèse de l'état de l'art

Thèmes	Verrous	Travaux relevés par l'état de l'art	Constats
<b>Modélisation des données portées par la produit</b>	Modélisation des données	Bilan des standards et des différentes ontologies existants	- PLM : foison de standards mais pas d'ontologies standardisées ; - BIM : IFC norme prépondérante / IfcOwl ontologie en passe d'être standardisée
	Synchronisation des données	<i>Technique</i> : Protocoles IoT tels que QLM (Kubler, Madhikermi et Främling, 2014)	- Pas de mécanismes de synchronisation de données sur des standards IoT comme QLM
<i>Sémantique</i> : Réseaux de dépendance de données (Ouertani et Graza, 2008)		- Mise en œuvre séparée du système d'information d'origine. - Mécanisme de propagation découplé de la base de données.	
<b>Gestion des données dans la matière communicante</b>	Sélection des données	Méthodes de sélection de données multi-critères (Chan et Roddick, 2003, 2005)	- Adaptation à notre contexte nécessaire ; - Pas de processus d'aide à la décision pour l'utilisateur en charge de paramétrer le processus de réduction de données.
	Distribution des données	Protocoles de stockage probabiliste sur les réseaux de capteurs (Carneiro Viana <i>et al.</i> , 2010; Vecchio <i>et al.</i> , 2010)	- Protocoles de stockage ne prennent pas en compte la sémantique de la donnée.
		Protocoles de récupération des informations sur les réseaux de capteurs.	- Protocoles non adaptés lorsque couplés à des protocoles de stockage probabilistes.

# Chapitre 4. CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

## Rappel des chapitres précédents & objectifs du chapitre

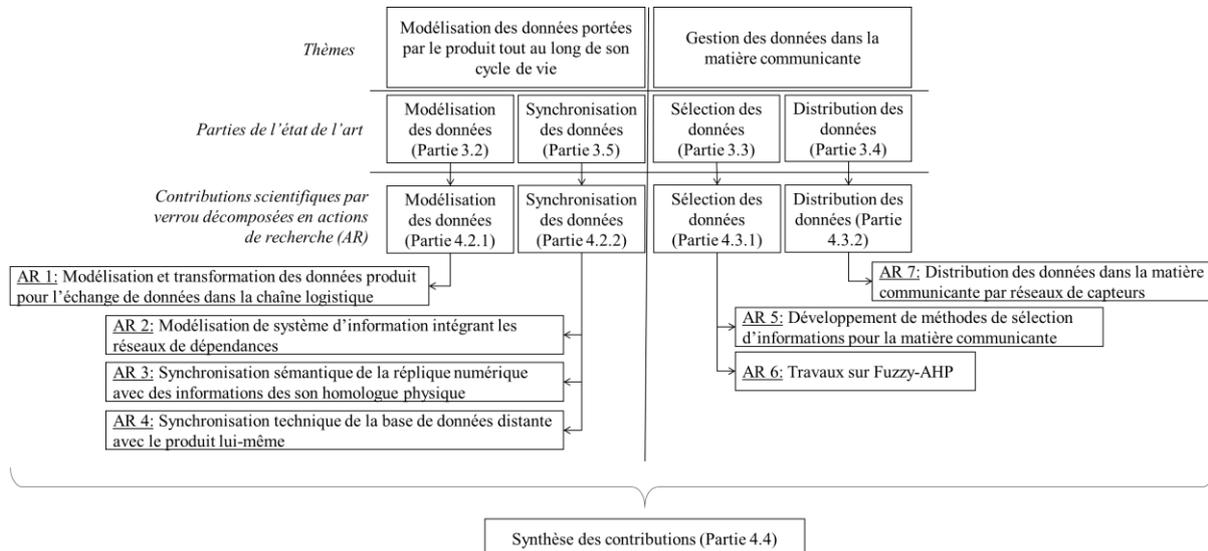
*L'étude de la littérature relative à nos 4 verrous (modélisation, sélection, distribution et synchronisation) a donné lieu à l'état de l'art précédent. Celui-ci a permis de souligner les travaux de référence dans le domaine, et les manques relevés par rapport à notre positionnement.*

*Ce chapitre a pour objectif de détailler l'ensemble de nos contributions scientifiques. La structuration du chapitre détaillé figure 33 met en évidence deux grandes parties, reprenant les deux thèmes structurants de nos travaux, eux-mêmes divisés en sections dédiées aux différents verrous levés dans notre contexte, lesquels contiennent une ou plusieurs « actions de recherche ».*

*Afin de souligner les apports des différents travaux par rapport à l'état de l'art, une table récapitulative, similaire à la table 8, est présente à la fin de chacune de ces sections.*

## 4.1 ORGANISATION DES CONTRIBUTIONS

La figure 33 présente l'organisation des contributions.



**Figure 33. Organisation des contributions**

## 4.2 CONTRIBUTIONS AU THEME 1, « MODELISATION DES DONNEES PORTEES PAR LE PRODUIT SUR L'ENSEMBLE DE SON CYCLE DE VIE »

Ce thème regroupe les contributions correspondant à la partie supérieure de la figure 3 située dans le premier chapitre « présentation du candidat » et rappelée ci-dessous, en haut de la figure 34. Il s'articule autour d'une thèse ([Thèse1]), d'un master ([M2R2]) et de 2 projets en relation avec des industriels (projet PLM EDF [Post-Doc1] et projet ADEME ITE+ [Post-Doc2]).

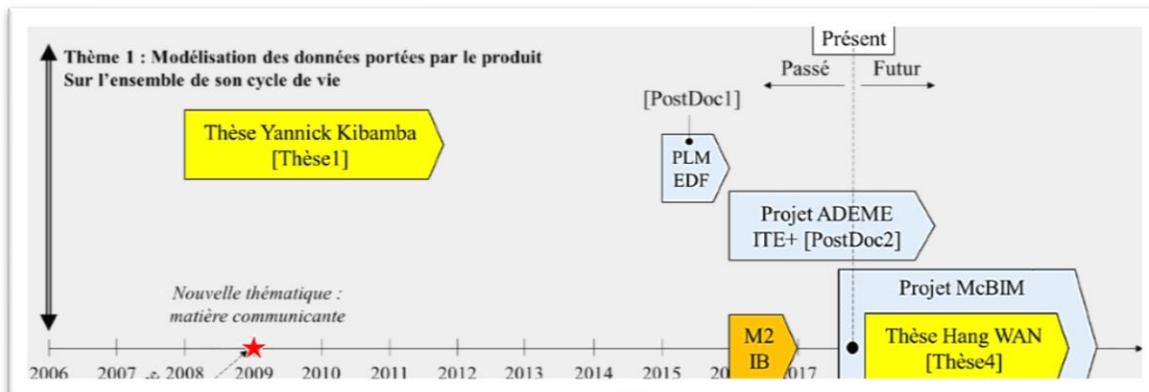


Figure 34. Travaux sur le thème n°1

Les travaux dans ce thème ont été menés essentiellement dans le cadre de contrats ou projets industriels. En effet, la thèse de Yannick Kibamba est une thèse CIFRE en collaboration avec la SNECMA, le projet PLM EDF a été réalisé en collaboration avec l'ENSAM Paris et le CNEN (Centre National d'Équipement Nucléaire, direction ingénierie) d'EDF, et le projet ADEME ITE+ avec l'entreprise POIROT Construction, spécialisée dans l'isolation thermique par l'extérieur, située à la Bresse (88). De plus, le projet ANR McBIM, labellisé en 2017, est un PRCE en lien avec l'entreprise 360SmartConnect. Cette forte activité en relation avec des industriels a eu pour intérêt de toujours avoir des cas d'études et d'application pragmatiques et réalistes, et comme désavantage de limiter la stratégie de publication par le biais d'accords de confidentialité quelquefois très stricts. Les données qui sont manipulées dans ces travaux sont pour la plupart des données relatives à la maquette numérique du produit, c'est-à-dire des données 1D (documents classiques) mais aussi 2D (plans) et surtout 3D.

### 4.2.1 Verrou (1) – Modélisation des données

Le premier verrou que nous abordons traite de la constitution du modèle de données support du système d'information, ainsi que de la transformation de modèles de données. En effet, lorsque le produit intelligent (ou la matière communicante) se déplace tout au long de la chaîne logistique, il porte ses propres informations qui vont être exploitées et mises à jour par les différents acteurs rencontrés, dans une optique d'échanges, d'un acteur vers un autre.

L'état de l'art a montré qu'il est nécessaire de structurer les données échangées, soit par l'intermédiaire d'un modèle de données commun aux différents acteurs (un standard ou alors un modèle fédéré, construit en accord avec toutes les parties prenantes), ou alors de réaliser des

« ponts sémantiques » permettant de faire des correspondances plus ou moins complexes d'un modèle de données vers un autre. Dans le cadre de données portées par le produit, nous considérons que le modèle de données doit être issu d'un standard, les ontologies non standardisées n'assurant pas la pérennité de l'information. Dans le cas où les données d'un acteur ne correspondent pas au standard, il faut alors réaliser des transformations de données entre les données de l'acteur et le standard choisi pour le cas d'étude. L'action de recherche n°1 présente le mapping sémantique réalisé dans le cadre du projet ITE+, entre les données des acteurs et le format IFC.

### **Action de Recherche n°1 : Modélisation et transformation des données produit pour l'échange de données dans la chaîne logistique**

Le projet ITE+ (Isolation Thermique par l'Extérieur), labellisé par l'ADEME sur la période 2016-2018 (3 ans), est un des projets inclus dans le domaine transversal INC. Mené en collaboration avec l'entreprise LIB (Lorraine Industrie Bois) du groupe Famille POIROT (GFP), il a pour objectif la mise au point et le développement d'un processus industrialisé d'ITE à base de bois et matériaux biosourcés pour la rénovation de bâtiments existants. La solution proposée est basée sur l'utilisation de panneaux de bois isolants préfabriqués en atelier et assemblés sur site par le biais d'accroches rapides.

#### **Processus de réalisation ITE+**

Le processus ITE+ est constitué des étapes suivantes présentes sur la figure 35. Tout au long de ce processus, les différents acteurs s'échangent des données relatives au produit « panneau d'isolation », lors des étapes suivantes :

- *Définition avant-projet* : cette étape concerne le chiffrage du projet de rénovation. Elle est réalisée par le maître d'œuvre en relation avec son client. Ce chiffrage s'effectue à l'aide d'une application informatique appelée **BATIKUTCH** développée par l'entreprise LIB. Ce chiffrage s'effectue sur une ou plusieurs images des parties à isoler sur le bâtiment. Pour chaque image, les zones à isoler sont mesurées puis annotées par des informations technologiques (type de bardage, type d'isolation retenue, constitution des murs, présence d'une dalle, etc.) ;
- *Mesure précise des côtes* : il s'agit de réaliser la maquette numérique du bâtiment. Dans le cadre du projet ITE+, le modèle 3D filaire est obtenu à partir d'un nuage de points 3D de la façade à isoler grâce au prototype logiciel **MODIBUILDING** développé au CRAN (Bennis 2015). A partir du nuage de points du bâtiment, MODIBUILDING reconnaît automatiquement toutes ses façades et produit pour chacune un contour 3D. Les portes et fenêtres sont identifiées automatiquement et stockées sous forme de contours à part. L'ensemble de ces contours compose un modèle filaire enregistré sous la forme d'un fichier propriétaire, dérivé du **DXF** ;
- *Conception et fabrication des panneaux* : ces deux actions s'effectuent sous **CADWORKS** ;
- *Pose des panneaux* : la pose nécessite d'avoir la maquette numérique du panneau ;
- *Réception client* : le client désire un exemplaire numérique de son projet.

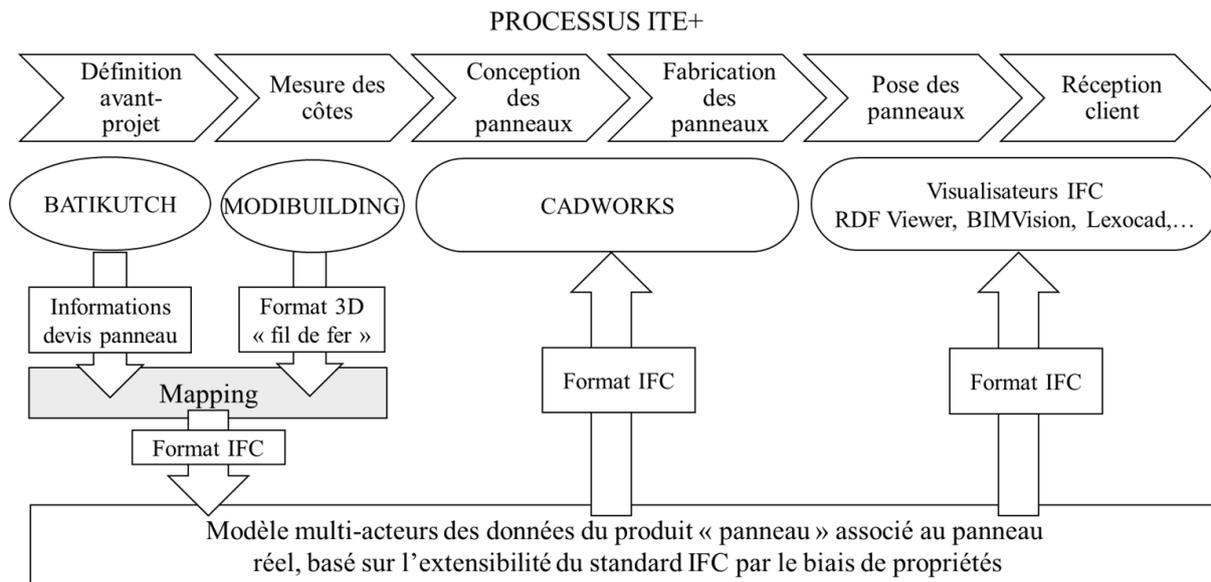


Figure 35. Description du processus ITE+

### Standard utilisé

Le fichier final 3D doit combiner les informations 3D issues de MODIBUILDING par des informations issues de l'avant-projet, et extraites de BATIKUTCH. Le format retenu doit en outre être lisible facilement (et si possible gratuitement) par l'ensemble des acteurs impliqués dans le processus ITE+ (en particulier le poseur et le client). Le format IFC (Industry Foundation Classes) est un open standard pour le BIM destiné à assurer l'interopérabilité entre les différents logiciels manipulant la maquette numérique. En ce sens, nous avons jugé particulièrement pertinent d'utiliser ce standard comme modèle de données pour le processus ITE+. En se basant sur ce format, il est donc nécessaire de faire un mapping depuis MODIBUILDING/BATIKUTCH vers un format IFC. Sur ce modèle IFC seront « raccrochées », par le biais d'un processus d'enrichissement, des informations métier ayant un sens pour les acteurs intervenant tout au long du processus ITE+.

### Mapping sémantique

IFC est un format de fichier orienté objet, basé sur la norme STEP ISO10303. Il possède une surcouche dédiée au bâtiment, avec un ensemble d'objets standards (mur, fenêtre, porte, ...) possédant une sémantique métier. Ce format permet spécifier des modèles de bâtiments constitués d'une hiérarchie d'objets métiers (étage, porte, mur, fenêtre, etc.), possédant leur propre forme géométrique. Cette capacité a été exploitée dans le projet ITE+ où l'entité géométrique de base reste la façade. Ces différentes façades ont été modélisées par des entités *IfcWall*, les fenêtres reconnues sur ces façades par des entités *IfcWindow* et les portes par des entités *IfcDoor*. Un exemple simplifié de l'instanciation de la norme IFC sur un cas d'études du projet ITE+ est illustré figure 36.

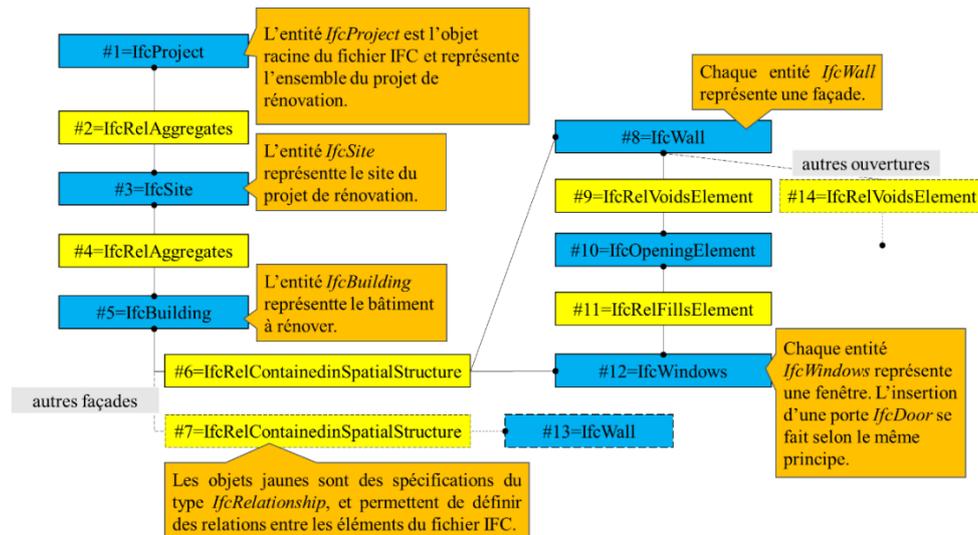


Figure 36. Exemple d'instanciation du modèle IFC sur un cas ITE+

Pour réaliser l'enrichissement de ce fichier par des connaissances métiers, nous nous sommes basés sur le mécanisme dit de « propriétés », qui permet d'adjoindre à n'importe quel objet IFC des propriétés non prévues dans son diagramme de classe. Il est donc possible d'enrichir tout objet IFC, en le liant avec des propriétés dont la spécification est très souple. Ainsi pour insérer des informations métier dans le fichier IFC, nous avons défini le concept d'annotation géolocalisée. Une annotation constitue un objet IFC de forme choisie par l'utilisateur, auquel il est possible d'associer des propriétés métiers. La figure 37 illustre le principe de l'annotation géolocalisée. Elle peut avoir 2 formes géométriques : un cylindre représentant une localisation précise ou une forme plane quelconque représentant la zone à isoler.

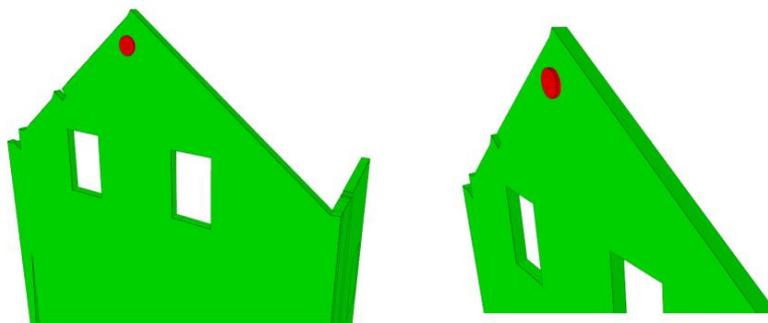
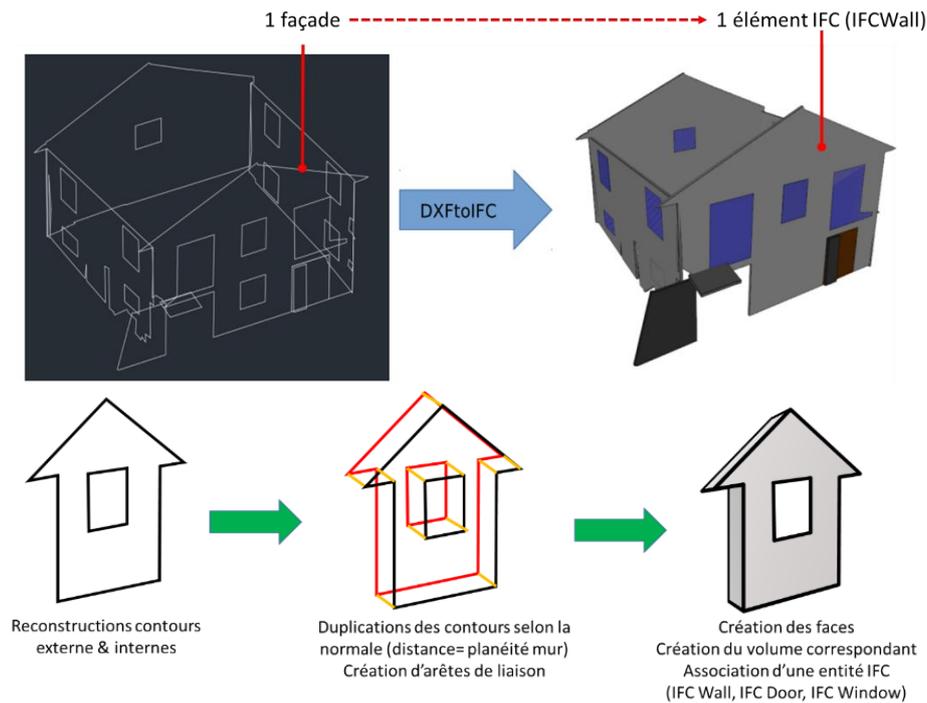


Figure 37. Exemple d'annotation géolocalisée

Le mapping du modèle MODIBUILDING vers un modèle IFC est une correspondance filaire/volumique. Le fichier MODIBUILDING fournit des informations relatives sur les types d'éléments reconnus (mur, porte, fenêtre) ainsi que leur forme géométrique. Pour chaque façade reconnue, on crée dans le fichier IFC un élément correspondant de type *IfcWall* dont la géométrie est obtenue par extrusion du contour 2D initial, comme illustré figure 38.



**Figure 38. Correspondance 2D/3D et description de la procédure de transformation**

Une dernière étape du mapping vise à intégrer les annotations issues du BATIKUTCH dans le modèle IFC. Ces annotations sont de deux types : texte (par exemple pour spécifier un bardage ou le matériau du mur) ou contour (afin de délimiter la zone à isoler). Chaque annotation est associée à une position dans l'espace de l'image annotée. BATIKUTCH permet aussi d'exporter ces annotations dans un format \*.csv.

La transformation *annotation BATIKUTCH* vers *annotation géolocalisée IFC* nécessite la construction d'une matrice de passage de l'espace image vers l'espace du fichier IFC. Afin de déterminer cette matrice de passage, il faut déterminer sur quel contour de façade et en quel(s) point(s) du contour de façade la similarité avec la zone à isoler est la plus grande (cette zone à isoler est connue et récupérée par le biais de BATIKUTCH). Comme mesure, nous avons choisi d'utiliser la distance de Hausdorff modifiée, donnée par l'équation (1), qui permet d'évaluer la similarité entre deux contours :

$$MHD(S, T) = \max\{g_d(S, T), g_d(T, S)\} \quad (1)$$

où  $d$  est une distance quelconque,  $g_d$  est la distance de Hausdorff modifiée relative. Elle est définie par (2) :

$$g(S, T) = \frac{1}{|S|} \sum_{p \in S} \min_{q \in T} \{d(p, q)\} \quad (2)$$

La figure 39 illustre ce principe : les contours rouge et bleu sont respectivement le contour de la zone à isoler, dessiné sous BATIKUTCH par l'utilisateur, et le contour de la façade issu du fichier IFC. Dans cette position, la distance de Hausdorff modifiée entre les deux contours est minimale et leur similarité maximale.

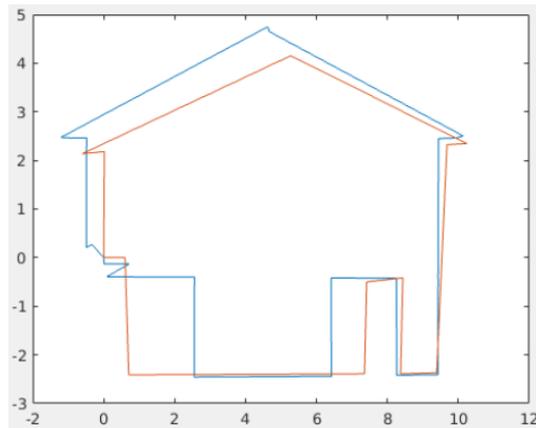


Figure 39. Similarité maximale entre contours de façade et de la zone à isoler

La figure 40 présente le fichier IFC final intégrant différents commentaires insérés depuis BATIKUTCH. Les cylindres bleu ciel présents dans le modèle IFC sont placés au même endroit que les commentaires BATIKUTCH et on peut voir leurs différentes propriétés entourées dans l'arborescence située à gauche.

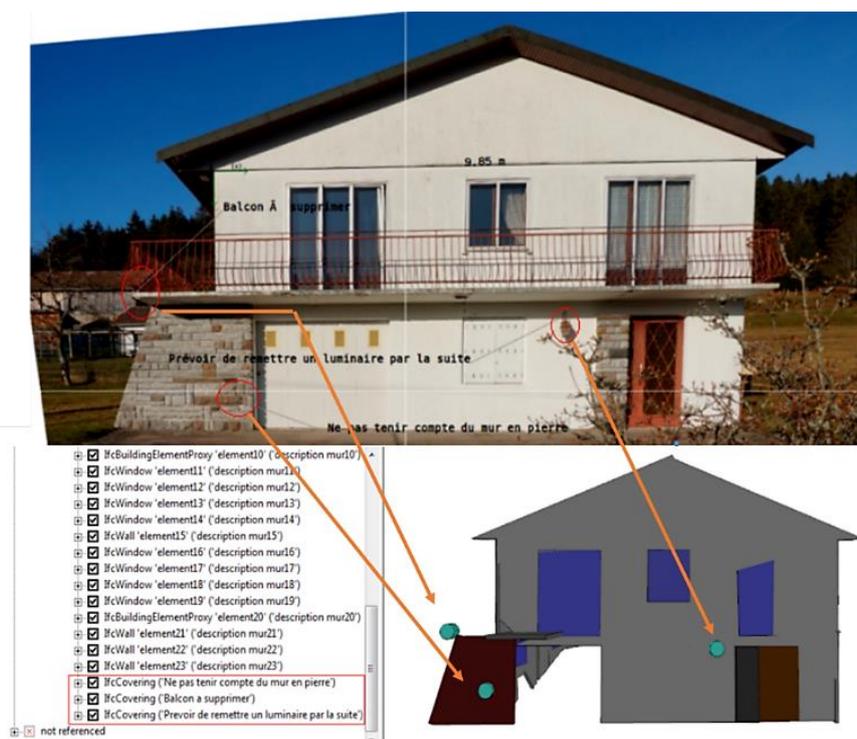


Figure 40. Fichier final 3D, enrichi des commentaires BATIKUTCH

Cette action de recherche relativement récente (elle n'a démarré qu'en 2016) a déjà fait l'objet d'une communication en conférence [IC2]. Une autre communication a été soumise à PLM18. Une revue est en préparation sur cette action. La table 9 présente un récapitulatif des contributions de l'action.

Table 9. Récapitulatif des contributions sur le verrou « modélisation des données »

Verrous	Manques relevés	Actions de recherche	Contributions scientifiques
Modélisation des données	<p><i>PLM</i> : foison de standards mais pas d'ontologies standardisées</p> <p><i>BIM</i> : IFC norme prépondérante/ IfcOwl ontologie en passe d'être standardisée</p>	<p><u>Action de recherche n°1</u> : Modélisation et transformation des données produit pour l'échange de données dans la chaîne logistique (ici dédiée rénovation)</p>	<p>- Modélisation produit « panneau » basée sur la norme IFC ;</p> <p>- Proposition de la notion d'annotation géolocalisée ;</p> <p>- Mapping sémantique basé sur la recherche de similarité ;</p> <p>- Utilisation originale d'algorithmes de reconnaissance de contours et de recalage pour le processus de mapping.</p>

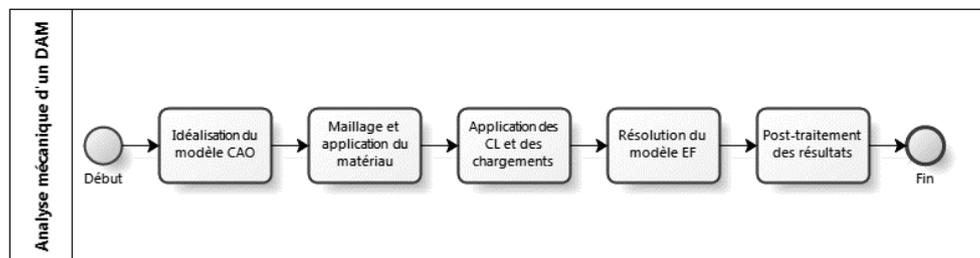
#### 4.2.2 Verrou (2) – Synchronisation des données

Le verrou « *Synchronisation* des données » traite les problèmes relatifs à la synchronisation des flux physiques et informationnels de manière à maintenir la cohérence entre la partie physique du produit et sa partie informationnelle. Pour reprendre le paradigme holonique, cette synchronisation est le lien permettant la cohérence de l'holon produit. Les travaux relatifs au verrou l'ont abordé selon trois actions de recherche. Les deux premières se sont intéressées à la synchronisation *sémantique* des données, alors que la dernière s'intéresse plus à la synchronisation *technique* des données.

- *Action de Recherche n°2 : Modélisation de systèmes d'information intégrant les réseaux de dépendances* : cette modélisation a été appliquée à plusieurs contextes : SLM (Simulation Lifecycle Management – Gestion des informations de simulation) [Thèse1] pour les besoins de la simulation, et le projet PLM EDF [Post-Doc1] pour les besoins de l'ingénierie système.
- *Action de Recherche n°3 : Synchronisation sémantique de la réplique numérique avec des informations provenant de son homologue physique* : le produit (ou système) peut être instrumenté et être capable de renvoyer à son homologue numérique des informations relatives à sa position, son état physique (température, contraintes) ou logistique (date de passage sous portique de livraison). On est ici proche du concept de *digital twin*. Notre objectif est d'utiliser l'ensemble de ces informations pour reconstruire une représentation numérique synchronisée avec l'état du produit réel. L'application se fait dans le contexte du BIM.
- *Action de Recherche n°4 : Synchronisation technique de la base de données distantes avec le produit lui-même* : le paradigme « produit porteur de ses informations » permet de lier l'information au produit tout au long de sa vie. Cependant lier l'information au produit générera inévitablement des répliques de données sur les différents systèmes d'information qu'il rencontrera tout au long de son cycle de vie. Si les données portées par le produit sont modifiées, il doit alors être possible de synchroniser l'ensemble des répliques avec ces nouvelles valeurs.

## **Action de Recherche n°2 : Modélisation de systèmes d'information intégrant les réseaux de dépendances**

La thèse CIFRE de Yannick Kibamba [**Thèse1**] a eu pour objectif d'étudier la gestion des chaînes de calculs dans le domaine aéronautique. Une chaîne de calculs est un processus, le plus automatisé possible, permettant d'obtenir à partir de données physiques d'entrée (conditions aux limites, chargements, températures ...) le comportement du produit. Il est aussi possible de modifier les paramètres d'entrée afin de faire par exemple des simulations de scénarios différents, et tout cela en mode batch (sans intervention humaine). La figure 41 présente une chaîne de calculs simple, utilisée pour calculer les contraintes s'exerçant sur un disque aubagé monobloc (DAM) monté sur une turbine de réacteur. Au commencement de la thèse, la société SNECMA ne disposait pas des outils requis pour une gestion efficace des chaînes de calculs et les données générées par ces chaînes.



**Figure 41. Exemple de chaîne de calculs liée à un DAM (Disque Aubagé Monobloc)**

Nous avons étudié toutes les typologies de chaîne de calculs, ainsi que les types de données générées et nous avons proposé une structuration d'un outil de type SLM permettant *i)* d'enrichir le modèle géométrique du produit avec des informations nécessaires à la simulation *ii)* de concevoir ces chaînes de calculs par réseaux de dépendances. Pour rappel, ce sont des graphes orientés acyclique dont l'objectif est d'*identifier* et *qualifier* les dépendances entre les données manipulées durant un processus donné. Ces réseaux permettent alors, via des méthodes d'évaluation, de prévoir l'impact des modifications d'une donnée sur le réseau et de détecter d'éventuels problèmes.

Nous avons adapté les travaux de (Ouertani et Gzara, 2008) au domaine de la gestion des données de simulation aéro-thermique. Cette approche a permis de circonscrire la zone impactée par une modification d'une donnée dans une chaîne de calculs et donc d'optimiser les calculs à relancer. La figure 42 illustre un exemple d'un réseau de dépendances, permettant de formaliser le processus de simulation. De plus, la construction du réseau de dépendances s'effectue via une application dédiée, permettant au gestionnaire d'exprimer les réseaux à capitaliser.

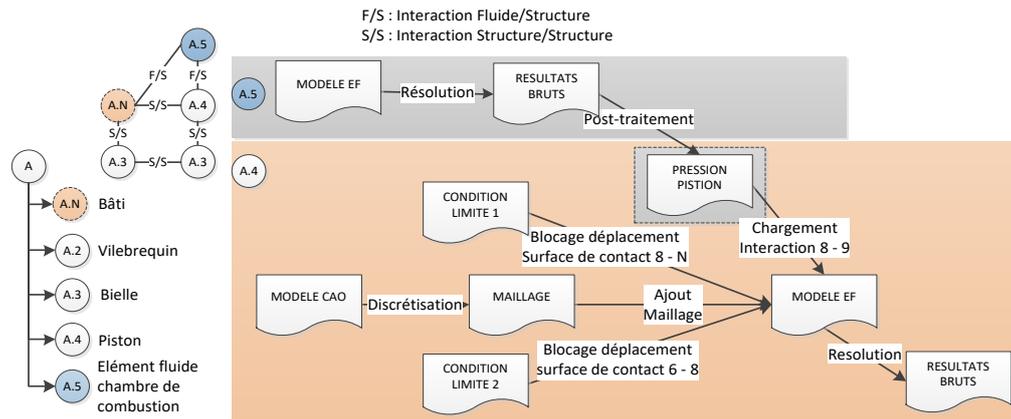


Figure 42. Exemple de structuration de chaîne de calculs par réseaux de dépendances

L'implémentation du système de gestion des simulations (ou SLM – *Simulation Lifecycle Management*) a été réalisée sur la plateforme DS ENOVIA SMARTEAM. La figure 43 représente un aperçu d'un réseau de dépendances de données géré par le prototype.

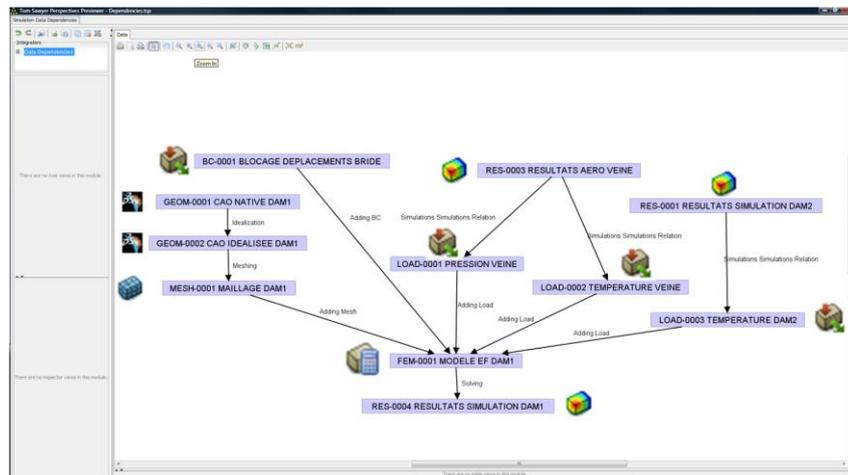


Figure 43. Implémentation du réseau de dépendances dans le logiciel DS ENOVIA SMARTEAM

Cette structuration a donné lieu à trois communications en conférences ([IC20, IC24, IC25]). Ces travaux, qui ont été menés avant mon intégration dans l'équipe SIA sont moins reliés à la problématique de gestion des données pour le produit tout au long de son cycle de vie. Pour autant ils ont permis de me former aux réseaux de dépendances de données que j'ai utilisés par la suite dans le cadre du projet PLM-EDF [Post-Doc1] mené en partenariat avec le CNEN (Centre National d'Équipement Nucléaire, unité d'ingénierie d'EDF) et Arts et Métiers Paristech.

Ce deuxième projet s'est intéressé à la gestion des données techniques de centrales de production d'électricité gérées par le groupe EDF, dans un cadre d'ingénierie système. Dans ce cadre, le produit considéré est la centrale en elle-même, dont il faut gérer les données associées. Ces installations ayant un cycle de vie s'étalant sur plusieurs dizaines d'années, sont accompagnées chez EDF d'un référentiel numérique, « compagnon documentaire » permettant d'avoir une vue précise de leurs architectures fonctionnelles et organiques. Les objectifs du projet PLM EDF étaient de compléter ce référentiel numérique par une couche Ingénierie

Système adaptée à l'ingénierie nucléaire. Cette couche devait pouvoir formaliser et valider formellement les exigences de sûreté de l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) sur ce référentiel complété lors du processus de conception, mais aussi de vérifier que ces exigences soient toujours respectées tout au long du cycle de vie de la centrale, par exemple lors d'opérations de maintenance. L'approche dans ce cadre a été « d'outiller » le référentiel numérique EDF par des objets capitalisant la démarche d'ingénierie système tels que les exigences, fonctions ou flux, et de réaliser à l'aide d'un réseau de dépendances le graphe liant toutes ces données.

Des modèles simplifiés sont illustrés figure 44.

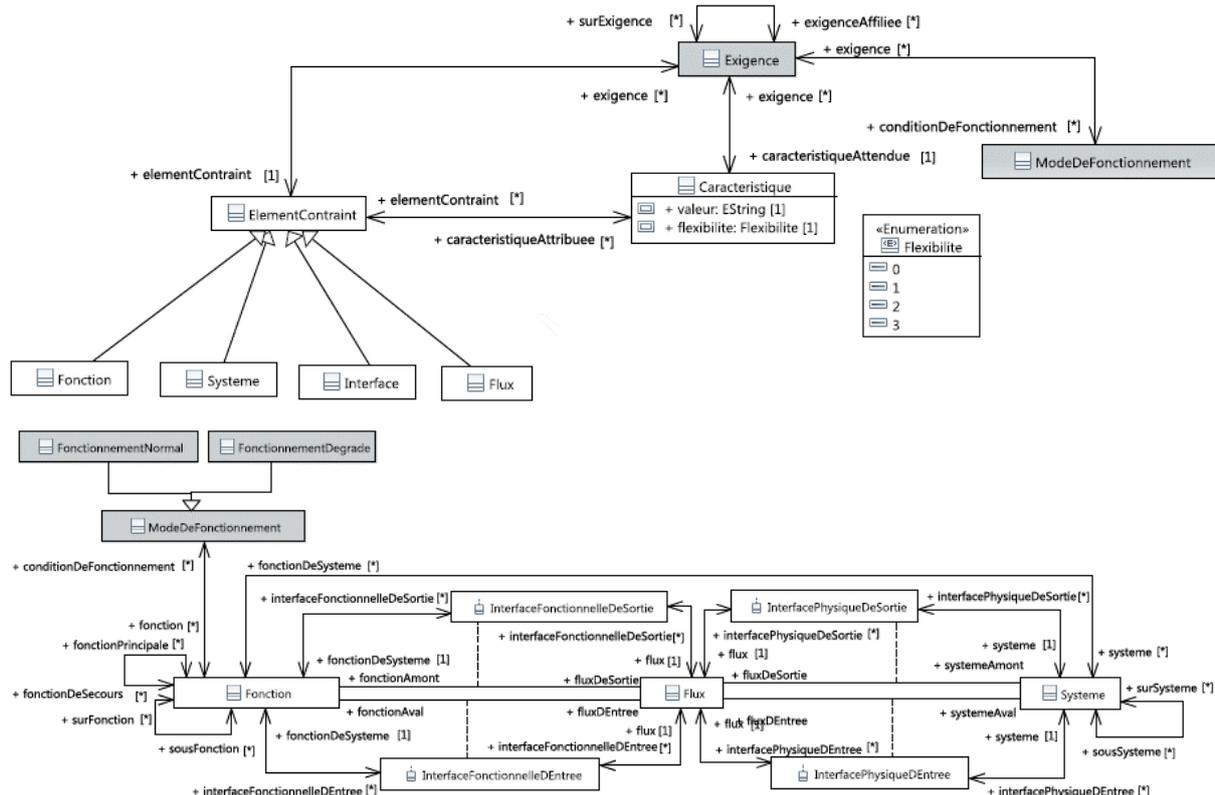


Figure 44. Modèles de données simplifiés proposés pour le projet PLM EDF

Le développement d'un prototype basé sur le référentiel numérique EDF a permis de mettre en pratique et d'éprouver le concept sur des cas d'études complexes où le facteur d'échelle était important, et a surtout montré l'intérêt industriel d'avoir une gestion long terme du réseau de dépendances d'un système. Contrairement aux approches classiques de réseau de dépendances, la construction du réseau est dans ce projet complètement implicite et s'effectue en même temps que le processus d'ingénierie système de manière partagée entre les différents partenaires.

On voit aussi dans ce projet une interaction entre la maquette numérique virtuelle et le système réel, puisque le référentiel numérique doit pouvoir être mis à jour par des informations provenant du système réel, lors d'opérations de maintenance par exemple. Ainsi, le changement d'une pompe sur le système réel est propagé jusqu'au niveau des exigences du référentiel d'ingénierie système, afin de valider que ce changement ne vienne pas invalider une exigence.

### **Action de Recherche n°3 : Synchronisation sémantique de la réplique numérique avec des informations provenant de son homologue physique**

Dans cette action de recherche, le système physique est composé de produits intelligents capables d'envoyer des données au système d'information, réplique du système physique. Nous avons utilisé cette approche dans le cadre de l'amélioration du processus constructif. En effet, si l'interopérabilité des données par l'intermédiaire de formats d'échange neutres et de mapping permet de faciliter la communication entre acteurs de ce processus, elle ne donne pas d'outils d'amélioration de la productivité en construction, laquelle passe nécessairement par la prise en compte de l'axe temporel.

Après avoir abordé la modélisation des informations 3D (cf. Action de Recherche 1), nous nous sommes donc intéressés à la modélisation 4D (3 dimensions géométriques + temps) pour différentes raisons : premièrement, la norme IFC propose une extension dite *Process* permettant de lier un planning aux objets du modèle IFC 3D. Par ailleurs, s'intéresser à la modélisation 4D laisse entrevoir de possibles applications en gestion du chantier de construction, qui reste encore un secteur où la gestion industrielle peut apporter des gains conséquents. De nombreuses applications de la modélisation 4D sont possibles (simulation du processus constructif, optimisation du processus de construction avec prise en compte de contraintes géométriques, intégration des contraintes de construction dans le processus de conception, ...). Fort de nos travaux précédents sur la synchronisation de données, nous avons investigué la possibilité de synchroniser une maquette numérique 4D avec des informations qui proviendraient de produits et ressources intelligents présents sur le site de construction. La maquette synchronisée pourrait alors être comparée avec la maquette numérique planifiée de manière à déterminer les écarts entre elles. En cas de retards trop importants, la maquette numérique synchronisée pourrait aussi être utilisée pour relancer une optimisation du processus constructif. L'ensemble du cadre envisagé est détaillé figure 45. Dans le cadre du master d'Imen Bouzarkouna, nous avons établi une première contribution à cette action de recherche, en travaillant sur l'étape de synchronisation seulement.

La thèse de Yannick Kibamba ainsi que le projet PLM EDF ont montré qu'il est possible de considérer les relations entre les données du produit comme des dépendances. De plus, l'expérience PLM EDF nous a permis d'aborder brièvement les ontologies avec le mécanisme d'inférence. Pour finir, la norme IFC qui supporte déjà une modélisation 4D possède un alter-ego ontologique nommé *IfcOwl* en passe de devenir une norme aussi. Dans toute ontologie, les données sont représentées par réseaux de dépendances sur lesquels il est possible d'exécuter des règles par un mécanisme d'inférence. La contribution du master a donc été d'utiliser l'ontologie *IfcOwl* couplé à des règles de classification pour essayer d'obtenir une synchronisation de la maquette BIM 4D.

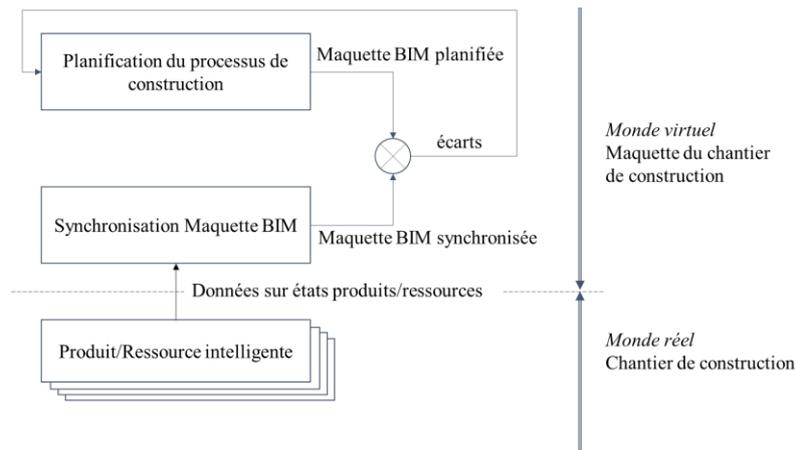


Figure 45. Synchronisation maquette numérique BIM 4D

L'extension *Process* de l'ontologie *IfcOwl* est un paquetage contenant entre autres les entités *IfcTask* et *IfcWorkSchedule*. *IfcTask* est une entité décrivant une tâche d'un processus de construction, et *IfcWorkSchedule* représente l'ensemble du planning de construction. En utilisant les relations adéquates, il est possible de représenter le planning de construction avec cette ontologie et de lier chacune des tâches du planning à des éléments du modèle 3D (*IfcProduct*). Une des hypothèses du travail du master a donc été de considérer qu'une tâche était terminée lorsque l'ensemble des éléments 3D lui étant associé était dans la position finale. Nous avons considéré que cette information est renvoyée par un statut « élément en place », venant du chantier de construction et émise par un produit intelligent (l'élément lui-même étant capable de vérifier sa bonne mise en place) ou par une ressource intelligente capable de notifier à la maquette numérique que l'élément a bien atteint sa destination finale.

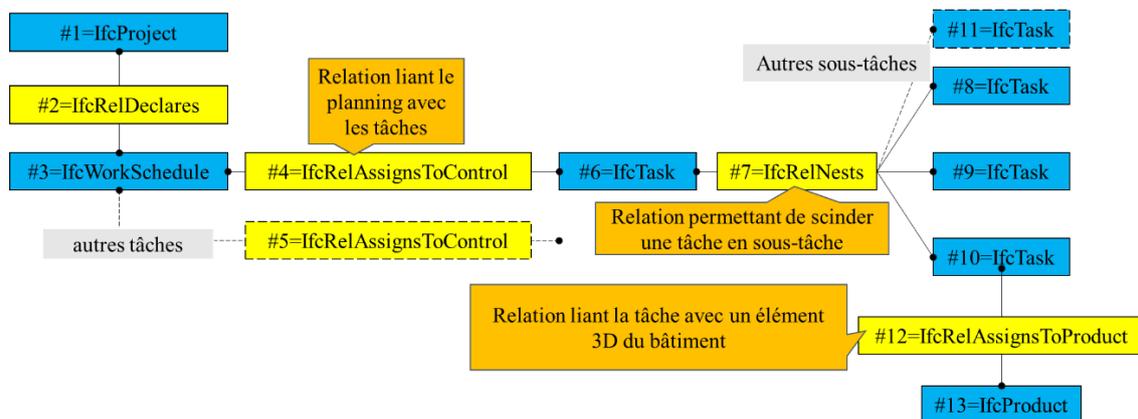


Figure 46. Extrait de l'extension *Process* de l'ontologie *IfcOwl*.

A partir de la structure de données exposée figure 46 et des hypothèses susmentionnées, il a été possible de compléter l'ontologie *IfcOwl* par des règles de classification permettant d'extraire de l'ontologie l'ensemble des tâches, terminées ou non, en fonction de l'état des produits auxquels elles sont liées. Les résultats obtenus sont prometteurs mais n'ont pas encore été éprouvés sur un cas d'utilisation réel (à minima une maquette numérique 4D de grande taille).

### **Action de Recherche n°4 : Synchronisation des données entre le produit et les bases de données distantes.**

Dans le cadre de cette action, nous nous sommes attachés à étudier le niveau 3 de synchronisation de la classification de (Harrison et Parlikad, 2006). Une première contribution à la synchronisation des données a été de formaliser les échanges entre le produit et les bases de données locales et distantes auxquelles il peut accéder. Nous avons considéré que, tout au long de son cycle de vie, le produit passe par des *points de synchronisation* (lecture/écriture de données), essentiellement de deux types : points de synchronisation connectés (accessibilité aux bases de données distantes et locales) et déconnectés (accessibilité aux bases de données locales).

En fonction de la situation, les processus de synchronisation nécessaires ont été détaillés. Ils se composent de plusieurs opérations élémentaires que sont la lecture des données depuis la produit (1a/1b), la mise à jour de l'information sur les différentes bases (2a/2b), la réconciliation de données (3a/5), la sélection de nouvelles données sur les bases considérées (3b), et l'écriture des données sur le produit (6). La séquence de ces opérations élémentaires est détaillée figure 47.

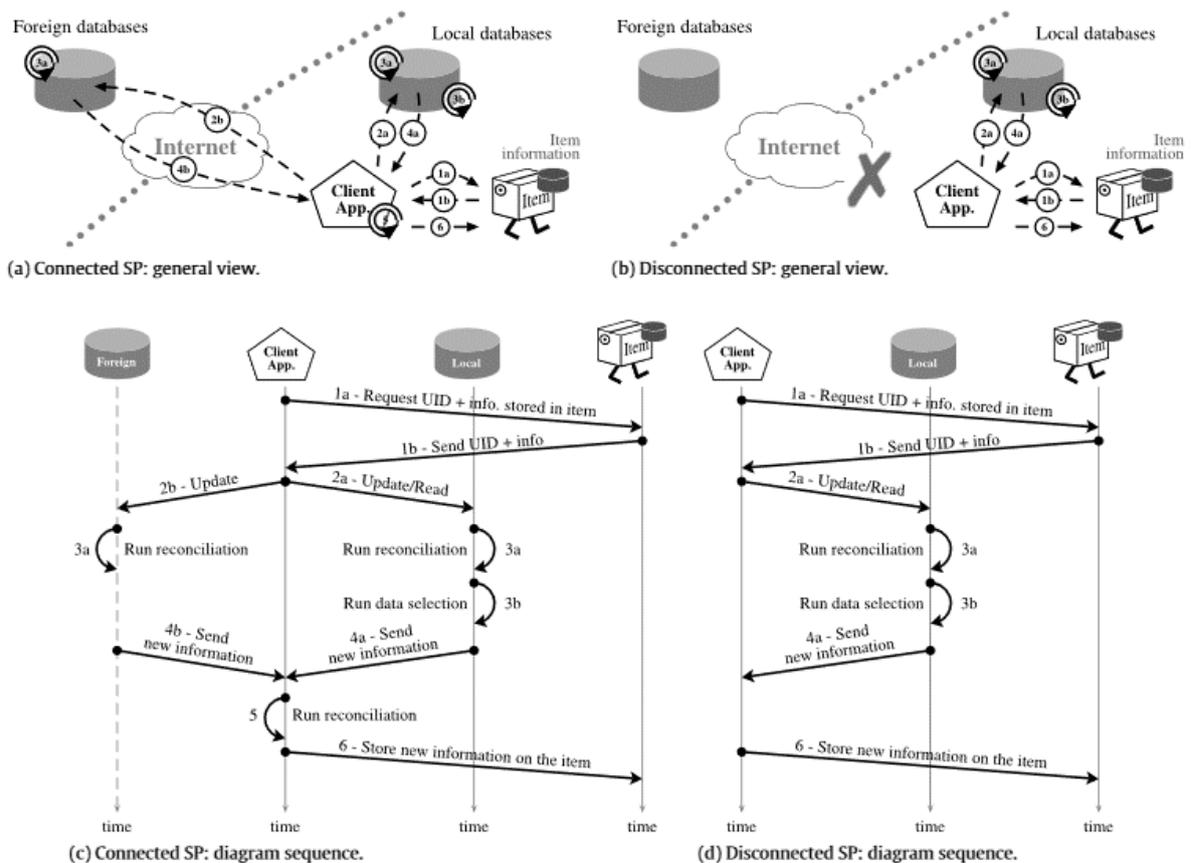


Figure 47. Diagrammes de séquence des opérations élémentaires en fonction du type de point de synchronisation rencontré (issu de [J7])

L'ensemble des opérations élémentaires a été spécifié, et des solutions techniques énoncées pour la lecture et écriture de données sur le produit (1a/6) ainsi que pour la sélection de données (3b). Ces travaux ont fait l'objet d'une publication en revue [J7].

Les séquences spécifiées ont servi de base à la proposition d'un protocole de synchronisation de données entre produits intelligents tout au long de leur cycle de vie, reposant sur les normes O-MI (Open Messaging Interface<sup>5</sup>) et O-DF (Open Data Format<sup>6</sup>), regroupées toutes les deux dans une initiative nommée QLM pour *Quantum Lifecycle Management* à l'époque des travaux menés par Kary Främling avec qui nous collaborions à AALTO. L'utilisation de ces standards, couplés à des techniques de synchronisation de données issues du monde des bases de données réparties, a permis de faire émerger la spécification d'une solution technologique permettant de faire de la synchronisation de données entre objets intelligents. Elle a fait l'objet d'une publication dans [J5].

**Table 10. Récapitulatif des contributions sur le verrou « Synchronisation des données »**

Verrous	Manques relevés	Actions de recherche	Contributions scientifique
Synchronisation des données	<p><i>Synchronisation Sémantique :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en œuvre du réseau de dépendances séparée du système d'information d'origine ;</li> <li>- Mécanisme de propagation découplée de la base de données ;</li> <li>- Pas de travaux traitant la liaison avec le système réel et a fortiori les produits intelligents.</li> </ul>	<p><u>Action de recherche n°2 :</u></p> <p>Modélisation des données produit avec application aux réseaux de dépendances</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validation des réseaux de dépendance sur des cas industriels avec développement de prototypes ;</li> <li>- Construction du réseau de dépendances implicite et partagée entre les acteurs ;</li> <li>- Constitution d'un référentiel lié avec le système réel.</li> </ul>
		<p><u>Action de recherche n°3 :</u></p> <p>Synchronisation de la réplique numérique avec des données provenant de son homologue physique</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réseau de dépendances formalisé par une ontologie IfcOwl 4D ;</li> <li>- Utilisation du mécanisme d'inférence des ontologies pour la synchronisation.</li> </ul>
	<p><i>Synchronisation Technique :</i></p> <p>Protocoles IoT tels que QLM (Kubler, Madhikermi et Främling, 2014) n'intègrent pas de mécanismes de gestion de la synchronisation &gt; 3.</p>	<p><u>Action de recherche n°4 :</u></p> <p>Synchronisation des données entre le produit et les bases de données distantes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spécifications du processus de synchronisation ;</li> <li>- Proposition d'algorithmes de synchronisation basés sur QLM utilisant les techniques de BDD réparties.</li> </ul>

Les différentes actions de recherche menées dans ce verrou ont fait avancer notre compréhension des mécanismes nécessaires à la synchronisation de données entre le produit intelligent (ou la matière communicante) et les systèmes d'information avec lesquels il communique. Les problèmes de synchronisation des répliques des mêmes données réparties sur l'ensemble du cycle de vie produit forcent à développer des solutions protocolaires complexes, dont la mise en place n'est pas simple. On peut aussi s'interroger sur la « scalabilité » de ce

<sup>5</sup> O-MI standard: <https://www2.opengroup.org/ogsys/catalog/C14B>

<sup>6</sup> O-DF standard: <https://www2.opengroup.org/ogsys/catalog/C14A>

type d'approches, face à des chaînes logistiques où le nombre d'acteurs peut se révéler très important. Aussi, l'approche « information portée par le produit » présente des limites lorsque des niveaux de synchronisation de données élevés sont demandés. D'un autre côté, le produit intelligent peut apporter dynamiquement de l'information pouvant mettre à jour le système d'information, et ainsi aider le système de pilotage. Encore faut-il que le système d'information recevant les informations soit capable de les comprendre dynamiquement et à la volée.

L'ensemble des contributions apportées au verrou « Synchronisation des données » est récapitulé table 10.

### 4.3 CONTRIBUTIONS AU THEME 2, « GESTION DE DONNEES DANS LA MATIERE COMMUNICANTE »

En 2009, fort de son expérience sur les produits intelligents, le CRAN débute les travaux sur la matière communicante. Nos travaux se sont articulés autour de deux thèses [Thèse2, Thèse3], d'un master [M2R1] et de collaborations. Ce thème regroupe les travaux correspondants à la partie inférieure de la figure 3 situé dans le premier chapitre « présentation du candidat » et rappelée ci-dessous, en haut de la figure 48.

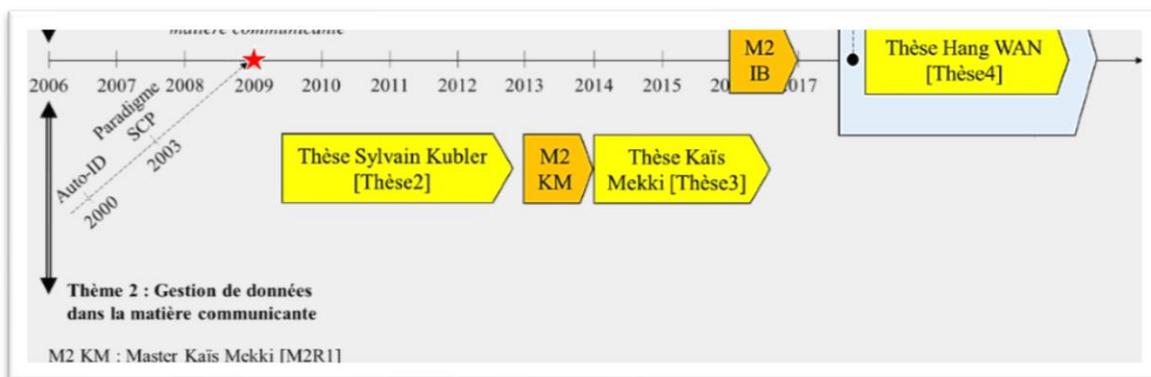


Figure 48. Travaux sur le thème 2

Au début de la thèse de Sylvain Kubler [Thèse2], et afin d'identifier les potentielles problématiques, une étude couplant analyse fonctionnelle et QFD a été réalisée avec pour objet d'étude les enjeux applicatifs et de recherche inhérents à ce nouveau paradigme qu'est la matière communicante [IC23]. Cette étude a conduit à mettre en évidence la nécessité de développer le système d'information embarqué dans la matière, capable de fournir aux utilisateurs des services spécifiques. La matière communicante est considérée comme un support d'information, sorte de disque dur capable de stocker/envoyer des données depuis/vers une base de données. L'analogie avec le disque dur fonctionne bien puisque comme sur un disque dur, la donnée n'est pas centralisée mais peut être répartie sur l'ensemble du matériau en fonction de certaines raisons (information localisée ou non, information critique devant être conservée même après modification de la matière, ...).

Tout au long de son cycle de vie, la matière va envoyer/stocker des données via des *points de synchronisation* (cf. action de recherche 4). Lors de phase d'écriture, les informations à déposer sur la matière vont être sélectionnées depuis la base de données pour être disséminées sur la

matière. Plus tard dans son cycle de vie, la matière pourra restituer ces informations lors de phases de lecture.

En extrapolant le concept, la matière communicante peut être réalisée en disséminant en masse dans le matériau des éléments de communication tels que des puces RFID (technique considérée pour la thèse de Sylvain Kubler [**Thèse2**] – matière *passive*<sup>7</sup>) ou des réseaux de nano-capteurs (hypothèse de la thèse de Kaïs Mekki [**Thèse3**] – matière *active*).

Les quantités de données que l'on peut embarquer sur la matière dépendent donc des capacités mémoire des éléments de communication insérés dans le matériau et de leur densité d'insertion. En effet, une puce RFID passive de petite taille peut stocker au maximum une dizaine de kbits et un nanocapteur tel que SensorCube (Diall *et al.*, 2007) (nano-capteur expérimental d'un volume d'1cm<sup>3</sup>) a une mémoire de 120ko. On est donc bien loin des capacités mémoires de la moindre clef USB.

De cette analyse découlent les deux verrous scientifiques (3) et (4) déjà énoncés lors de l'introduction du chapitre et relatifs, respectivement, à la *sélection de données* et à la *distribution de données* dans la matière communicante. Ces deux verrous vont être décrits dans la suite de cette partie.

#### **4.3.1 Verrou (3) - Mécanismes de sélection de données et évaluation de la pertinence**

La « sélection des données » consiste à estimer quelles sont les données, présentes dans la base de données de l'acteur exécutant le processus, qui sont d'intérêt pour les acteurs suivants de la chaîne logistique. Cette sélection peut se faire selon plusieurs critères (type de produits, contexte de son utilisation ...). Cependant, sa réalisation « à la main » peut se révéler longue et fastidieuse. Pour automatiser ce processus de distribution, il faut pouvoir conduire cette sélection automatiquement.

Pour réaliser ce processus, nous considérons d'après notre état de l'art que les approches dites de « réduction de données » sont les plus pertinentes par rapport à notre contexte. Pour rappel, elles ont comme objectif d'opérer ce processus de sélection en prenant en compte la limitation mémoire des équipements mobiles. En particulier, les travaux de (Chan, 2005) utilisent la notion de contexte de distribution de données dans les environnements mobiles pour évaluer la pertinence de distribuer une donnée sur les différents sites mobiles. Ils introduisent des critères permettant de calculer un indice de pertinence et les utilisent pour classer les données par ordre décroissant, de la donnée la plus pertinente à la moins pertinente pour l'opération de stockage dans le site mobile.

Ainsi, nous avons dans un premier temps cherché à adapter ces méthodes de sélection à la matière communicante, en définissant nos propres critères. Pour calculer les poids des différents

---

<sup>7</sup> Cf. 3.4 « Distribution des données » pour un rappel de la différence entre matière passive et active.

critères, nous avons finalement opté pour un algorithme d'aide à la décision flou, basé sur la méthode Fuzzy-AHP développée par (Chang, 1996). Cet algorithme a été mis en œuvre sur un cas pratique et a permis de valider la faisabilité du concept. Cependant, les expérimentations faites avec cette méthode ont montré des erreurs théoriques importantes, relatives à la consistance des résultats proposés. Afin de mener à bien notre travail, nous avons donc conçu notre propre méthode Fuzzy-AHP, elle aussi basée sur la logique floue. Ce verrou a donc été le cadre de deux actions de recherche :

- Action de recherche n°5 : Développement de méthodes de sélection d'informations pour la matière communicante ;
- Action de recherche n°6 : Développement d'une nouvelle méthode Fuzzy-AHP

### **Action de recherche n°5 : Développement de méthodes de sélection d'informations pour la matière communicante**

Une première action de recherche a donc été d'adapter les approches de la communauté informatique à notre contexte de sélection de données nécessaires pour la matière communicante. Nous avons repris partiellement la classification de (Chan et Roddick, 2005) en reprenant et adaptant 3 des 8 critères, à savoir :

- *Enumeration* ( $C_e$ ) : ce critère autorise l'utilisateur à sélectionner dans les tables de la base de données les attributs qu'il juge importants à stocker sur le produit. Cette énumération est réalisée par les utilisateurs en aval de l'opération d'écriture ;
- *Model-based* ( $C_m$ ) : ce critère permet de tenir compte des distances entre données au sein du modèle de données. Nous proposons de pénaliser les données distantes de la table produit<sup>8</sup> car cette table est le centre de nos préoccupations. Plus l'information est distante de la table produit, moins elle est corrélée et par conséquent, moins elle est pertinente (la distance ici utilisée correspond au nombre minimal de relations qu'il faut parcourir pour atteindre cette table depuis la table produit) ;
- *Contextual* ( $C_c$ ) : ce critère permet de tenir compte du cycle de vie du produit et des différents types de systèmes d'information avec lesquels il peut interagir au cours de son évolution. Contrairement au critère *Enumeration* et *Model-Based*, les pondérations sur les informations sont spécifiées sur la base de recommandations d'experts ayant une connaissance globale du cycle de vie du produit (p. ex. sous forme de consensus d'experts et/ou sur la base de travaux de la littérature).

Chaque data item issu de la fragmentation est donc évalué selon ces 3 critères et les valeurs obtenues, comprise dans  $[0 ; 1]$  et appelées *priorités*, sont alors agrégées pour obtenir un indice de pertinence globale. Plus la priorité du data item est haute, et plus il est pertinent de le stocker sur la matière communicante.

La méthode d'évaluation dépend aussi du critère sélectionné. Par exemple, pour le critère *Model-Based*, la priorité  $\phi_m(l)$  d'un data item  $l$  situé à une distance  $d$  de la table produit se calcule à l'aide de l'équation (3), avec  $k$  une constante et  $d$  la distance. Le coefficient  $k$  peut être ajusté par l'expert (figure 49).

---

<sup>8</sup> La table produit correspond à la table où se trouve l'identifiant du produit.

$$\phi_m(l) = k^{-d} \quad \text{avec } k \in [1; +\infty] \quad d \in \mathbb{N} \quad (3)$$

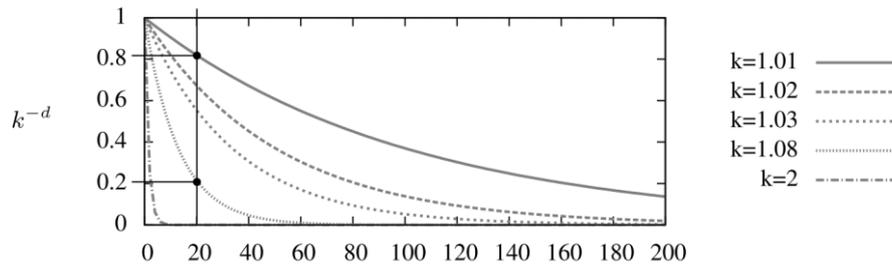


Figure 49. Effet du facteur  $k$  sur la valeur de la priorité en fonction de la distante  $d$

Afin de guider l'utilisateur dans son processus de sélection, nous avons proposé de pondérer l'importance de chaque critère par rapport à l'autre en l'utilisation de la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) introduite par (Saaty, 1990). En effet, une partie de cette approche propose d'évaluer l'importance de chaque critère par le biais d'une matrice de comparaison paire-à-paire, remplie par le(s) responsable(s) en charge du processus de sélection de données. Une matrice de comparaison paire-à-paire a la forme présentée figure 50.

$$\begin{array}{c}
 C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_M \\
 \begin{array}{c}
 C_1 \\
 C_2 \\
 \vdots \\
 C_M
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1M} \\
 s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2M} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 s_{M1} & s_{M2} & \dots & s_{MM}
 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad s_{ij} \in S, \quad s_{ji} = \begin{cases} 1 & i = j \\ s_{ij}^{-1} & i \neq j \end{cases}$$

Figure 50. Matrice de comparaison paire-à-paire

Elle répertorie en abscisse et en ordonnée la liste des critères considérés. Pour chaque couple de critères  $(C_i, C_j)$ , le responsable décisionnaire indique une valeur comprise entre 1 et 9. Ces valeurs, correspondant à l'échelle de Saaty, permettent de mesurer la relative importance d'un critère par rapport à un autre (cf. Table 11).

Table 11. Echelle de Saaty		
Échelle	Définition	Description
1	Importance égale	Deux critères contribuent à l'objectif de manière égale
3	Faible importance	Un critère est légèrement favorisé par rapport à un autre
5	Forte importance	Un critère est fortement favorisé par rapport à un autre
7	Très forte importance	Un critère est très fortement favorisé par rapport à un autre
9	Importance extrême	Un critère est favorisé de façon maximale par rapport à un autre et cette affirmation est valide au plus haut point

Une fois remplie, il suffit de calculer le vecteur propre  $V=(w_1, w_2, \dots, w_M)^{-1}$  associé à la valeur propre positive maximale de la matrice paire-à-paire, chaque  $w_i$  représentant l'importance du critère  $C_i$ . La pertinence  $P(l)$  d'un data item  $l$  est par la suite égale à (4) :

$$P(l) = \sum_i^i w_i \cdot \phi_i(l) \quad (4)$$

Cette méthode a été publiée dans 1 conférence [IC16] et 1 revue [J10].

Cette première approche n'offrait pas la flexibilité nécessaire pour pouvoir prendre en compte les incertitudes, imprécisions de l'acteur l'utilisant. Nous avons donc complété notre précédente méthode en nous inspirant des apports de Fuzzy-AHP (Chang, 1996) afin de construire un algorithme de sélection de données basé sur des indicateurs flous. Ce travail a donné lieu à deux communications en conférences ([IC17, IC18]) et une revue [J9], lequel article décrit l'algorithme présenté figure 51. Par la suite, nous avons proposé une amélioration de la méthode, transcrite dans une communication en conférence [IC16] et une autre revue [J8].

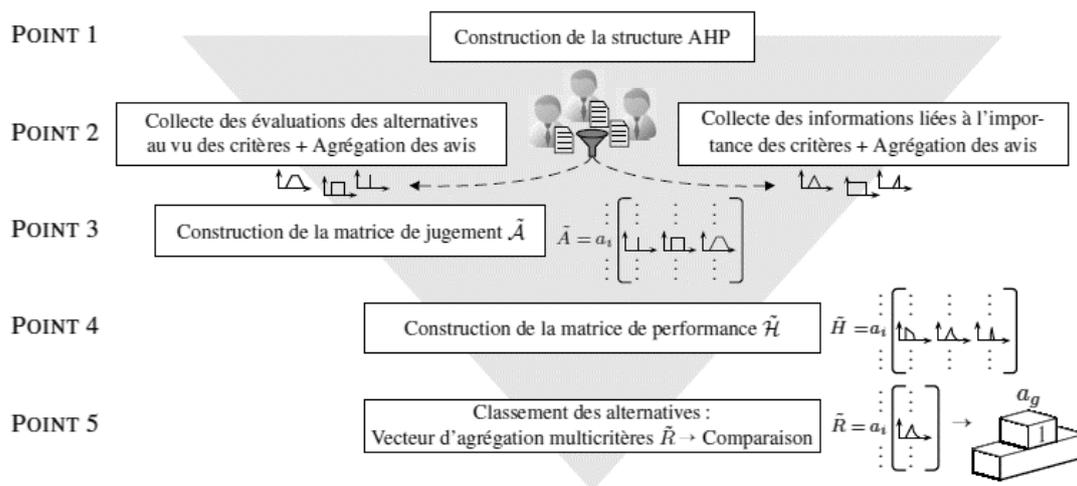


Figure 51. Algorithme de sélection de données pertinentes

En marge du travail principal, nous avons aussi essayé d'évaluer quel serait l'impact que pourrait avoir l'utilisation de produits communicants (i.e. faits de matière communicante) sur les performances d'un système temps-réel (comme une chaîne de fabrication par exemple) où les temps d'accès à l'information doivent être les plus faibles possibles. Cette évaluation s'est effectuée en couplant deux outils (CPN tools, simulant le réseau de pétri représentant la chaîne de fabrication à étudier, et OMNET++, permettant de simuler le réseau de communications). Les résultats, publiés dans un chapitre de livre [O4] ont permis de montrer qu'en situation d'usage normal (sans défaillances de l'ensemble {réseau de communication + base de données distante} et avec un nombre de produits raisonnables), mettre des informations sur le produit communicant a tendance à diminuer les performances du système global (le temps de lecture de l'information sur le produit communicant ayant tendance à « ralentir » le système global). Cependant, si on introduit des perturbations sur le réseau ou des pannes sur le système d'information, l'utilisation de produits communicants permet de conserver le même niveau de performance, proche de la situation nominale.

### **Action de recherche n°6 : travaux sur Fuzzy-AHP**

Comme décrit précédemment, l'utilisation de la méthode *Fuzzy Extent Analysis* (Chang, 1996) nous a permis de détecter des problèmes sous-jacents théoriques importants, relative à la méthode de calcul des différentes priorités. Nous avons alors mené une étude poussée de la littérature sur tous les articles proposant soit une méthode essayant d'adapter AHP en logique

floue (méthodes regroupées sous l'appellation *Fuzzy-AHP*), soit utilisant une de ces approches sur des cas d'application divers et variés. Ce travail bibliographique important a abouti à 1 revue [J2] qui a permis de recenser de manière exhaustive l'ensemble des approches Fuzzy-AHP et leurs domaines d'applications. Ces méthodes constituent et somment des matrices paires-à-paires floues, i.e. où chaque élément de la matrice est un nombre flou. Puis, par défuzzification, elles obtiennent le vecteur poids final.

Notre étude a permis de recenser plus de 200 matrices paire-à-paire floues générées à l'aide de méthodes Fuzzy-AHP ainsi que les priorités calculées dans ces différents papiers. En étudiant ces données, nous sommes arrivés au constat que nombre de ces matrices ne respectent pas l'axiome de consistance à la base d'AHP. Le non-respect de cet axiome a pour conséquence que les priorités obtenues sont invalides. Afin de permettre à n'importe quel chercheur de vérifier nos résultats, nous avons mis en ligne l'ensemble des matrices paire-à-paire présentes dans les papiers de la littérature. Ce site web<sup>9</sup>, dont une image est présentée figure 52, permet de naviguer entre les différentes matrices par le biais de différents filtres comme la date du papier où la matrice figure, la taille de la matrice, le thème du papier, etc. Il est aussi possible de les télécharger.

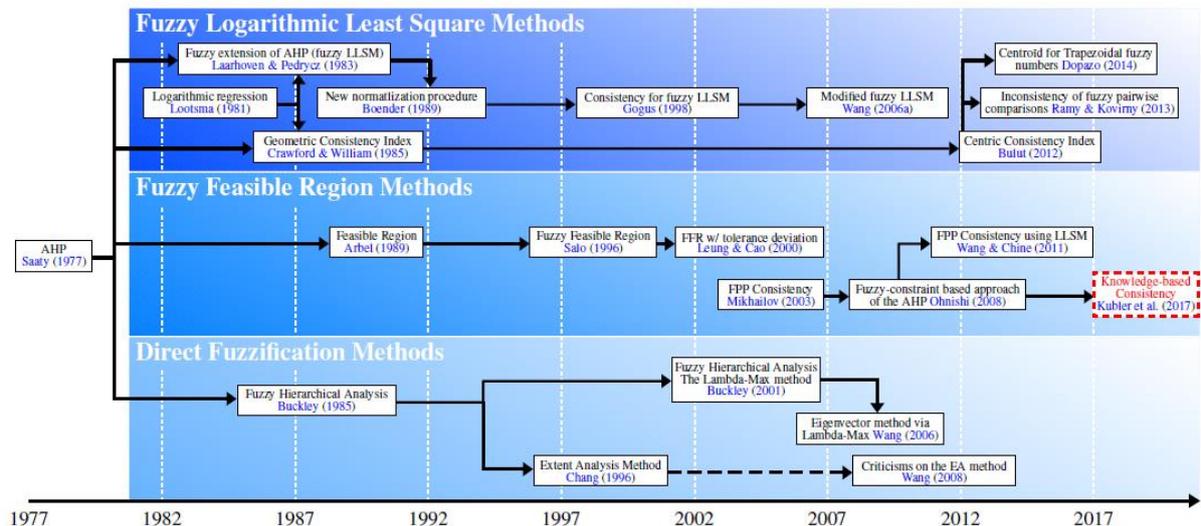
Name	Area	SubArea	Year	Size	Theme	OtherTools	Download	URL
Akkaya2015	Education	Industrial engineering sector prospecting	2015	10x10	Evaluation	MOORA	Download (.mat)	URL
Chen2015a	Education	Teaching performance	2015	6x6	Evaluation	None	Download (.mat)	URL
Chen2015b	Education	Teaching performance	2015	3x3	Evaluation	None	Download (.mat)	URL
Das2015	Education	Technical education system evaluation	2015	5x5	Evaluation	None	Download (.mat)	URL
Duru2012	Education	FAHP model definition	2012	6x6	Priority	RS-FAHP	Download (.mat)	URL

Figure 52. Image du site dédié aux matrices Fuzzy-AHP

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à définir une méthode Fuzzy-AHP qui respecterait l'axiome de consistance issu d'AHP. Cette méthode, baptisée *Knowledge-Based Consistency Index*, permet de calculer l'indice de consistance d'une matrice floue et de générer la meilleure solution nette à partir de cette matrice floue.

<sup>9</sup> <http://fahptestbed.jeremy-robert.fr/#/>

La figure 53 présente une chronologie des différentes méthodes Fuzzy-AHP proposées dans la littérature. Elle permet d'apprécier les 3 grands axes dont chacune des variantes Fuzzy-AHP dépend. Les approches de type *Fuzzy Logarithmic Least Square* sont basées sur une fuzzification d'AHP, utilisant la régression logarithmique. En plus de ne pas toujours donner des résultats consistants, elles nécessitent de refaire le programme d'optimisation en fonction de la matrice d'entrée. Les approches *Direct Fuzzification* sont décriées par la communauté scientifique, car elles sont conçues en *fuzzifiant* directement la méthode AHP, ce qui ne semble pas avoir de sens mathématiquement parlant (Wang, Luo et Hua, 2008; Dubois, 2011). La méthode *Extent Analysis* fait d'ailleurs partie de cette famille, ce qui corrobore nos résultats expérimentaux initiaux. Les approches *Fuzzy Feasible Region* ont été reconnues comme étant les plus fiables. Cependant, nos travaux ont montré que la complexité en temps de calcul de ces méthodes est quadratique par rapport à la taille de la matrice en entrée, et la recherche d'une solution peut nécessiter plusieurs heures pour des matrices de dimension 13. L'approche que nous avons proposée a pour intérêt de respecter l'axiome de consistance (la preuve mathématique a été fournie) et d'avoir un temps de calcul linéaire. Ces travaux ont été publiés en conférence [IC5] et soumis à un numéro spécial de la revue *Knowledge-Based Systems*.



L'ensemble des contributions scientifiques sur ce verrou est récapitulé table 12.

#### 4.3.2 Verrou (4) - Distribution de données sur la matière communicante

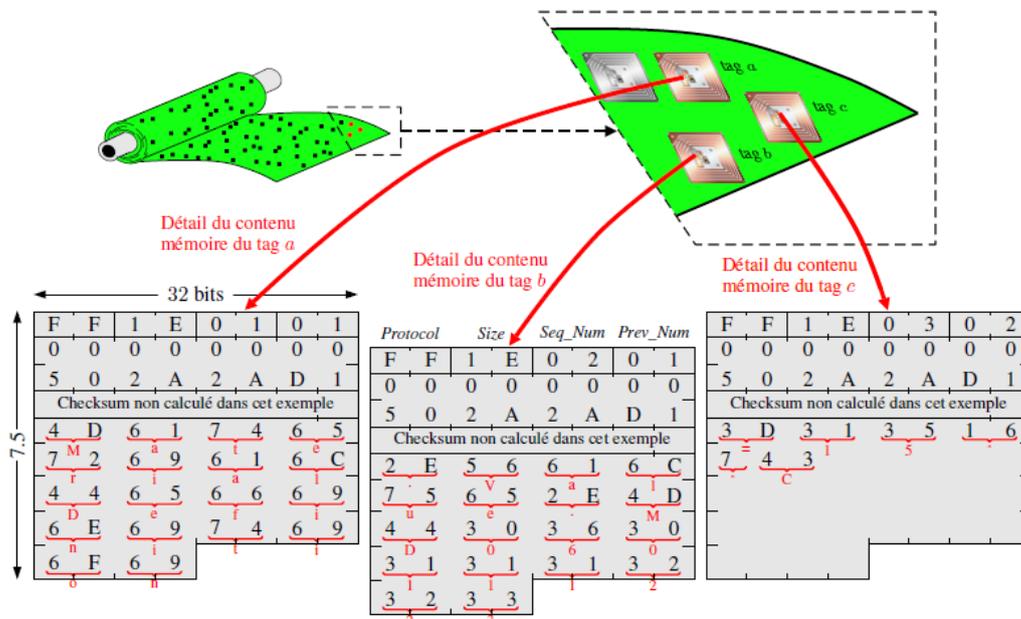
L'ensemble des data items sélectionnés est alors distribué sur la matière communicante. Cette étape, appelée « distribution des données dans la matière communicante » dépend de l'architecture technologique du matériau communicant envisagé. Comme expliqué précédemment, le concept de matière communicante est en rupture avec toutes les technologies que nous connaissons actuellement puisque l'on considère que la matière est communicante intrinsèquement (en son sein). On passe donc d'un stockage localisé de l'information (par le biais d'une puce RFID par exemple) à un stockage continu de masse. Actuellement, les technologies nécessaires pour réaliser pleinement ce concept de matière communicante n'existent pas, car il faudrait en effet pouvoir répartir de manière continue, ou du moins à une maille si fine qu'elle soit négligeable, les informations sur la matière. Il n'est actuellement pas

technologiquement possible d'implémenter complètement le concept, mais seulement de s'en rapprocher en dispersant dans la matière des centaines voire des milliers de composants électroniques communicants.

**Table 12. Récapitulatif des contributions sur le verrou « Sélection de données »**

Verrous	Manques relevés	Actions de recherche	Contributions scientifique
Sélection des données	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adaptation à notre contexte nécessaire ;</li> <li>- Pas de processus d'aide à la décision pour l'utilisateur en charge de paramétrer le processus de réduction de données.</li> </ul>	<p><u>Action de recherche 5 :</u> Développement de méthodes de sélection d'informations pour la matière communicante</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposition d'un processus de sélection adapté à notre contexte (définition de critères et de méthodes d'évaluation)</li> <li>- Utilisation de méthodes d'aide à la décision multi-critères pour régler les valeurs de critères (AHP, Fuzzy-AHP)</li> </ul>
		<p><u>Action de recherche 6 :</u> Travaux sur Fuzzy-AHP</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démonstration par l'exemple que <i>Fuzzy-Extent Analysis</i> est une méthode erronée (évaluation sur plus de 200 cas) ;</li> <li>- Proposition d'une nouvelle méthode Fuzzy-AHP, respectant l'axiome de consistance, plus rapide que les méthodes correctes connues.</li> </ul>

Dans le premier prototype de matière communicante décrit dans [IC19], la matière est donc dite « passive ».



**Figure 54. Distribution de l'information dans la matière passive**

La distribution des données dans ce textile (figure 54) se fait en plusieurs temps : *i*) découpe de l'information en morceaux compatibles avec la mémoire des RFID implantés, puis *ii*) répartition des morceaux sur le matériau. Afin de pouvoir reconstruire l'information découpée,

il est nécessaire de définir un protocole permettant de retrouver ses différents morceaux. L'architecture logicielle et le protocole développé ont été publiés dans une conférence [IC22] et une revue [J7]. Deux prototypes de matière communicante (textile et fibres de verre), incluant des puces RFID, ont été conçus pour tester les outils développés.

Ces premiers essais de prototype basés sur l'utilisation de puces RFID sont intéressants, mais leur mise en œuvre et utilisation sont fastidieuses. En effet, il est nécessaire de développer une architecture de communication adaptée puisque les lectures/écritures sur des puces RFID passives nécessitent que le lecteur RFID soit à une distance très courte (moins d'1 mètre avec la technologie utilisée) de la puce. Dans le cas de notre prototype textile par exemple, il a fallu mettre en place un portique de lecture spécifique. De plus, la matière communicante n'est utilisée que comme un réceptacle d'informations, alors qu'elle pourrait potentiellement générer des informations utiles pour les acteurs du cycle de vie, ayant trait par exemple à son environnement (température, humidité...) mais surtout à sa structure interne (contraintes, fissures, ...) ou à ses dimensions (longueur, largeur, hauteur ...).

L'idée du master [M2R1] puis de la thèse de Kais Mekki [Thèse3] a donc été de concevoir des algorithmes de distribution et de reconstruction de données ayant comme support une matière communicante active. Ces travaux poursuivent et complètent ceux de Sylvain Kubler puisque les données sélectionnées et classées par ordre de pertinence à l'aide des algorithmes de Kubler sont ensuite découpées en morceaux compatibles avec la mémoire des nœuds de capteurs et distribuées dans le matériau. Puis, lors de la phase de lecture, les différents morceaux sont alors recherchés dans le matériau pour être agrégés.

La problématique de distribution est ici différente puisqu'il devient possible d'utiliser le réseau pour propager l'information dans tous les nano-capteurs le composant. La distribution des données sur le matériau joue un rôle crucial dans sa tolérance aux transformations physiques : si une donnée est recopiée partout sur le matériau, celui-ci pourra subir des opérations de découpage sans perte d'informations, puisque les fragments résultants auront toujours la donnée de départ. Ainsi, la gestion de la distribution conditionne la propriété de conservation de l'information en regard des transformations physiques endurées. Dans la suite, nous détaillons les protocoles développés pour les phases d'écriture et de lecture sur/depuis la matière communicante.

### **Phase d'écriture**

L'état de l'art précédent a montré l'existence de plusieurs classes de protocoles d'écriture et de lecture dans les réseaux de capteurs. Après avoir commencé par développer des protocoles de distribution à stockage déterministe (dit « counter-based »), notre étude s'est orientée vers les protocoles proactifs non structurés, à stockage probabiliste (comme DEEP, RaWMS et Supple), nous avons proposé le protocole « USEE », pour *Uniform Storage and Energy Efficient data dissemination protocol*, où la probabilité de stockage de l'information dans le nano-capteur correspond à la pertinence de cette information calculée lors de l'étape de sélection des données. Ainsi, une donnée plus pertinente qu'une autre est donc stockée dans plus de nano-capteurs.

La figure 55 montre plusieurs exemples de distribution probabiliste de données. Dans chacune des figures, un point coloré représente un nano-capteur de la grille ayant stocké un fragment de l'information (dans notre exemple, l'information à disséminer est constitué de trois fragments, ce qui explique les 3 couleurs différentes, le point rouge indiquant le nano-capteur en liaison avec l'extérieur, recevant les fragments et les émettant dans le réseau). Notre approche permet de gérer le nombre de nœuds stockant les fragments en fonction de la pertinence de l'information initiale. Plus la pertinence de l'information (notée  $P$ ) augmente, plus le nombre de nano-capteurs stockant l'information augmente.

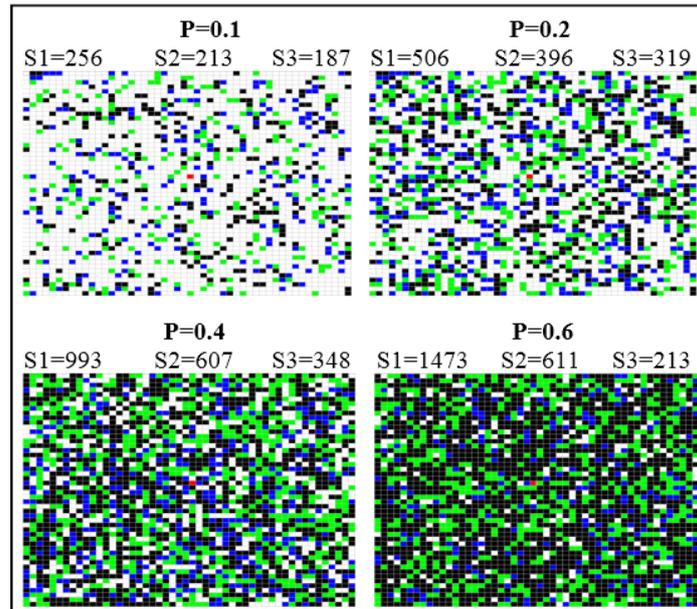


Figure 55. Exemples de distribution de données dans la matière communicante

Le protocole USEE a été comparé aux protocoles DEEP, RaWMS et SUPPLE en termes d'uniformité de réplcation, de taux de réplcation, de délai de dissémination, de nombre de communications et de consommation d'énergie. Les simulations effectuées sur le logiciel CASTALIA OMNET++ ont montré que USEE est globalement le protocole le plus performant sur la matière communicante.

### Phase de lecture

L'état de l'art a montré que les protocoles de lecture sont inefficaces lorsqu'ils sont couplés à des protocoles probabilistes. Pour cette raison, nous avons choisi une technique de transmission dans les réseaux de capteurs nommée *Random Walk* (Tian, Shen et Matsuzawa, 2006; Lima et Barros, 2007) qui consiste à transmettre des messages dans le réseau d'un nœud à l'autre (one to one) de manière aléatoire. Utiliser cette technique permet de développer un mécanisme de recherche efficace qui optimise la consommation d'énergie tout en évitant la duplication des réponses.

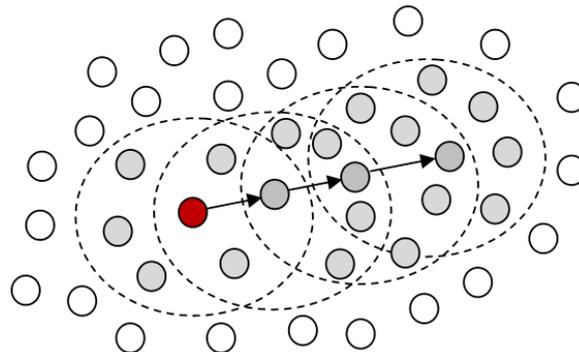
Le protocole obtenu, baptisé *RaWPG* pour *Random Walk and Pull Gossip*, se sert donc la répartition probabiliste de l'information sur la matière communicante et utilise un mécanisme de marche aléatoire (*Random Walk*), couplé à une communication localisée (*Pull Gossip*) entre

les nœuds du réseau, qui se retransmettent la requête de recherche (cf. figure 56). RaWPG soulage le réseau en ne l'inondant pas systématiquement. Il utilise la répartition probabiliste produite par USEE pour optimiser la consommation énergétique de la requête. Nous avons pu montrer qu'il est possible de quantifier le nombre de sauts  $m$  à réaliser dans la matière communicante afin de trouver l'information ayant une probabilité de présence  $p_v$  dans le voisinage de chaque nœud de la matière. Le calcul de la probabilité de présence  $p_v$  dans le voisinage se déduit de la probabilité de présence  $p$  de l'information dans chaque nœud de réseau, ainsi que de la taille  $n$  du voisinage de chaque nœud.  $p_v$  se calcule par la relation (5) :

$$p_v = 1 - \frac{C_{n(1-p)}^n}{C_N^n} \quad (5)$$

Le processus de recherche d'informations dans la matière communicante peut être modélisé par un schéma de Bernoulli de paramètres  $m$  et  $p_v$ . L'étude de ce schéma permet de déterminer la valeur  $m$  telle que la probabilité de trouver l'information soit supérieure à 99%, par la relation donnée équation (6).

$$m = \frac{-3}{\log(1 - p_v)} \quad (6)$$



**Figure 56. Mécanisme de recherche d'informations par le protocole RaWPG**

Le protocole RaWPG a été comparé au protocole MARP en termes de taux de succès, de taux de duplication, de nombre de communications et de consommation d'énergie. Le protocole RaWPG est globalement plus performant que MARP pour la lecture d'information sur la matière communicante.

Ces travaux ont fait l'objet de 3 revues [J1, J3, J4] et de 8 communications en conférence [IC1, IC3, IC4, IC7, IC10, IC12, IC14, IC15]. La table 13 récapitule les contributions scientifiques réalisées sur ce verrou.

**Table 13. Récapitulatif des contributions sur le verrou « Distribution de données »**

Verrous	Manques relevés	Actions de recherche	Contributions scientifique
Distribution des données	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protocoles de stockage ne prennent pas en compte la sémantique de la donnée.</li> <li>- Protocoles non adaptés lorsque couplés à des protocoles de stockage probabilistes.</li> </ul>	<p><u>Action de recherche 7 :</u> Distribution des données</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protocole USEE, protocole de stockage probabiliste sur la matière active, prenant en compte la pertinence des informations à disséminer ;</li> <li>- Protocole RawPG, protocole de lecture par marche aléatoire utilisant la répartition probabiliste de USEE.</li> </ul>

## 4.4 SYNTHÈSE DES CONTRIBUTIONS

La table 14 regroupe l'ensemble des contributions scientifiques présentées dans ce chapitre.

### 4.4.1 Validation expérimentale systématique

Pour chaque verrou scientifique, des propositions concrètes ont été faites. Il est à noter qu'à l'exception d'AR3 qui reste encore à consolider, toutes ces propositions ont été validées soit par l'utilisation de cas d'études industriels (AR1 : ITE+, AR2 : SNECMA/PLM EDF), soit par le développement de prototypes (AR4 : développement du protocole de communication sur nœud mobile à AALTO, AR5 : développement d'infrastructures de sélection, d'écriture/lecture sur une matière passive), soit par une preuve mathématique couplée avec une évaluation sur un nombre de cas importants (AR6 : preuve mathématique de l'algorithme + tests sur plus de 200 cas de matrices connues pour comparaison), soit par la comparaison avec d'autres approches connues par simulation (AR7 : simulation des protocoles et comparaisons avec protocoles de la littérature).

### 4.4.2 Pertinence des concepts évoqués

Nos travaux se basent sur deux paradigmes « emboîtés » : d'une part, nous considérons que l'interopérabilité est assurée par le produit lui-même (1<sup>er</sup> paradigme) et d'autre part, que celui-ci peut stocker l'information en tous points de sa matière (2<sup>ème</sup> paradigme). Nous souhaitons revenir sur ces développements menés sur ces paradigmes, afin de proposer une réflexion sur la pertinence des concepts que nous avons proposés.

Le produit intelligent est pour nous plus que jamais d'actualité : l'industrie 4.0, l'internet des objets aussi bien que les systèmes cyber-physiques sont autant d'endroits où le produit intelligent a toute sa place. Dans une ère qui est promise à l'hyper-connectivité, associer le produit à ses informations tout au long de sa vie nous paraît toujours pertinent. Les impératifs environnementaux le démontrent déjà et il sera de plus en plus important d'avoir accès à la bonne information, au bon endroit, au bon moment et pour le bon utilisateur. L'information, même si elle n'est pas sur le produit, devra être capable de le suivre et d'évoluer avec lui tout au long de sa vie (et de ses différents cycles de vie s'il est réutilisé, refabriqué voire même recyclé). Cette information devra permettre l'interopérabilité entre les acteurs du cycle de vie du produit.

Table 14. Synthèse des contributions scientifiques

Thèmes	Verrous	AR	Contributions scientifiques
<b>Thème 1 : Modélisation des données portées par le produit tout au long de son cycle de vie</b>	<b>Modélisation des données</b>	AR1	- Modélisation produit « panneau » basée sur la norme IFC ; - Proposition de la notion d'annotation géolocalisée ; - Mapping sémantique basée sur IFC basé sur la recherche de similarité ; - Utilisation originale d'algorithmes de reconnaissance de contours et de recalage pour le processus de mapping.
	<b>Synchronisation des données</b>	AR2	- Validation des réseaux de dépendance sur des cas industriels avec développement de prototypes ; - Construction du réseau de dépendances implicite et partagée entre les acteurs ; - Constitution d'un référentiel lié avec le système réel.
		AR3	- Réseau de dépendances formalisé par une ontologie IfcOwl 4D ; - Utilisation du mécanisme d'inférence des ontologies pour la synchronisation.
		AR4	- Spécifications du processus de synchronisation ; - Proposition d'algorithmes de synchronisation utilisant les techniques de BDD réparties, basés sur QLM, répondant au niveau 3 de synchronisation entre produits intelligents.
<b>Thème 2 : Gestion des données dans la matière communicante</b>	<b>Sélection des données</b>	AR5	- Proposition d'un processus de sélection adapté à notre contexte (définition de critères et de méthodes d'évaluation) ; - Utilisation de méthodes d'aide à la décision multi-critères pour régler les valeurs de critères (AHP, Fuzzy-AHP).
		AR6	- Démonstration par l'exemple que <i>Fuzzy-Extent Analysis</i> est une méthode erronée (évaluation sur plus de 200 cas) ; - Proposition d'une nouvelle méthode Fuzzy-AHP, respectant l'axiome de consistance, plus rapide que les méthodes correctes connues.
	<b>Distribution des données</b>	AR7	- Protocole USEE, protocole de stockage probabiliste sur la matière active, prenant en compte la pertinence des informations à disséminer ; - Protocole RawPG, protocole de lecture par marche aléatoire utilisant la répartition probabiliste de USEE.

Il y a un peu moins de 10 ans démarrait la première thèse sur le concept de matière communicante, concept futuriste et novateur, ouvrant des pistes de recherche dont certaines ont été relatées dans ce mémoire. D'un point de vue recherche, cet axe a permis de nous ouvrir sur des champs nouveaux, dans des communautés très diverses. Les résultats aussi bien qualitatifs que quantitatifs montrent que les questions que nous avons soulevées ont intéressé d'autres chercheurs. En proposant des contributions sortant un peu des sentiers battus, nous avons aussi suscité l'intérêt de notre communauté.

On peut néanmoins s'interroger sur notre capacité ainsi que sur la pertinence de créer un matériau « hybride », couplant matière et composants électroniques noyés dans sa masse. Nous pensons que cela a du sens lorsque l'on considère des produits de grandes dimensions à durée

de vie longue (poutres béton par exemple). En ce sens, la labellisation du projet ANR McBIM sur le béton communicant (présenté section 1.2.9 et détaillé dans le prochaine chapitre) a tendance à valider notre intuition. Cependant, cela reste utopique (et sûrement peu écologique) pour des matériaux à durée de vie courte et à faible volume (planche de bois, textile). Cela n'empêche pas que le problème de la traçabilité des matériaux transformés soit toujours d'actualité. (Ginet et Golja, 2007) l'ont mis en évidence dans la filière bois par exemple, et l'impact de l'utilisation de la matière communicante est évident sur ce cas.

**Table 15. Les 3 cas possibles de matière communicante**

		Localisation de l'information	
		<i>Information embarquée dans la matière</i>	<i>Information distante</i>
Localisation de l'identification	<i>Identification intégrée au produit</i>	Matière communicante <i>informante</i> (Kubler <i>et al.</i> , 2011; Mekki <i>et al.</i> , 2014)	Matière communicante <i>identifiante</i> (Jover <i>et al.</i> , 2013)
	<i>Identification par dispositif externe</i>		Matière communicante <i>identifiée</i> par ses caractéristiques biométriques (Fuentelba <i>et al.</i> , 2004; Selma <i>et al.</i> , 2018)

*Comment alors tracer ces matériaux de courte durée de vie et de faible volume ?* Les expérimentations réalisées au CRAN montrent qu'il existe d'autres pistes de solutions. Réaliser de la matière communicante consiste en effet à **associer de l'information** à un matériau **identifié**. L'information peut soit être **embarquée** sur la matière, soit **distante**, tandis que l'identification peut soit être **intégrée au produit** (via une étiquette RFID noyée dans la masse) ou être réalisée par un **dispositif externe** (caméra, tomographe, etc.) qui va extraire des caractéristiques biométriques de la matière une signature unique. Ainsi, en fonction de la localisation de l'information et de la localisation de l'identification, on obtient les 3 cas possibles de matière communicante (*informante – capable d'informer, identifiante – capable de s'identifier* ou simplement *identifiée*) présentés table 15. Seuls les deux premiers cas entourés en bleus table 15 sont des types de produit intelligent (qui doivent être a minima capable de fournir leurs identifiants).

Pour les produits à faible durée de vie, nous pensons donc qu'il est nécessaire de développer des méthodologies/technologies d'identification du produit dans la masse afin de tracer son évolution tout au long du cycle de vie, et de réaliser le concept de matière communicante *identifiante*. Cependant, cela n'est pas simple : en effet, ces nouvelles technologies devront être robustes aux transformations de forme et permettre une identification « variable », puisque l'identifiant renvoyé ne doit pas être unique mais doit pouvoir être modifié lors de transformations de forme, afin d'identifier les produits résultants de cette transformation. Cette identification doit aussi permettre de localiser des caractéristiques de la matière (par exemple des défauts dans le textile ou des nœuds dans le bois).

Nous considérons donc que le postulat posé par (Thomas, 2009) est encore largement valable aujourd'hui. Cependant, sa réalisation ne sera pas possible sans un saut technologique relatif à

l'identification dans la masse. Les travaux initiés par (Jover, 2013) ont montré que la solution peut venir d'équipes pluridisciplinaires, combinant en synergie des experts de tout horizon (chimistes, physiciens, biologistes, ...).

Ces différentes conclusions viennent alimenter la suite de ce document qui s'intéresse à nos projets de recherche et d'enseignement.

# Chapitre 5. PROJETS DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT

## Rappels des chapitres précédents & Objectifs du chapitre

*Le chapitre 4 a présenté nos contributions scientifiques en regard des différents verrous scientifiques énoncés dans le chapitre 2 et étudiés dans le chapitre 3. La fin du chapitre 4 a aussi permis de faire une synthèse de nos contributions scientifiques et de prendre un peu de recul sur la notion de matière communicante, en montrant que mettre de l'information sur la matière n'était pas toujours pertinent en fonction du type de produit considéré. Par contre, nous avons souligné l'importance du concept et de l'impact qu'il pourra avoir sur la productivité de certaines filières (comme la filière bois).*

*Dans ce dernier chapitre, nous formalisons un projet de recherche (section 5.1) basé sur la notion d'entité cyber-physique (ECP), généralisation de la matière communicante. Nous considérons l'ECP comme une déclinaison du concept de produit intelligent aux systèmes cyber-physiques de production. Le projet de recherche est décomposé en 3 axes de travail, proposant à chaque fois plusieurs verrous scientifiques. Pour chaque axe, des pistes de financement et de collaboration sont proposées. Au final, un plan de déploiement potentiel de nos travaux sur plusieurs années est présenté.*

*Dans la section 5.2, notre projet d'enseignement est détaillé. Il présente une évolution de l'offre pédagogique que nous souhaitons proposer, avec une réorientation exprimée de manière à mieux aligner les thématiques défendues en recherche avec les modules réalisés en enseignement. Là aussi un plan de déploiement du projet d'enseignement est présenté, intégrant le développement de plateformes supports aux nouveaux modules proposés.*

## 5.1 PROJET DE RECHERCHE

### 5.1.1 Introduction au projet de recherche

Notre travail sur la matière communicante nous a amené à travailler sur différents champs de recherche relatifs au thème du produit intelligent :

- Interopérabilité entre organisations ;
- Partage de données d'intérêt entre organisations ;
- Synchronisation des données du produit et de son système d'information ;
- ...

La partie précédente a d'ailleurs pu montrer nos propositions et avancées sur chacun des points abordés. Parallèlement, ce travail nous a aussi poussé à comprendre que de nombreuses questions relatives au paradigme de produit intelligent restent encore en suspens, et que nous n'avons traité qu'une partie congrue du problème général.

Nous considérons donc que le contour de ce projet de recherche doit s'appuyer sur nos propres conclusions mais aussi sur les papiers de synthèse traitant des travaux sur le produit intelligent. De plus, nous souhaitons aussi définir un projet de recherche dans le nouveau paradigme de l'industrie 4.0 et des systèmes cyber-physiques de production.

Ainsi, en s'appuyant sur des papiers récents de la littérature, nous mettrons en avant dans la prochaine section les problèmes à résoudre aussi bien scientifiques, techniques qu'économiques avant d'envisager une large adoption du produit intelligent dans le milieu industriel. Dans cet ensemble de problèmes, nous mettrons en évidence ceux que nous souhaitons aborder au regard de nos compétences et déclinons notre projet de recherche en plusieurs actions scientifiques (section 5.1.3). Chacune de ces actions sera alors décomposée en plusieurs verrous scientifiques et complétée par un plan d'action, qui décrira les moyens financiers, techniques et bien sûr humains envisagés pour le mener à bien.

## 5.1.2 Cadre du projet de recherche

### Challenges soulevés par le produit intelligent

En 2013, dans un intéressant papier retraçant 10 ans de recherche de la communauté produit intelligent, (McFarlane *et al.*, 2013) listaient l'ensemble des problèmes qui restait à résoudre, selon 4 catégories :

#### 1. *Conceptualisation du produit intelligent* :

- a. Constitution du produit [C1] : la notion du produit a évolué dans le paradigme des systèmes holoniques. Les différents travaux de la littérature peuvent considérer que le produit est un container, des composants d'un assemblage, des ordres de fabrication (groupes de produits) ou des cargaisons (groupes d'ordres). Sur une chaîne logistique étendue, il est très certainement possible que plusieurs types de représentation se rencontrent, ce qui demandent des mécanismes non abordés actuellement ;
- b. Environnement d'interaction avec le produit [C2] : Concevoir un produit intelligent nécessite d'avoir une image précise de l'environnement dans lequel il évolue, afin de pouvoir spécifier les interactions possibles du produit. Dans les travaux de la littérature, l'environnement physique, les organisations qui agissent sur le produit, les systèmes d'information et les autres produits sont autant d'exemples de ce dont pourrait être constitué l'environnement produit ;
- c. Prises de décision du produit [C3] : Les capacités de prises de décision du produit, son niveau d'autonomie, à changer les plans prédéfinis et à décider pour son propriétaire/utilisateur sans son approbation doivent être spécifiés à l'avance ;

#### 2. *Théorie du produit intelligent* :

Dans cette catégorie, les auteurs soulèvent les points suivants :

- a. Environnements de modélisation [T1] : le besoin d'environnements de modélisation qui pourront supporter (a) la modélisation du produit, de ses informations ainsi que de ses décisions, (b) la représentation des environnements industriels avec lesquels le produit opère, (c) la représentation du planning et des systèmes de contrôle existants ;

- b. Algorithmes [T2] : le développement de mécanismes appropriés par lesquels les produits intelligents peuvent parvenir à prendre des décisions relatives à leur devenir. Ce point est à ce jour celui qui est le plus abordé par la communauté. Depuis 2013, de nombreux travaux s'intéressent aux algorithmes à mettre en œuvre au niveau du produit. Cependant, les travaux sont la plupart du temps réalisés sur des benchmarks différents, avec des moyens de développement eux aussi différents, et il reste délicat de comparer les approches autrement que qualitativement.
  - c. Langage [T3] : mettre en place le paradigme de produit intelligent nécessite que le produit puisse communiquer avec les ressources ou les opérations au travers de multiples organisations. Cela signifie qu'il y a un besoin d'un langage d'échange commun entre produits et ressources mais aussi d'un besoin de définition des moyens d'interprétation et de réconciliation entre les tâches requises par le produit et les fonctionnalités disponibles depuis les ressources ;
  - d. Architectures [T4] : L'adoption large du produit intelligent nécessite le développement d'architectures système capables de supporter les interactions multiples produits/ressources au travers de multiples organisations. Là aussi, cet item a été couvert par plusieurs initiatives dans la communauté, souvent au niveau de l'atelier et moins fréquemment entre organisations. L'approche SOA (*Service Oriented Architecture*) est le vecteur commun à l'ensemble de ces contributions ;
  - e. Gestion des pannes/robustesse [T5] : les produits doivent avoir des capacités d'adaptation automatique aux changements et aux conditions de fonctionnement dégradés. Il doit pouvoir faire son propre « bilan de santé » et adapter son comportement en fonction ;
  - f. Comportements coopératifs [T6] : les produits doivent agir en groupes, avec un comportement émergent collectif et non individuel. Le produit doit pouvoir accepter de dégrader sa performance au profit des autres ;
  - g. Mesures de performances [T7] : Il faut mettre en place des indicateurs de performance appropriées (temps, délai, coût, satisfaction utilisateur, etc.) pour établir la performance du système composé de produits intelligents.
3. *Déploiement du produit intelligent* :
- Dans cette catégorie, les auteurs soulèvent les points suivants :
- a. La faisabilité technique [D1] : un obstacle majeur à l'utilisation du produit intelligent en entreprise est de démontrer que celui-ci peut être déployé avec des systèmes d'information à l'échelle industrielle. Cela comprend la spécification de standard de communication tels que O-MI/O-DF, le développement d'interfaces, la spécification de quelle information doit être ou non privée ou publique, stockée ou distribuée, et la manière dont elle va être gérée au cours du temps ;
  - b. La praticité opérationnelle [D2] : les déploiements du produit intelligent seront partiels et ne couvriront pas la totalité du système d'information de l'entreprise. Ainsi, il est nécessaire de s'assurer que ces architectures sont compatibles avec les systèmes d'information déjà présents dans l'entreprise (MES, PLM, ERP, SCM, etc.). Il est de plus important d'intégrer l'homme dans ces systèmes ;
  - c. L'exécution de la décision [D3] : ces architectures proposent des décisions qui peuvent alors être exécutées. Il est crucial de se poser la question de ce qui est nécessaire pour

transformer ces décisions en actions dans le monde réel, aussi bien du point de vue technique que du point de vue du modèle organisationnel et commercial mis en œuvre.

#### 4. *Economie du produit intelligent* :

Dans cette catégorie, les auteurs soulèvent les points suivants :

- a. La viabilité économique [E1] : Si beaucoup de papiers listent les avantages de ce type d'approche, très rares sont ceux qui permettent d'établir des bénéfices quantifiables (aussi bien pour le constructeur de produits intelligents que pour les revendeurs/distributeurs) apportés par le déploiement de systèmes basés sur le produit intelligent.
- b. La gestion des risques [E2] : un comportement émergent implique généralement un manque de garantie sur la performance attendue du système. Les architectures développées dans la littérature garantissent que les performances du système de fabrication soient optimales dans un état normal, mais pas toujours en mode dégradé car il est difficile d'assurer une performance minimale du système dans toutes les situations dégradées. La question de la résolution d'un conflit de vision ou de décisions entre l'homme et l'architecture reste encore une question ouverte ;
- c. L'acceptabilité culturelle [E3] : l'acceptation du produit intelligent, bien que de plus en plus dans les mœurs, peut rester un point bloquant pour les clients potentiels et les utilisateurs des systèmes proposés. Se pose aussi ici la place de l'humain dans ces systèmes industriels basés sur les produits intelligents ;
- d. Le contrôle après le point de vente [E4] : la question de « qui contrôle le produit » après la vente à un industriel ou à un client reste aussi une question épineuse. L'accessibilité aux informations d'usage ainsi qu'aux fonctionnalités contrôlables à distance soulèvent un débat éthique et légal qui reste ouvert actuellement. Comme on peut le voir avec des produits intelligents existants (imprimantes, téléphones, etc.), il n'est pas si évident que les fonctionnalités « intelligentes » servent entièrement les meilleurs intérêts pour le consommateur final.

Si nous citons cette étude, c'est parce qu'elle produit un bilan synthétique et assez exhaustif des problèmes restants à résoudre en 2013. Depuis 2013, la communauté a bien sûr avancé sur certains des points. Les architectures et les algorithmes de décision ont en effet été très étudiés depuis. Par contre, aucun de ces points n'est complètement résolu actuellement.

La table 16 présente synthétiquement l'ensemble des verrous scientifiques décrits dans cet article de synthèse. Dans le cadre de nos travaux sur la matière communicante, nous avons abordé quelques-uns de ces verrous. Dans cette table, pour chaque verrou scientifique, la colonne « Périmètre actuel de nos travaux » indique si nous l'avons traité dans le cadre de nos recherches sur la matière communicante, avec une gradation de l'effort investi (de '+++' [part importante de nos travaux] à '-' [pas traité]). Par exemple, en travaillant sur la constitution de la matière communicante, augmentée par des réseaux de capteurs, nous avons fortement contribué au verrou C1 de la catégorie « conceptualisation ». Dans la communauté française STP, les travaux sur ce verrou sont portés essentiellement par nos travaux et ceux du LAMIH, ayant proposé le concept d'augmentation (Sallez *et al.*, 2010; Sallez, Montreuil et Ballot, 2015).

Nous détaillerons ce concept plus tard, car il sera structurant pour la formalisation du projet scientifique.

**Table 16. Problèmes scientifiques abordés par nos travaux présents et futurs**

Catégories	Verrous scientifiques	Périmètre actuel de nos travaux	Périmètre futur envisagé
Conceptualisation	C1 : Constitution	++	+++
	C2 : Environnement d'interaction	-	++
	C3 : Prise de décision	-	-
Théorie	T1 : Environnements de modélisation	-	-
	T2 : Algorithmes	-	-
	T3 : Langage	+	+++
	T4 : Architectures	-	++
	T5 : Robustesse	-	++
	T6 : Comportements coopératifs	-	+
	T7 : Mesures de performances	+	+++
Déploiement	D1 : Faisabilité technique	+	++
	D2 : Praticité opérationnelle	+	+++
	D3 : Exécution de la décision	-	-
Economie	E1 : Viabilité économique	-	-
	E2 : Gestion des risques	-	-
	E3 : Acceptabilité culturelle	-	-
	E4 : Contrôle après le point de vente	+	+++

### Vers l'industrie 4.0 et les systèmes de production cyber-physiques

Le paradigme Industrie 4.0 est une évolution du CIM (Computer Integrated Manufacturing), au sens où l'on considère non seulement l'intégration verticale dans une même entreprise des différentes ressources (du niveau opérationnel vers le niveau stratégique), mais aussi une intégration horizontale (entre toutes les ressources d'un même niveau), ainsi qu'une intégration inter-entreprises (Stock et Seliger, 2016). En termes simples, on considère que toutes les entités d'un système de production au sens large (produits, ressources, humains, etc.) sont accessibles via l'Internet des Objets. Plus particulièrement, les systèmes de production cyber-physiques (CPPS) sont définis par (Monostori, 2014) comme un ensemble d'entités et de sous-systèmes autonomes et coopérants, connectés au travers d'une relation contextualisée, au sein et au travers de tous les niveaux de la production, que ce soit au niveau du process ou des réseaux

logistiques. Cette nouvelle vision, qui reste à étudier plus en profondeur, intègre par définition le paradigme « produit intelligent ».

Dans un contexte 4.0, de nombreuses sources de données brutes seront disponibles. La figure 57, issu de (Tao *et al.*, 2017), est un exemple récent montrant la connexion ayant lieu entre le produit physique et sa représentation informationnelle. On y voit les données brutes (*physical product data*) générées par la partie physique du produit et en haut les modèles stockés dans l'entité virtuelle (modèles de simulation, modèles d'optimisation, de maintenance, ...). Les données brutes transmises par le biais de la connexion sont traitées par ces modèles, qui en tirent des informations avec ses valeurs. De la même façon, les CPPS basés sur l'IoT ont toujours une couche permettant de transformer la donnée brute en information.

Cette figure permet d'introduire la notion d'**entité cyber-physique**, que nous souhaitons introduire comme une spécialisation du produit intelligent dans un contexte CPPS. L'entité cyber-physique est le résultat de l'interaction entre le produit physique et son jumeau numérique, avec un focus sur le lien d'interaction entre ces deux parties. Une entité cyber-physique peut être un produit mais aussi une ressource (tout élément du système physique). Nous souhaitons utiliser ce terme pour souligner que notre projet de recherche s'intéressera de près à cette relation cyber-physique (virtuel/réel), ce que ne font pas forcément les travaux sur le produit intelligent. En effet, maintenir ce lien cyber-physique va impliquer des problèmes de synchronisation/réduction/transformation de données aussi bien que des problèmes de performances énergétiques qui ne sont pas actuellement traités par la communauté du produit intelligent.

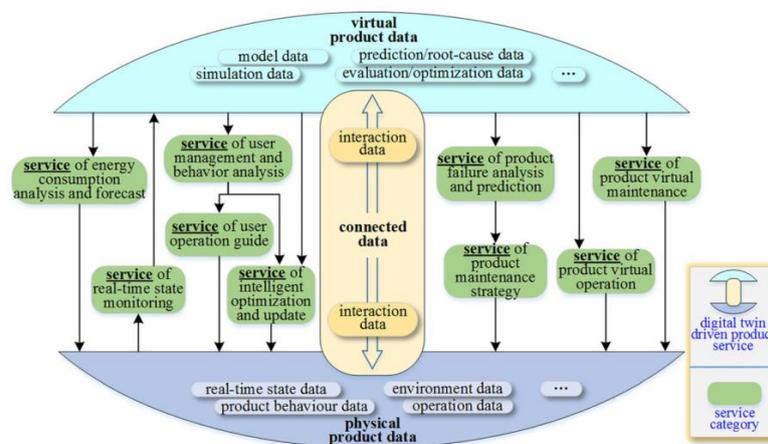


Figure 57. Entité produit cyber-physique (Tao *et al.*, 2017)

Des nouvelles technologies de communication rassemblées sous le terme *Internet des Objets Industriels* sont maintenant disponibles pour mettre en œuvre ces nouvelles organisations industrielles connectées. De nouveaux standards tels que oneM2M, MQTT, OPC-UA, ... existent et peuvent être utilisés pour mettre en place l'architecture de communication. Cependant, au-delà de la difficulté première de mise en place de cette connectivité, de nombreux travaux considèrent qu'un challenge scientifique pour la mise en œuvre de systèmes cyber-physiques serait la gestion de l'information distribuée sur ces organisations du fait de cette connectivité importante (Monostori, 2014; Stock et Seliger, 2016).

En effet, les CPPS ont de fortes aptitudes à la reconfiguration : ces systèmes doivent être capables d'être hautement flexibles, adaptables et reconfigurables. Ainsi, ils peuvent modifier l'architecture du système physique dynamiquement, tout au long de leur cycle de vie. L'architecture du système de pilotage peut elle aussi évoluer en lien ou pas avec l'architecture du système réel. Le système d'information se trouvant à l'interface entre ces deux systèmes, il est légitime de penser que ces différentes reconfigurations vont l'impacter. Loin d'être centralisé, ce système d'information est distribué parmi l'ensemble des entités qui composent le système cyber-physique (produits, ressources, systèmes d'information, etc.).

### **Conclusions et rapprochement « produit intelligent/CPPS »**

Au final, la vision CPPS semble inclure celle du produit intelligent. Les problèmes à résoudre pour le produit intelligent seront donc aussi des problèmes touchant les CPPS. Parmi l'ensemble de ces problèmes, certains touchent plus le système d'information : en effet, l'hyperconnectivité des CPPS oblige à considérer en priorité les interactions avec un environnement toujours changeant et évoluant constamment (problème *C2* de la table 16). Ces interactions doivent se réaliser par le biais d'interfaces standard permettant aux éléments du CPPS de dialoguer entre eux (problèmes *T3*, *D1*), afin de constituer des architectures de gestion de données dynamiques et robustes (problèmes *T4*, *T5*) favorisant un comportement coopératif (problème *T6*). De plus, l'intégration avec des systèmes d'information déjà existants est cruciale (problème *D2*). Pour être efficaces, ces CPPS ont besoin d'être performants et le système d'information support doit l'être aussi (problème *T7*). Tout comme leurs architectures physiques et de pilotage, nous postulons que les systèmes d'information des CPPS seront distribués sous forme d'entités autonomes, qui auront leur cycle de vie (problème *E4*).

Ainsi, dans ce contexte, il nous semble important de travailler sur **l'intégration et le traitement de l'information distribuée** dans les CPPS. Nous posons comme hypothèse que la gestion de l'information distribuée sur ces nouvelles organisations devra passer par des **architectures de gestion de données reconfigurables** basées sur des **entités cyber-physiques sémantiquement interopérables et ayant leur propre cycle de vie**. Pour maximiser leur aptitude à satisfaire les exigences du système de pilotage, c'est-à-dire à **optimiser leur qualité**, des **méthodologies de conception** de ces architectures seront certainement nécessaires.

Bien sûr, ces entités cyber-physiques pourront aussi être le siège de traitements complexes et de prises de décision, mais nous nous focalisons plutôt sur l'information portée par cette entité, des travaux dans notre équipe s'intéressant plus à la vision pilotage et moins à la vision système d'information. Ces deux visions sont nécessairement très liées.

Les catégories de problèmes abordés par notre projet de recherche se trouvent dans la colonne « périmètre futur envisagé » de la table 16.

### **5.1.3 Présentation du projet de recherche**

Cette expression de notre projet de recherche peut être déclinée en trois axes de recherche complémentaire, présentés figure 58. **L'axe 1 « Constitution et évaluation des performances de l'entité cyber-physique »** concerne essentiellement la formalisation de la partie

informationnelle de l'entité cyber-physique (ECP). Nous montrerons que cette ECP est une évolution du concept de matière communicante.

En combinant dynamiquement les ECP entre eux ou avec d'autres systèmes d'information, il est alors possible de définir une architecture distribuée du système d'information global du CPPS. **L'axe2 « Conception et évaluation des performances de l'architecture du système d'information distribué, composé d'ECPs »** s'intéresse aux mécanismes permettant de créer ces architectures, à leurs propriétés ainsi qu'à l'évaluation de leurs performances.

Cette architecture sera amenée à évoluer au cours du temps, en fonction de l'architecture du système physique et de celle du système de pilotage. **L'axe 3 « Pilotage de la reconfiguration du système d'information en fonction du système réel et du système de pilotage »** vise à piloter cette reconfiguration en fonction des exigences du système de pilotage et de l'état du système physique.

Pour chaque axe, nous détaillons dans la suite les verrous scientifiques sous-jacents, ce qui permet de comprendre comment nos travaux sur la matière communicante constituent les fondations de la recherche sur ces verrous.

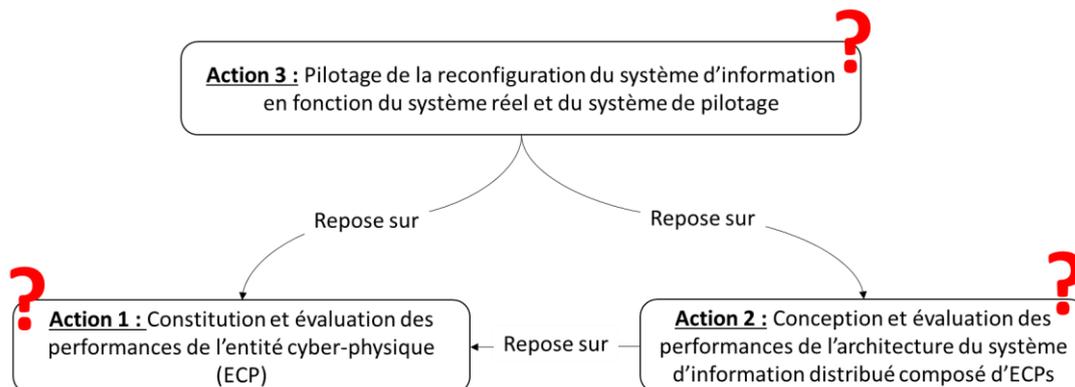


Figure 58. Présentation du projet de recherche

#### 5.1.4 Axe 1 : Formalisation et évaluation des performances de l'ECP

Cet axe de recherche adresse la modélisation de l'ECP aussi bien d'un point de vue fonctionnel qu'organique. La vision que nous avons de l'entité cyber-physique correspond à la vision holonique classique, et est donc constituée de 2 parties (cf. figure 60) :

- *Partie physique* : la partie physique est en charge de recevoir, donner et transformer des données brutes ;
- *Partie virtuelle* : la partie virtuelle est en charge de 1) sauvegarder les informations relatives à l'entité cyber-physique mais aussi 2) de traiter les données brutes pour en tirer des informations et les acheminer vers les autres entités du système cyber-physique. La partie virtuelle peut être locale (stockée sur la partie physique, comme c'est le cas pour la matière communicante) ou distante (stockée sur un site distant). Les parties virtuelle, locale et distante, communiquent au travers d'un réseau quelconque (réseau local, internet, LoRaWan, etc.).

(Sallez *et al.*, 2010) précise cette définition en proposant la notion du concept d'augmentation pour modéliser l'intelligence du produit. L'idée de ce concept est d'augmenter un système cible (noté  $\Sigma^T$  sur la figure 59) possédant des fonctions initiales notées  $F_{init}^{int}$  avec des fonctions d'augmentation  $F_{aug}$  relatives à la gestion de son existence et de son devenir (fonctions de traçabilité, d'alertes, etc.). Certaines de ces fonctions secondaires sont portées par une augmentation fixée sur le système cible lui-même et sont dites *internes*, et d'autres sont déportées sur des systèmes supports distants, et sont qualifiées d'*externes*. Cette définition est assez générique pour englober de nombreux cas différents de produit intelligents. Elle intègre les notions de matière communicante *informante* et *informée* introduites au chapitre précédent. En effet, le matériau (le système cible) peut être doté de fonctions de gestion d'information par le biais d'une augmentation réalisée par une dissémination de RFIDs ou par un réseau de micro-nœuds de capteur sans fil.

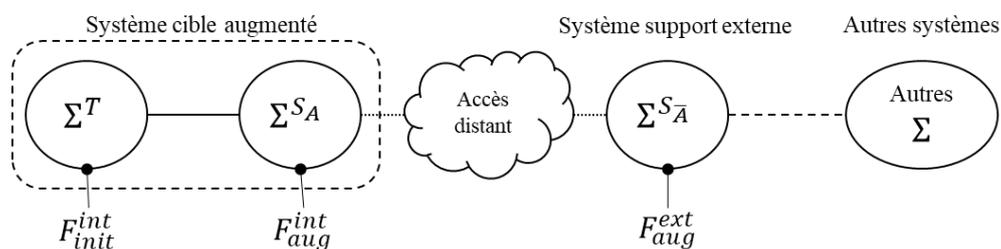


Figure 59. Système cible augmenté, adapté de (Sallez *et al.*, 2010)

La généralité de cette formalisation nous permet de poser l'hypothèse que tout ECP peut être considéré comme un système cible, complété de fonctionnalités augmentées. Cette hypothèse permet d'introduire la représentation de l'architecture générique d'un ECP, et de poser les différents verrous que nous souhaitons aborder sur cette représentation (figure 60).

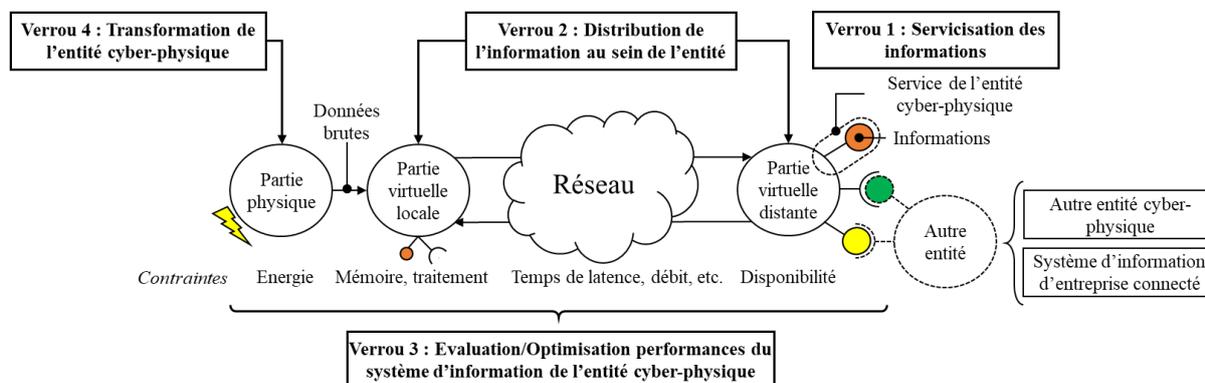


Figure 60. Représentation de l'architecture d'une entité cyber-physique

La conception d'une telle entité soulève les verrous scientifiques suivants :

### Verrou 1 – Servicisation des informations :

Les informations mises à disposition par l'entité cyber-physique doivent être compréhensibles par d'autres entités. L'entité cyber-physique doit donc mettre à disposition ses informations via différentes interfaces ou *services*. De plus, l'entité cyber-physique doit pouvoir transformer la donnée brute qu'elle interprète en information. Pour ce faire, elle peut s'appuyer sur les autres entités cyber-physiques, sur des données accessibles via des systèmes d'information

d'entreprises connectées, et/ou sur des modèles de comportement disponibles. Dans ce monde changeant, l'information devra être délivrée de différentes façons selon le contexte dans lequel l'entité cyber-physique se trouve. Les *services* de l'entité cyber-physique vont donc être amenés à évoluer dans le temps. Différentes questions se posent alors, relatives :

- A la généricité de l'architecture (existe-t-il une architecture générique de service ?),
- Aux types de service nécessaires pour l'entité (en fonction du cycle de vie de l'entité, de son contexte d'utilisation, quels sont les différents services dont elle doit être équipée ?) ;
- Aux performances de ses services (Comment assurer que les différents services répondent aux exigences attendues en toute situation ?) ;
- Aux informations échangées par le service (Quel est le standard ou quelle est l'ontologie la plus pertinente pour l'échange d'informations pour ce service ? Comment transformer les informations de l'entité vers ce standard ou cette ontologie ?).

### **Verrou 2 – Distribution de l'information au sein de l'entité cyber-physique :**

Tout au long de son cycle de vie, l'entité cyber-physique va évoluer dans des processus éco-techniques différents. Actuellement, les approches de gestion de l'information s'orientent globalement vers un « tout Cloud ». A contrario, nos travaux sur la matière communicante ont ouvert une nouvelle voie, où les informations peuvent être stockées sur le produit lui-même, et ont montré qu'avoir l'information directement sur le produit permettait au système d'être plus ou moins sensible aux perturbations [O4]. De plus, le traitement local de l'information est un facteur d'économie d'énergie dans les réseaux, et transmettre de la donnée à bon escient est plus efficace que la transmettre de manière systématique. En considérant l'environnement de l'entité cyber-physique connu (par exemple, via un modèle précis du processus logistique qu'elle va suivre), il y a donc besoin d'avoir des méthodologies de gestion de cette distribution, qui vont permettre de répondre aux questions suivantes :

- Comment distribuer dynamiquement les informations entre les différentes parties virtuelles ?
- Quels sont les facteurs de l'environnement influant sur ce processus ?
- Comment gérer la cohérence entre les différentes parties d'information sur les parties virtuelles locales et distantes ? etc.

### **Verrou 3 – Evaluation/Optimisation des performances de l'entité cyber-physique :**

Simplement, une entité cyber-physique consomme de l'énergie pour remplir des services. On peut alors se poser plusieurs questions relatives à la notion de performance de l'entité cyber-physique :

- Quels sont les indicateurs de performance d'une entité cyber-physique ? Dans notre contexte, il faudra définir des indicateurs d'efficacité des services (par ex. consommation, délai de réponse du service, disponibilité, satisfaction du service procurée aux autres entités cyber-physiques), et de construire un système d'indicateurs pour en tirer une performance globale. Un point intéressant pourra être de réutiliser notre expérience en aide à la décision multicritères pour définir le système d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs via fuzzy-AHP par exemple et calculer ainsi la performance globale.

- Comment mesurer ces indicateurs de performance ? Il sera nécessaire de mettre en place des méthodologies et outils permettant de calculer ces indicateurs, via des expérimentations (simulation/validation en cas réel) ;
- Comment optimiser l'indicateur de performance globale ?

#### **Verrou 4 – Transformation de forme de l'entité cyber-physique :**

Une entité cyber-physique de type matière peut être amenée à subir des transformations de forme (usinage, découpe, sciage, etc.). On retrouve alors les problèmes de gestion de l'information évoqués au chapitre précédent, et se posent les questions suivantes :

- Que se passe-t-il lors d'opérations de transformations de forme (découpage, assemblage, etc.) pour les informations des ECPs concernées ?
- Comment assurer la conservation du flux d'informations ?
- Quels sont les transformations à effectuer sur la partie virtuelle distante ?
- Quelles sont les technologies adéquates pour réaliser le concept de matière communicante *informante ou indentifiante* ?

Ce verrou sera sûrement à étudier en regard des travaux portant sur les collectifs d'agents ou sur la composition d'holons.

Afin de mener à bien les travaux relatifs à cet axe, nous détaillons par la suite les pistes de collaborations internes et externes envisagées, ainsi que les pistes de financement :

#### **Pistes de collaborations internes :**

Dans cette première action, les collaborations internes sont naturelles : En effet, comme expliquée dans la première partie, le département ISET se compose de 3 équipes (GN, S&O-2I et S-PHM2). Les trois thèses sur la matière communicante sont des co-encadrements avec des membres de l'équipe GN (E. Rondeau, S. Kubler, M. David). Ainsi, la thèse de Hang WAN est une collaboration interne avec l'équipe GN, qui vient d'intégrer cette année Sylvain Kubler, après qu'il ait effectué deux post-doctorants (un à l'université d'Aalto, dans l'équipe de K. Främling et un au Luxembourg au SnT, dans l'équipe d'Y. Le Traon). Les compétences qu'il a acquises autour de l'Internet of Things nous seront utiles dans la mise en œuvre de l'ECP. De plus, une collaboration sur ce thème avec E. Bajic sera aussi envisagée.

Une collaboration interne avec H. Panetto sur l'interopérabilité sémantique de l'ECP est elle-aussi évidente.

#### **Pistes de collaborations externes :**

Sur cet axe, plusieurs types de collaboration sont possibles. Dans la communauté STP, un travail conjoint avec Yves Sallez, autour de la notion d'augmentation, semble totalement pertinent. Dans leurs travaux, (Sallez *et al.*, 2010) présente une vision évolutionniste de la répartition des fonctions secondaires associées au produit intelligent. Elle explique que ces fonctions ne sont pas systématiquement pérennes dans le temps, et peuvent aussi évoluer en termes de localisation (soit sur le produit lui-même, soit sur son augmentation interne, soit sur

le système support distant cf. figure 59). Associer des métriques à cette vision évolutionniste pourrait être une partie d'une collaboration entre nos deux laboratoires.

Nous envisageons aussi pour développer les services de l'entité cyber-physique de nous reposer sur des standards permettant l'interopérabilité entre ECPs. En ce qui concerne l'interopérabilité technique, nous avons déjà eu par le passé des collaborations avec Kary Främling sur l'utilisation du standard O-MI/O-DF. Le retour de Sylvain Kubler dans notre département permettra de développer les échanges sur ces thèmes. Des travaux relatifs à l'interopérabilité sémantique pourront être menés en partenariat avec Dimitri Kiritsis, dont les travaux sur le closed-loop PLM sont une des inspirations fortes de nos travaux.

De plus, nous avons des collaborations pluridisciplinaires sur cet axe, par le biais du projet ANR McBIM (Matière Communication au service du BIM) décrit plus loin. Dans le cadre de ce projet, nous travaillons avec deux partenaires académiques : un laboratoire d'informatique, le LE2I, en la personne d'Ana ROXIN, sur l'échange de données appliqué au BIM, et un laboratoire d'électronique, le LAAS en la personne de Daniela Dragomirescu, sur la définition de réseaux composés de micro-nœuds de capteurs sans fil. Nous avons en outre une collaboration industrielle avec une entreprise, 360smartconnect, développant des solutions de béton connecté.

#### Pistes de mise en œuvre :

Les premiers travaux sur cet axe seront supportés par une thèse [Thèse4], dans le cadre du projet ANR McBIM 2017-2021 représenté graphiquement sur la figure 61, dont le CRAN est le responsable scientifique. McBIM vise à développer un prototype de matière communicante en béton, portant des données qui se doivent interopérables avec les outils du BIM. Ce béton communicant (appelé McBEAM sur la figure), préfabriqué en usine et non coulé sur site, sera équipé par un réseau de capteurs sans fil disséminé dans toute sa structure. Ces préfabriqués, lorsqu'ils seront montés ensemble, constitueront un réseau communicant.

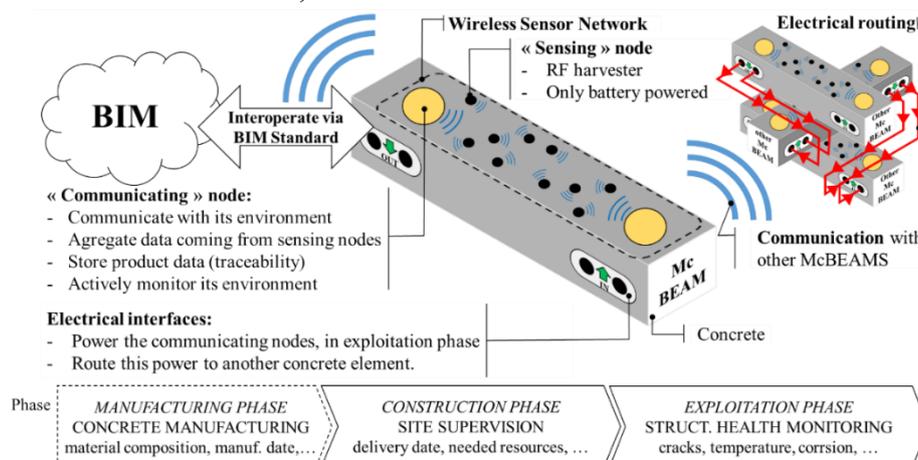


Figure 61. Présentation du projet McBIM

Les objectifs du projet McBIM sont de 1) concevoir ce « béton communicant » et 2) démontrer l'utilité de cette approche sur deux phases du cycle de vie du bâtiment, à savoir le suivi de chantier et la phase de d'exploitation (pour la surveillance de structure). La conception de ce

béton communicant fait face à plusieurs obstacles scientifiques sérieux, qui doivent être résolus :

- La conception de communications sans-fil robustes, peu impactée par l'environnement béton et la définition de techniques de récupération d'énergie par radiofréquences innovantes pour maximiser la durée de vie du réseau embarqué ;
- La définition de nouvelles stratégies de gestion des données contrôlant la manière dont elles sont disséminées/récupérées/transférées dans/ depuis le réseau de préfabriqués communicants ;
- La définition d'une interopérabilité native avec une maquette numérique BIM 4D.

Le consortium McBIM est composé de 4 partenaires (3 laboratoires CRAN, LE2I, LAAS, et 1 entreprise 360SmartConnect). La thèse de Hang WAN portera essentiellement sur les points *b*) et *c*).

### 5.1.5 Axe 2 : Vers une architecture générique de gestion d'informations dans les CPPS

Les entités cyber-physiques définies précédemment peuvent exister isolées, mais ont aussi la possibilité de s'interconnecter, afin de créer des architectures de gestion de données complexes et dynamiques. Dans l'industrie 4.0, la diversité des systèmes connectés autorise de nombreuses combinaisons, dont certaines seront certainement plus efficaces que d'autres. Dans ce cadre, des premières réponses basées sur le paradigme holonique ont déjà été proposées. (Zhang, Wang et Sun, 2011) proposent l'architecture IoMT (*Internet of Manufacturing Things*) et détaillent spécialement le service RTMIIS permettant de gérer en temps réel les données de l'atelier et de les partager en temps réel avec les différents systèmes de gestion d'information. Le projet SURFER (Le Mortellec *et al.*, 2013), appliqué à la gestion de données pour la maintenance de flottes de trains, propose une architecture de gestion de données hétérarchique, un holon pouvant correspondre à un élément du train, un sous-ensemble du train ou le train lui-même. Les holons sont alors organisés, par niveau de complexité, et vont traiter les données brutes qui concernent leur état, pour faire du diagnostic local, en prenant en compte le contexte de l'holon.

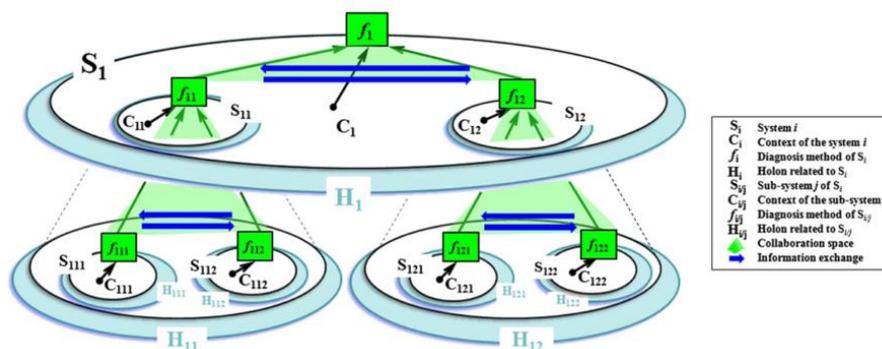


Figure 62. Structure hétérarchique de gestion des données SURFER (Le Mortellec *et al.*, 2013)

Dans le cadre de l'Internet Physique (PI -Physical Internet) et la gestion des containers au sein de réseaux logistiques, le projet ANR PI-NUTS (Sallez, Montreuil et Ballot, 2015) utilise une architecture holonique hétérarchique où chaque container est représenté par un holon. Cette architecture permet de représenter des relations de type « est composé de » et « appartient à ».

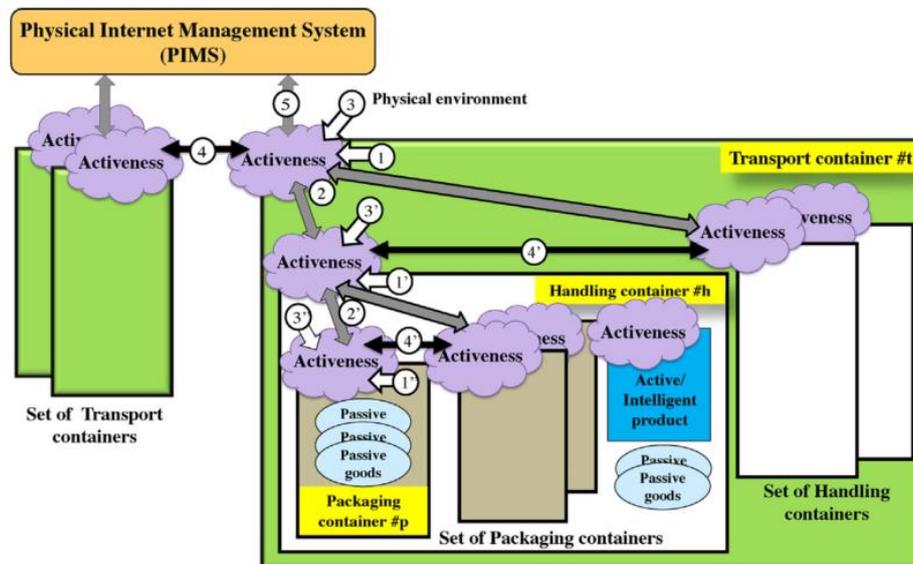


Figure 63. Architecture de gestion de données appliquée à l'Internet Physique (Sallez, Montreuil et Ballot, 2015)

Cette même récursivité est envisagée dans le projet ANR McBIM décrit précédemment, où les différents préfabriqués composés de matière communicante pourront être assemblés pour former des sous-ensembles communicants. Ces architectures de gestion de données représentent une utilisation plus récente des architectures holoniques. Ces dernières doivent être dynamiques et permettre de connecter les entités cyber-physiques les unes aux autres 'à la volée'. La réalisation de l'architecture peut être automatique (les ECPs la conçoivent par interactions réciproques, cas des projets ANR PI-NUTS et McBIM) ou en interaction avec l'utilisateur (comme dans le cas du projet SURFER). Ces architectures sont multi-niveaux, au sens où un holon peut être composé d'autres holons.

Nous considérons ces architectures comme prometteuses car :

- Elles permettent de contextualiser la donnée brute au plus proche de cette donnée, c'est-à-dire de l'interpréter le plus vite possible. D'un point de vue situationnel, c'est là que le contexte est le mieux connu. Des mécanismes de surveillance peuvent être associés à chaque holon en fonction des conditions dans lesquelles il évolue ;
- Elles permettent de contrôler le phénomène de surcharge de données (*data overload*), en empêchant de constituer d'énormes stocks de données décorrélées de leur contexte, dont l'interprétation peut se révéler difficile. D'un point de vue des communications, cela permet de réduire les données échangées dans l'architecture de communication, et donc de réduire les consommations d'énergie du système d'information, contrainte critique dans les réseaux de capteurs par exemple.

La conception de telles architectures lève les verrous complémentaires suivants (cf. figure 64):

#### Verrou 4 – Organisation de l'architecture et modèles génériques

Ces nouvelles architectures posent la question de la généricité de leur structuration. En effet, dans notre première analyse, aucune d'elle ne semble être rigoureusement identique et posent les questions suivantes :

- Quels sont les invariants de modélisation (s'il y en a) ?
- Quels sont les composants nécessaires à ces architectures ? Il est évident que ce verrou est aussi lié à l'axe précédent, portant sur la modélisation de l'ECP ;
- Comment concevoir cette architecture pour qu'elle réponde aux exigences du système de pilotage ?

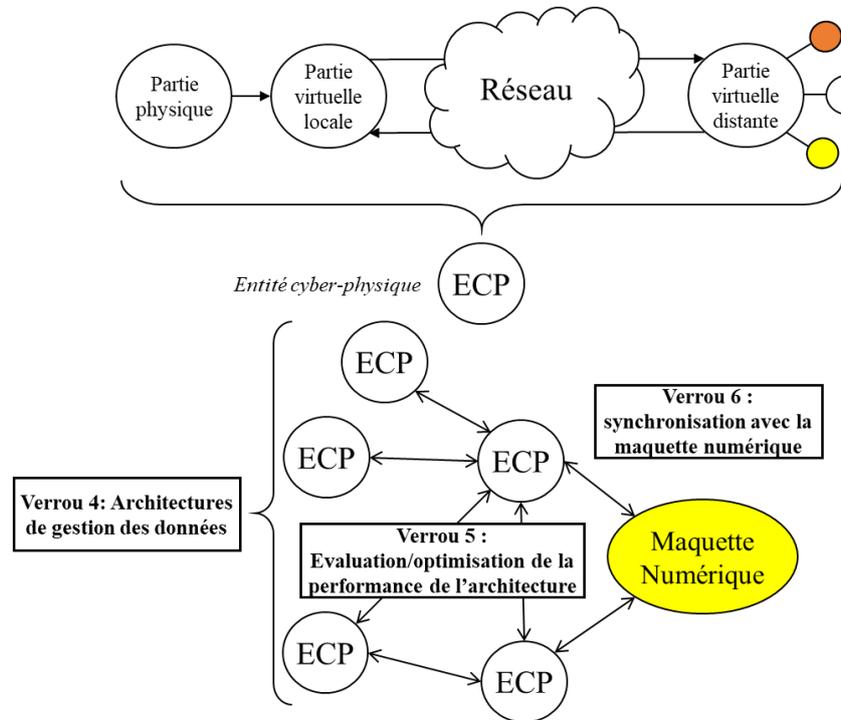


Figure 64. Représentation réseaux d'entités cyber-physiques

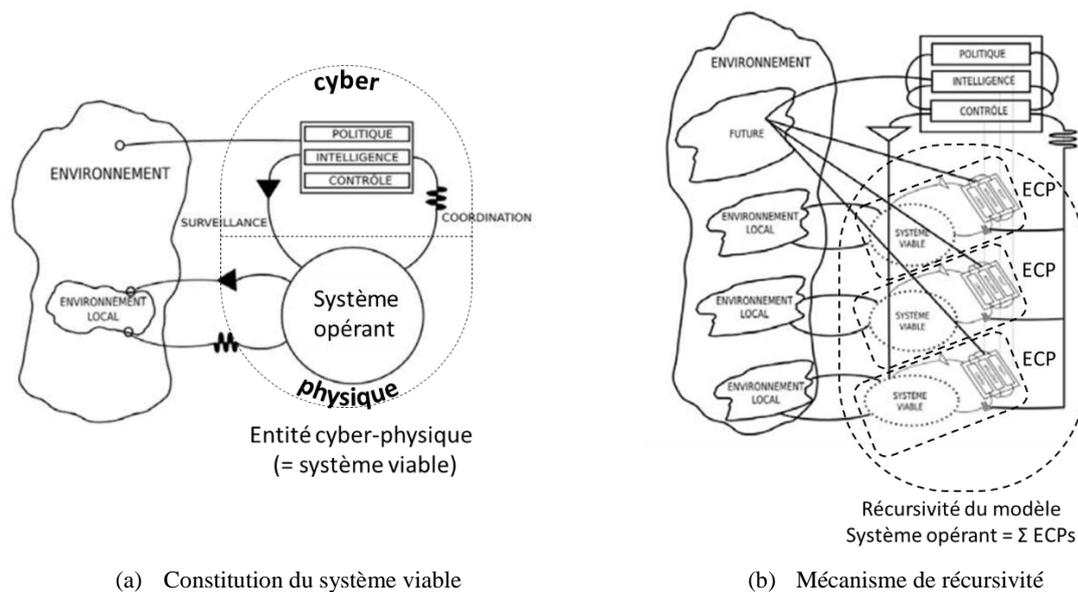
Dans ce verrou, nous envisageons d'étudier des travaux récents du laboratoire (Herrera, 2011; Thomas, 2014; Bril El-Haouzi, 2017) sur le *Viable System Model* (VSM) introduit par (Beer, 1984). Un *système viable* est défini par Beer comme un système capable d'exister de manière indépendante (à rapprocher de la notion d'objet auto-finalisé de Lemoigne). VSM a été développé à partir de la recherche d'*invariants* dans les systèmes biologiques, qui permettent de construire un *homomorphisme* de leurs fonctions, leur organisation et leur structure. En d'autres termes, Beer considère que tout système viable (biologique, technique, organisationnel, etc.) est modélisable à l'aide de 5 *sous-systèmes élémentaires* (Figure 65 (a)) :

- Le système opérant (1) : Il est constitué des activités primaires produisant les produits ou les services qui matérialisent l'identité du système.
- Coordination (2) : Coordination entre les activités primaires composant le système opérant ;
- Contrôle (3) et Surveillance (3\*) : Le sous-système de contrôle règle et assure l'auto-organisation du système obtenue via le sous-système de coordination et le système de surveillance. Ce dernier permet d'évaluer les activités primaires et de garantir la cohérence dans l'activité globale (ensemble des activités primaires) ;
- Intelligence (4) : Le sous-système intelligence est responsable de l'adaptabilité du système. Cette fonction fait le lien entre les activités primaires et l'environnement. Pour réussir cette adaptation, l'intelligence doit être capable de traiter les informations provenant de l'environnement avec l'objectif d'anticiper les aléas ;

- Politique (5) : Le sous-système politique est garant des objectifs du système aux différents niveaux et veille à l'accomplissement de ces derniers.

L'ensemble des systèmes (3), (4) et (5) est aussi appelé *méta-système*. Le méta-système gère le système opérant (1) par le biais des systèmes de surveillance et de coordination. Un intérêt fort du VSM est qu'il est conçu récursivement au sens où le système opérant peut être aussi considéré comme un système viable, décomposable en 5 sous-systèmes élémentaires dont 1 à  $n$  systèmes opérants, eux-mêmes décomposables ... et ainsi de suite. Ainsi, un atelier de production peut être représenté comme un système viable, composé d'autres systèmes viables comme des cellules de production, elles-mêmes constituées d'autres systèmes viables tels que les produits et les machines. A chaque récursion, la structure du modèle reste la même, les parties *politique*, *intelligence* et *contrôle* étant à particulariser.

Des travaux du laboratoire considèrent que la modélisation système viable constitue une piste de recherche pour le contrôle des systèmes de production, aussi bien sur la partie exploitation de données qu'architecture de pilotage. Dans notre contexte, nous considérons que ce modèle convient pour décrire l'ECP. Le méta-système constituerait la partie *cyber* et le système opérant la partie *Physique* de l'ECP (figure 65(a)). Grâce à cette capacité de récursivité nécessaire à la gestion de la complexité des systèmes industriels, adapter VSM à nos recherches permettrait de développer des architectures d'ECPs, cette structuration récursive possédant des caractéristiques qui devraient faciliter l'intégration et l'agrégation entre les entités cyber-physiques (figure 65(b)).



**Figure 65. le Viable System Model et sa projection sur l'Entité Cyber-Physique**

Bien entendu, cette première intuition devra être corroborée par une étude rigoureuse de la littérature, couplée à une comparaison avec d'autres architectures telles que PROSA, ADACOR, ADACOR2 (Leitão et Restivo, 2006; Barbosa *et al.*, 2015), etc. De par sa pluridisciplinarité, ce modèle est en outre défendu par d'autres habilités de mon laboratoire et pourra constituer une base de travail partagée entre les membres de mon équipe.

## Verrou 5 – Evaluation/Optimisation de la performance de l'architecture

Nous postulons que l'organisation du système d'information distribué n'est pas unique et peut se réaliser selon plusieurs manières, de façon à respecter les exigences du système de pilotage. Lors de la conception de l'architecture, il est donc nécessaire d'essayer de trouver la meilleure architecture au regard des exigences, et des conditions opérationnelles dans lesquelles évolue l'architecture. Cela pose des questions relatives aux indicateurs de performance de ces architectures de gestion d'information et leur agrégation en un système d'indicateur de performance global, questions similaires à celles du verrou 3 (définition des indicateurs de performance, évaluation de l'architecture selon ces indicateurs).

De plus, dans les CPPS, les éléments du système de production sont considérés comme étant autonomes, et se coordonnent pour réaliser ensemble des tâches complexes. Il convient alors d'assurer la performance globale de ce système complexe alors que chaque entité prend des décisions individuelles, qui peuvent être en contradiction avec le niveau de performance globale désiré. Ceci peut être dû au fait que les entités cyber-physiques souffrent d'un manque de visibilité temporelle, spatiale, etc., baptisé « myopie », caractéristique inhérente à tout système complexe composé d'entités autonomes. Cette propriété a été étudiée dans plusieurs thèses (Pach *et al.*, 2011; Zambrano Rey *et al.*, 2013). De notre point de vue, la myopie est une caractéristique multi-facteurs dont certains sont liés au système d'information qui va alimenter le système de prise de décisions. Cette hypothèse, qui reste à confirmer, permettrait de corrélérer (partiellement au moins) le niveau de myopie à l'architecture de gestion de données. Nous posons alors comme hypothèse qu'en formalisant la notion de myopie, la conception d'architecture de gestion de données cohérente avec le niveau de myopie désiré serait alors envisageable. Cela pose des questions récurrentes :

- Comment formaliser la notion de myopie mathématiquement ?
- Comment qualifier le niveau de myopie désiré en fonction du système de décision ?
- Quelle est la relation entre système d'information et myopie ?
- Comment atteindre le niveau de myopie désiré ?

Ici, la myopie plutôt que d'être vue comme une contrainte devient un indicateur de (non) performance du système d'information.

Un autre champ de recherche pourrait être relatif à la robustesse du système d'information aux reconfigurations arrivant sur le système de production. En effet, dans une optique industrie 4.0, le système réel est amené très souvent à se reconfigurer, ce qui induit forcément des modifications sur le système d'information. Afin d'éviter de modifier le système d'information à chaque changement du système réel, il faut développer des architectures de gestion de données « robustes ». Cela pose alors plusieurs questions :

- Comment définir la robustesse pour une architecture de gestion de données ?
- Quelles seraient les métriques de cette robustesse ?
- Quelles conséquences la notion de robustesse a sur l'architecture ?
- ...

## **Verrou 6 – Synchronisation avec la maquette numérique**

Ce dernier verrou est clairement dans la ligne droite des travaux initiés par [M2R2] sur la synchronisation des données entre système réel/système virtuel. Les travaux initiés lors du master ont permis de valider l'utilisation des mécanismes d'inférence ontologique sur des données de maquette numérique. Cependant, des tests sur des maquettes numériques réalistes sont encore à produire, et la liaison maquette numérique / système réel n'a pas été encore explorée. En outre, nous souhaitons aussi à terme pouvoir synchroniser la maquette numérique en prenant en compte des données multimodales, relatives à l'identification du produit (étiquettes RFID, QR codes) mais aussi à l'évolution du chantier de production (relevés photogrammétriques 3D, scans laser terrestre). Ici, la maquette numérique envisagée est une maquette de type BIM.

### **Pistes de collaborations internes :**

Dans le cadre de cet axe, nous envisageons des collaborations internes avec Hind Bril, travaillant sur la conception et l'adaptabilité des architectures holoniques (elle s'intéresse d'ailleurs au modèle VSM), et Alexis Aubry, dont les travaux portent sur la notion de robustesse appliquée aux architectures holoniques.

L'équipe S-PHM2 qui travaille sur la maintenance, la sûreté de fonctionnement et la surveillance de l'état de santé des systèmes. Comme l'a montré le projet SURFER, l'utilisation de ces architectures dans le cadre de la maintenance de systèmes est particulièrement pertinente. Des collaborations déjà en cours avec Alexandre Voisin sur les algorithmes Fuzzy-AHP pourront être étendues à la mise en place d'architectures visant à établir dynamiquement le bilan de santé de systèmes.

### **Pistes de collaborations externes :**

Les travaux du projet SURFER ainsi que ceux du projet PI-NUTS sont en adéquation avec notre axe de recherche. Des collaborations sur ces thèmes avec Damien Trentesaux et Yves Salles sont donc à considérer.

La synchronisation avec la maquette numérique BIM pourrait donner lieu à deux types de collaboration : une concernant la modélisation des données 4D dans un format standard, et une concernant le lien entre maquette numérique et monde réel. Pour la première, nous pensons nous rapprocher d'Andrej Tibaut, de l'université de Maribor en Slovénie, avec qui nous avons déjà échangé sur cette possibilité de collaboration. Nous avons de plus déjà initié une autre collaboration avec Michel Aldanondo et travaillé sur plusieurs projets ANR, autour de la maquette numérique BIM. Pour la seconde, Olivier Cardin mène depuis longtemps des travaux sur la virtualisation des systèmes de production, et sur la synchronisation entre le système de production réel et sa réplique numérique, et constituerait une collaboration intéressante sur ce point.

### **Pistes de mise en œuvre :**

Cet axe de recherche va s'appliquer sur deux projets : le projet McBIM, dans lequel il sera question de construire l'architecture de gestion de données support des préfabriqués communicants et le projet CPER Forbois 2, qui est un projet état-région courant sur la période

2015-2020, dont l'objectif est de compléter l'instrumentation actuelle du campus de L'ENSTIB (Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois), à Epinal. Lorsqu'elle sera terminée, cette plate-forme permettra de mesurer des constantes physiques (température, humidité, lumière, présence, etc.) dans plusieurs salles de l'ENSTIB, réparties sur plusieurs bâtiments. De plus, il sera aussi possible d'agir directement sur les actionneurs du système de chauffage.

Dans le cadre de ce projet, nous visons à développer 1) une architecture hétérarchique de gestion des données similaires à SURFER mais en utilisant la structure du bâtiment (élément de salle (capteurs, radiateurs, fenêtres, etc.), salle, étage, bâtiment) comme structure de référence, 2) de relier certaines de ces entités à la maquette numérique du campus de l'ENSTIB afin d'avoir une vision temps-réel de l'état des salles, de leur consommation énergétique ainsi que de leur utilisation.

Le projet CPER Forbois 2 constituera donc une source d'investissement pour la réalisation de la plate-forme. En parallèle, nous envisageons trois recrutements sur ce projet : 1 élève ingénieur été 2018 pour la construction de la maquette numérique du bâtiment, 1 master recherche en septembre 2018, traitant de la définition de l'architecture holonique et de la liaison avec la maquette numérique. Les financements de ces deux masters sont déjà prévus sur le projet AMI ADEME ITE+. Ce master sera suivi d'une demande d'allocation thèse ministère en septembre 2019, en co-direction avec Hind Bril.

### 5.1.6 Axe 3 : Pilotage de la reconfiguration de l'architecture en fonction du système réel et du système de pilotage

Le déploiement d'un système d'information dans une entreprise est un processus fastidieux. Dans le cadre de l'industrie 4.0, il est fort pensable que le déploiement initial soit très rapidement amené à être modifié. Cette modification peut venir de plusieurs facteurs : reconfiguration du système de production, ajout de sources d'informations supplémentaires (systèmes d'information, capteurs, ...), modification du système de pilotage, etc.

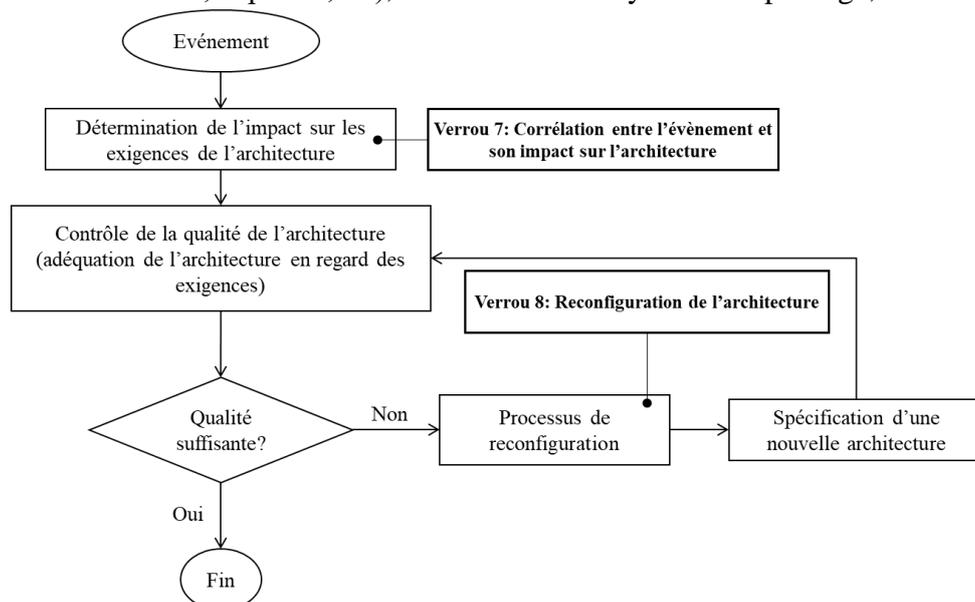


Figure 66. Processus de contrôle de la reconfiguration de l'architecture de gestion de données

Considérons l'architecture de gestion de données comme un graphe où de nombreux nœuds sont des entités cyber-physiques. L'axe 1 cherche à déterminer un modèle de nœud générique et à caractériser ces performances, l'axe 2 cherche à fournir les outils permettant de construire le graphe complet à partir de ces nœuds et à caractériser les performances de l'architecture. L'axe de recherche 3 cherche à déterminer, à partir des performances de l'architecture, des perturbations mesurées, des autres sources de données disponibles, etc. s'il est nécessaire ou pas de relancer un processus de reconfiguration de l'architecture de gestion de données.

Ce processus de contrôle de la reconfiguration s'active si un évènement intervient sur le système réel ou sur le système de pilotage. Dans un premier temps, il est nécessaire de déterminer si cet évènement a un impact sur les exigences opérationnelles de l'architecture, et si le système d'information peut répondre à ce changement du niveau d'exigences. Si ce n'est pas le cas, il faut alors évaluer les différentes pistes de reconfiguration possibles du système, afin d'obtenir la spécification d'une nouvelle architecture à mettre en place. Ce processus lève les verrous suivants :

#### **Verrou 7 – Mesure de l'impact d'un évènement sur les exigences de l'architecture**

Tout comme notre expérience en gestion d'impact dans les systèmes PLM (thèse SNECMA, projet PLM-EDF), on peut envisager que les évènements subis par l'environnement de l'architecture de gestion de données viennent impacter les exigences de l'architecture. Mesurer cet impact nécessite de savoir répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les exigences relatives à l'architecture de gestion de données ?
- Comment les formaliser ?
- Comment modéliser la relation entre les exigences et l'évènement subi par l'environnement ? Ici, une approche à base de réseaux de dépendances pourrait être intéressante ;
- Etc.

#### **Verrou 8 – Processus de reconfiguration**

Si la notion de qualité de l'architecture sera sûrement abordée dans le verrou 5, le processus de reconfiguration est un problème en soi. La réalisation d'un processus automatique de reconfiguration nous semble peu probable, et c'est plutôt vers un processus réalisé par un expert qu'il faudra se tourner. Ce processus sera nécessairement outillé, et les différentes méthodes nécessaires sont à définir. L'utilisation du MBSE (Model-Based Systems Engineering) sera une piste à explorer.

Le processus de (re)configuration du système d'information en regard d'exigences stratégiques est appelé « alignement ». Dans le cadre de ce verrou, il serait pertinent d'étudier si la notion d'alignement peut s'appliquer au processus de reconfiguration de l'architecture.

#### **Pistes de collaborations internes :**

Dans le cadre de cet axe, nous envisageons des collaborations internes avec Hervé Panetto et David Gouyon (spécialiste en ingénierie système).

**Pistes de collaborations externes :**

De nouvelles collaborations sur le thème de l'alignement stratégique du système d'information pourrait être envisagée. En ce sens, il serait très pertinent d'initier une collaboration avec Virginie Goepf du laboratoire I-CUBE, spécialiste nationale de l'alignement des systèmes d'information.

**Pistes de mise en œuvre :**

Cet axe est le plus prospectif des 3 et celui étant aussi le plus risqué. Nos prochains travaux devront d'abord nous conduire à le formaliser davantage. Aussi, nous envisageons seulement pour l'instant un master recherche sur ce sujet lancé en septembre 2019 (donc travaillant sur le sujet à partir de 2020), financé par le projet McBIM. L'application de cet axe s'effectuera sur la plateforme PROGRESS 4.0 que nous présentons dans le projet d'enseignement.

**5.1.7 Résumé du plan de déploiement du projet de recherche**

Ces différents axes de recherche sont interdépendants : L'axe 2 reposera en partie sur l'axe 1, et l'axe 3 reposera sur l'axe 2 et l'axe 1. Cela permet d'envisager un phasage dans la planification temporelle de notre projet de recherche : nous commencerons par travailler sur l'axe 1, puis l'axe 2 et enfin nous aborderons l'axe 3. Ce démarrage sera séquentiel, puisque nous traitons l'axe 1 depuis 2018, l'axe 2 sera abordé plus en profondeur à partir de mi-2019 tandis que nous prévoyons d'attaquer l'axe 3 mi-2020 au plus tôt. Les actions de travail envisagées ne sont donc pas exhaustives, ni obligatoires : ce ne sont que des pistes possibles, réalisables à nos yeux dans l'état actuel de nos réflexions dans la décennie à venir. Elles évolueront au fur et à mesure du temps.

**Tableau 4. Résumé du plan de déploiement**

Axes	Support local	Support Régional/national	Support International
Axe 1 (2018-)	F: Projet ANR McBIM (1 thèse [Thèse 4], 2 masters 2018, 2019)	F:	F:
	P: Prototypes locaux (financement McBIM)	P: Prototypes grande échelle Réalisés par 360SmartConnect	P:
	C: E. Rondeau / S. Kubler / M. David (GN) H. Panetto / H. Bril (S&O-2I)	C: A. Roxin (modélisation de données BIM) D. Dragomirescu (réseaux de capteurs) Y. Sallez (augmentation)	C: K. Främbling (interopérabilité technique) D. Kiritsis (interopérabilité sémantique)
Axe 2 (2019-)	F: Master de recherche septembre 2018 (financement INC)  Demande de thèse ministère en co-encadrement Hind Bril septembre 2019	F: CPER Forbois 2	F:
	P:	P: Plateforme CPER Forbois 2	P:
	C: H. Bril / A. Aubry (S&O-2I) A. Voisin (S-PHM2)	C: D. Trentesaux, Y. Sallez, O. Cardin (architectures) M. Aldanondo (configuration produit)	C: A. Tibaut (modèle maquette numérique BIM 4D)
Axe3 (2020-)	F: Master de recherche 2019 (financement McBIM)	F:	F:
	P: Plate-forme PROGRESS 4.0	P:	P:
	C: H. Panetto (S&O-2I) D. Gouyon (S-PHM2)	C: V. Goepf (alignement système d'information)	C:

Chaque axe est supporté par des sources de financement soit acquises soit prévisionnelles, permettant de financer des recrutements et des investissements. Pour chaque axe, des collaborations ont été décrites précédemment et des plates-formes liées à ces axes ont été identifiées. Cet ensemble d'éléments cohérents et placés judicieusement dans le temps correspond au plan de déploiement de ce projet de recherche. Il est résumé sous une forme synthétique dans le tableau 4. Les axes sont présentés de haut en bas, le plus haut étant celui démarrant le plus tôt. Pour chaque axe sont indiqués les ressources de financement et les recrutements envisagés (ligne *F*), les plateformes supports (ligne *P*) et les collaborations potentielles (ligne *C*).

## 5.2 PROJET D'ENSEIGNEMENT

Lors de mon arrivée au département Génie Mécanique et Productique de L'IUT Nancy Brabois, j'ai été en charge d'enseignements en Conception Mécanique et en Programmation Informatique, ce qui correspondait au positionnement acquis pendant ma thèse, clairement à la rencontre entre Génies Mécanique et Informatique.

Depuis ma thèse, réalisée dans le domaine l'intégration des modèles CAO/FAO, ma recherche a évolué, puisque je suis passé des systèmes de gestion de données CAO/FAO aux systèmes d'information d'entreprise (PLM, BIM, ERP) et surtout à la gestion de l'information distribuée dans un contexte d'industrie 4.0. Ainsi, afin de rester cohérent par rapport à mon projet de recherche qui se situe dans ce domaine de la gestion de l'information dans les systèmes distribués, je souhaite élargir le champ ma pédagogie à des thèmes plus proches de mes compétences scientifiques actuelles. Comme j'ai la chance d'intervenir de BAC+1 à BAC+5, un deuxième objectif est de former graduellement les étudiants rencontrés sur plusieurs années vers nos thématiques de recherche afin, entre autres, que le passage Bac+5/Thèse leur soit plus naturel.

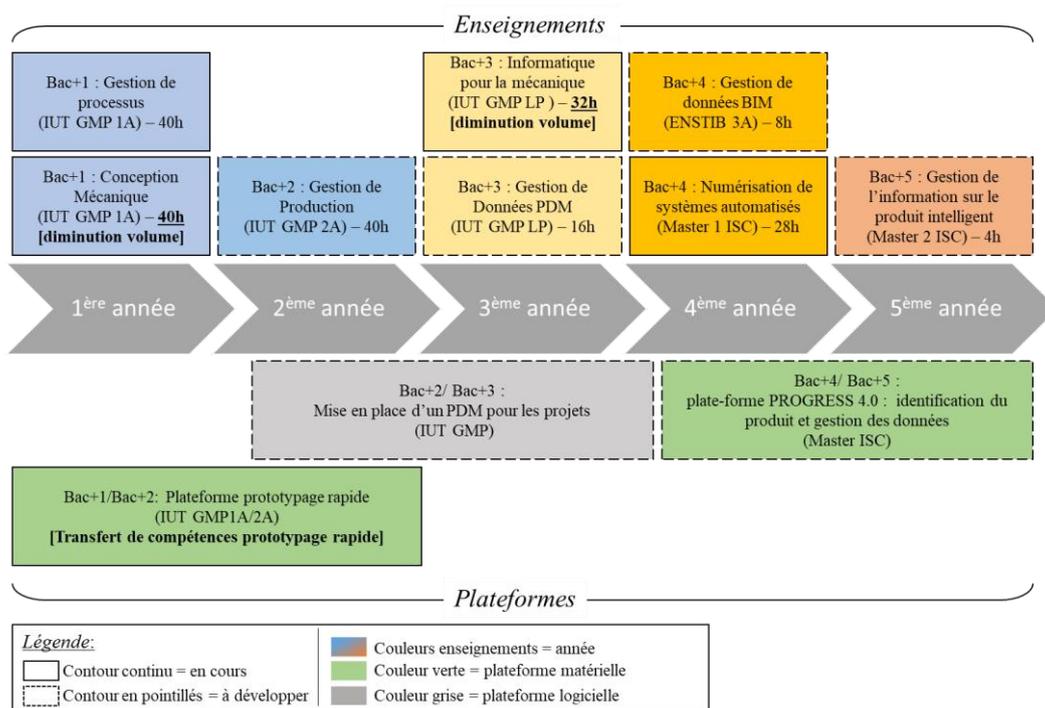


Figure 67. Offre de cours et plateformes supports

**Offre de cours :**

Les modules en contours continus de la figure 67 sont ceux où j'interviens actuellement et sont détaillés dans le premier chapitre de ce document. Mon objectif est d'entamer une transition entre mon profil pédagogique actuel et celui vers lequel je désire aller, en modifiant modérément chaque année la répartition de mes enseignements, afin d'aboutir à celle présentée précédemment. Les nouveaux modules de cette offre de cours seraient les suivants :

- **Module Gestion de production (formation : IUT GMP2A, vol. horaire total : 40h, début : 2018) :** les objectifs de ce module sont de connaître les structures de l'entreprise, les concepts de gestion de production, ainsi que comprendre l'organisation et les modèles de gestion de production. Ce module correspond au module M3205 du Programme Pédagogique Nationale du DUT GMP<sup>10</sup>, et il est complémentaire au module M2305 Gestion de projet dans lequel j'interviens déjà. Pour information, ces deux modules font partie du champ disciplinaire « Organisation et Pilotage Industriel », qui correspond bien à ma nouvelle orientation pédagogique.
- **Module Gestion de données PDM (formation : IUT Licence Pro CMAO, vol. horaire total : 16h, début : 2019) :** actuellement, j'interviens en LP CMAO (Conception Mécanique Assistée par Ordinateur) pour un cours d'informatique orienté sur la réalisation d'applications pour la mécanique. Afin de compléter les compétences de la LP, et suite au déploiement de la plateforme PDM au département GMP, il sera envisagé d'utiliser une partie des heures de ce module pour initier les étudiants de LP à l'organisation et à la gestion de projets de conception à partir de logiciels PDM. Ce module ne débutera pas avant septembre 2019, l'année académique 2018-2019 étant réservée au choix, à l'installation ainsi qu'au test d'une solution PDM (projet détaillé dans la partie « plateformes supports »).
- **Initiation à la gestion des données BIM (formation : ENSTIB 4A, vol. horaire total : 8h, début : 2018) :** les objectifs de ce module sont d'initier les élèves ingénieurs ENSTIB à la gestion des données de projet de construction, en soulignant les modèles et outils supports. Seront abordés les standards d'échanges dans le bâtiment (IFC principalement), l'organisation et l'utilisation de serveurs BIM ;
- **Séminaire sur la gestion des données pour le produit intelligent (formation : Master 2 ISC Recherche, vol. horaire total : 4h, début : 2018) :** Ce séminaire de 4h présenterait les travaux majeurs relatifs à la gestion de données pour le produit intelligent.

Il est à noter que le volume horaire total que représente l'ensemble de l'offre de cours est d'environ 250h présentielle.

<sup>10</sup> Il est possible de consulter le programme pédagogique nationale du DUT GMP à l'adresse [http://www.iut.fr/files/fck/File/documents/PPN/fran%C3%A7ais/PPN\\_GMP\\_255225.pdf](http://www.iut.fr/files/fck/File/documents/PPN/fran%C3%A7ais/PPN_GMP_255225.pdf)

**Plateformes supports :**

L'introduction de ces nouveaux cours repose sur des plateformes existantes (comme la plateforme CPER Forbois2) et sur de nouvelles plateformes à développer. En enseignement, je souhaite m'impliquer dans la réalisation de deux autres plateformes, l'une matérielle et l'autre logicielle :

- **Plateforme PDM GMP (formation : IUT GMP 2A & LP CMAO, opérationnelle début 2019) :** La plateforme PDM GMP est une plateforme logicielle de gestion de données produit. Cette plateforme nourrit deux objectifs pédagogiques : le premier est de permettre à nos étudiants de 2A et LP de se former à l'utilisation de plateformes de gestion de données lors de la réalisation de projets collaboratifs. En 2A, il s'agira surtout de comprendre les notions de coffre-fort, configurations, versions, etc. par la pratique. Les étudiants de LP CMAO option chargé de projets auront en plus un module **Gestion de données PDM** pour les former à la gestion de ces environnements (création de projet, affectation des rôles, structuration des workflows, etc.).
- **Plateforme PROGRESS4.0 (formation : Master ISC, déploiement progressif à partir de mi-2018) :** PROGRESS4.0 signifie PROduction & REGeneration SyStem4.0. Dans le contexte de l'industrie 4.0, le pôle AIP-PRIMECA Lorrain est en train de réfléchir à la mise en place d'une plateforme reconfigurable, adaptable à des demandes, à différents flux manipulés. Cette plateforme devra être capable d'illustrer en pédagogie les problématiques relatives à l'adaptation, la reconfiguration des systèmes de production tout comme les aspects interface homme/machine, automatisation ou gestion d'informations distribuées auprès de différentes formations. Elle sera également utilisée dans le cadre de travaux de recherche pour mettre en œuvre et expérimenter des approches développées par le CRAN.

Les produits de la future plateforme PROGRESS4.0 seraient de petits vérins en plastique muni de connecteurs (cf. figure 68), inspirés des produits actuels de la plateforme SYNCHROLEAN développée par FESTO.

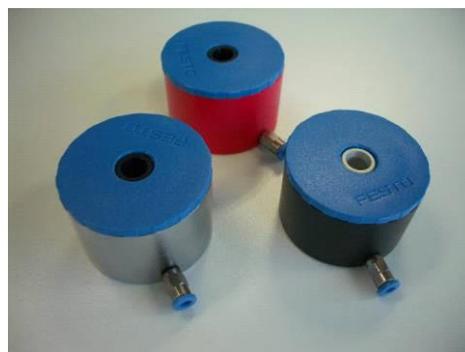
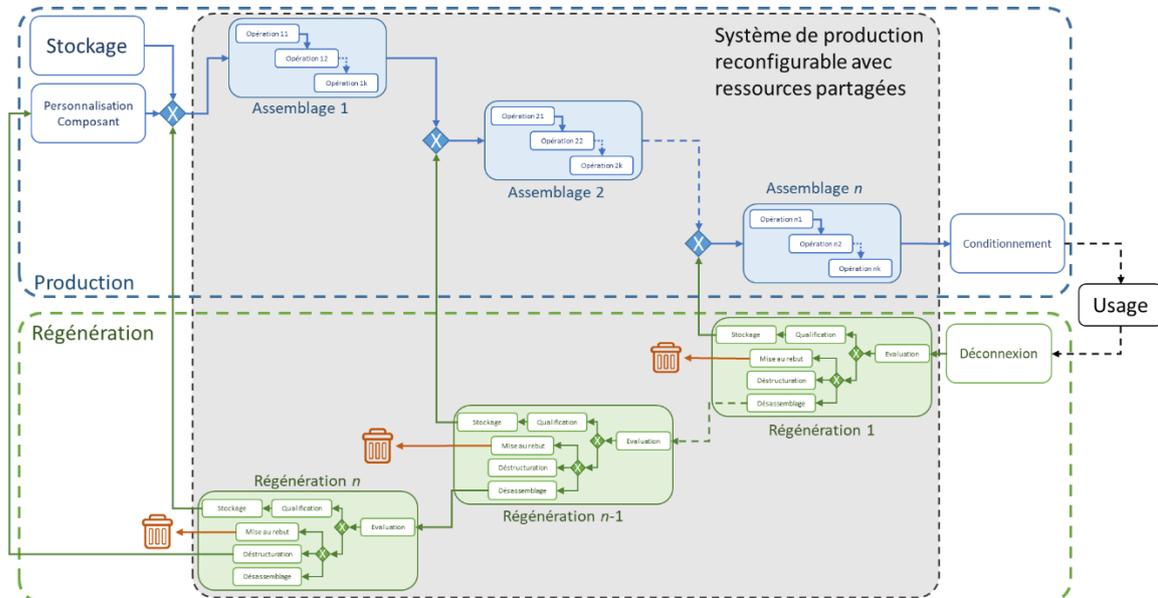


Figure 68. Produit envisagé pour la plateforme PROGRESS4.0

Les flux envisagés dans cette plateforme sont de deux types (figure 69) : un flux de production dont le but est d'assembler des vérins munis de leurs connecteurs et un flux de régénération dont le but est de réutiliser/refabriquer/recycler les vérins usés. Ces deux flux ne s'effectuent pas sur des lignes séparées mais seront traités par les mêmes ressources partagées. On imagine

alors que l'ensemble du système de production doit pouvoir se configurer soit pour la phase de production, soit pour la phase de recyclage. Un mode hybride peut aussi consister à faire les deux en même temps, avec des flux croisés. Dans ce scénario, la variabilité des flux est importante car le nombre de vérins usés récupérés et d'alternatives de régénération varient fortement en fonction de l'état de ces mêmes vérins. Les ressources composant la plateforme sont de plusieurs types : cobot YUMI, robots FANUC LRMATE, AVG, imprimantes3D, etc.



Dans le cadre de PROGRESS4.0, il sera nécessaire de mettre en œuvre un système d'identification des pièces, sous-ensembles et produits finis manipulés. Il faut en effet être capable de distinguer chaque instance de pièce, qui va avoir ou aura déjà eu une vie particulière. Cette identification de l'instance considérée doit permettre de récupérer ses informations relatives depuis un système d'information type ERP ou PDM. Je participe à l'élaboration de la plateforme PROGRESS4.0 en travaillant sur le système d'information connecté au système physique, et support au système de pilotage. En ce sens, mon travail au sein du projet PROGRESS4.0 cadre parfaitement avec mes activités de recherche.

La plateforme doit être déployée progressivement à partir de la mi-2018. Par rapport au cours que je prévois de faire en master ISC, elle servira de support d'application pour mon cours sur la numérisation des systèmes automatisés, ainsi que d'exemple pratique pour le séminaire sur la gestion des informations pour le produit intelligent.



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abuelyaman, E. S. (2008) « An optimized scheme for vertical partitioning of a distributed database », *International Journal of Computer Science and Network Security*, 8(1), p. 310-316.
- Adrian Runceanu, M. P. (éd.) (2007) « About Data Fragmentation and Allocation in Distributed Object Oriented Databases, International Conference Ivan Rilsky University », in. Sofia.
- Ahmad, I., Karlapalem, K., Kwok, Y. K. et So, S. K. (2002) « Evolutionary algorithms for allocating data in distributed database systems », *Distributed and Parallel Databases*, 11(1), p. 5-32.
- Ahvar, S., Mahdavi, M. et Ahvar, E. (2012) « Improving EEQR algorithm in Wireless Sensor Networks », in *2012 6th International Symposium on Telecommunications, IST 2012*, p. 709-714. doi: 10.1109/ISTEL.2012.6483078.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. et Cayirci, E. (2002) « A survey on sensor networks », *IEEE Communications Magazine*, 40(8), p. 102-105. doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422.
- Alavizadeh, F. et Sabouri, H. (2006) « Fragment Allocation using Genetic Algorithms in Distributed Database ».
- Alliance, O. D. (2014) « Open Design Specification for. dwg files ». Ver.
- Ameri, F. et Dutta, D. (2005) « Product lifecycle management: closing the knowledge loops », *Computer-Aided Design and Applications*, 2(5), p. 577-590.
- Apers, P. M. G. (1988) « Data allocation in distributed database systems », *ACM Transactions on Database Systems*, 13(3), p. 263-304.
- Ashraf, A., Dominic, P., Durai, D. et Hamidah, I. (2010) « A New Optimistic Replication Strategy for Large-scale Mobile Distributed Database Systems », *International Journal of database management systems*, 2(4), p. 86-105.
- Association, U. S. P. D. et others (1996) « Initial Graphics Exchange Specification IGES 5.3 », *ANSI. Retrieved July*, 12, p. 2008.
- Augusto, J. (2007) « Ambient Intelligence: The confluence of ubiquitous/pervasive computing and artificial intelligence », *Intelligent Computing Everywhere*. Springer, p. 213-234.
- Autodesk (2010) *DXF Reference*. Disponible sur: <https://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acadr14/dxf/>.
- Auzelle, J.-P. (2009) *Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un Système d'Information en entreprise centré produit*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).
- Baião, F., Mattoso, M. et Zaverucha, G. (2002) « A framework for the design of distributed databases », in *Workshop on Distributed Data & Structures*.
- Baïna, S. (2006) *Interopérabilité dirigée par les modèles : une approche orientée produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).
- Bajic, E., Chaxel, F. et Véron, M. (1993) « Intelligent parts management in a fully distributed architecture », in *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*. Mons (Belgique).
- Bar-Yossef, Z., Friedman, R. et Kliot, G. (2008) « RaWMS - Random Walk Based Lightweight

- Membership Service for Wireless Ad Hoc Networks », *ACM Trans. Comput. Syst.*, 26(2), p. 5:1–5:66. doi: 10.1145/1365815.1365817.
- Barbará, D. (1999) « Mobile computing and databases-a survey », *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 11(1), p. 108-117.
- Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E. et Trentesaux, D. (2015) « Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution », *Computers in Industry*, 66, p. 99-111. doi: 10.1016/j.compind.2014.10.011.
- Beer, S. (1984) « The viable system model: Its provenance, development, methodology and pathology », *Journal of the operational research society*. Taylor & Francis, 35(1), p. 7-25.
- Bellatreche, L., Karlapalem, K. et Simonet, A. (1997) « Horizontal class partitioning in object-oriented databases », in *Database and Expert Systems Applications*, p. 58-67.
- Ben-Othman, J. et Yahya, B. (2010) « Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks », *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 70(8), p. 849-857. doi: 10.1016/j.jpdc.2010.02.010.
- Bénaben, F., Touzi, J., Lorré, J. et Pingaud, H. (2008) « Du processus collaboratif au médiateur des systèmes d'information des partenaires », in *7ieme Conférence Internationale de Modélisation et Simulation MOSIM*, p. 837-846.
- Blankinship, R., Hevner, A. R. et Yao, S. B. (1991) « An iterative method for distributed database design », in *17th International Conference on Very Large Data Bases*, p. 389-400.
- Bobineau, C., Bouganim, L., Pucheral, P. et Valduriez, P. (2000) « PicoDBMS: Scaling down database techniques for the smartcard », in *26th International Conference on Very Large Data Bases*, p. 11-20.
- Borst, W. N. (1997) *Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse*. University of Twente (Netherlands).
- Braginsky, D. et Estrin, D. (2002) « Rumor routing algorithm for sensor networks », in *WSNA '02. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, p. 22-31. doi: 10.1145/570738.570742.
- Bril El-Haouzi, H. (2017) *Contribution à la conception et à l'évaluation des architectures de pilotage des systèmes de production adaptables : vers une approche anthropocentrée pour la simulation et le pilotage*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Lorraine.
- Bronsvoort, W. F. (2004) « Multiple-view feature modelling for integral product development », *Computer-Aided Design*, 36(10), p. 929.
- Brun-Picard, D., Bouvet, H., Baboli, H. et Binder, Z. (1997) « The product as an active element of distributed production control », in *Proceedings of IFAC-IFIP-IMACS Conference-Control of industrial systems*, p. 359-365.
- Brunstrom, A., Leutenegger, S. T. et Simha, R. (1995) « Experimental evaluation of dynamic data allocation strategies in a distributed database with changing workloads », in *4th International conference on Information and knowledge management*, p. 395-402.
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L. et Peeters, P. (1998) « Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA », *Computers in Industry*, 37(3), p. 255-274. doi: DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00102-X.
- Cao, H. et Folan, P. (2012) « Product life cycle: The evolution of a paradigm and literature review from 1950-2009 », *Production Planning and Control*, 23(8), p. 641-662. doi: 10.1080/09537287.2011.577460.

- Carneiro Viana, A., Herault, T., Largillier, T., Peyronnet, S. et Zaidi, F. (2010) « Supple: a flexible probabilistic data dissemination protocol for wireless sensor networks », in *Proceedings of the 13th ACM international conference on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, p. 385-392.
- Cassina, J., Cannata, A. et Taisch, M. (2009) « Development of an Extended Product Lifecycle Management through Service Oriented Architecture. », in *Proceedings of the 1st CIRP Industrial Product-Service Systems (IPS2) Conference*.
- Catalano, C. E., Camossi, E., Ferrandes, R., Cheutet, V. et Sevilmis, N. (2009) « A product design ontology for enhancing shape processing in design workflows », *Journal of Intelligent Manufacturing*. Springer, 20(5), p. 553-567.
- Cea, A., Dobre, D. et Bajic, E. (2006) « Ambient Services Interactions for Smart Objects in the Supply Chain », in *International Conference on Service Systems and Service Management*.
- Chakravarthy, S., Muthuraj, J., Varadarajan, R. et Navathe, S. B. (1994) « An objective function for vertically partitioning relations in distributed databases and its analysis », *Distributed and parallel databases*, 2(2), p. 183-207.
- Chan, D. (2005) *Context Sensitive Database Summarisation*. Flinders University of South Australia.
- Chan, D. et Roddick, J. F. (2003) « Context-sensitive mobile database summarisation », in *26th Australasian computer science conference*, p. 139-149.
- Chan, D. et Roddick, J. F. (2005) « Summarisation for Mobile Databases », *Journal of Research and Practice in Information Technology*, 37(3), p. 267.
- Chang, D.-Y. (1996) « Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP », *European Journal of Operational Research*, 95(3), p. 649-655.
- Chang, X., Sahin, A. et Terpenney, J. (2008) « An ontology-based support for product conceptual design », *Robotics and computer-integrated manufacturing*. Elsevier, 24(6), p. 755-762.
- Chaturvedi, A. R., Choubey, A. K. et Roan, J. (1994) « Scheduling the allocation of data fragments in a distributed database environment: A machine learning approach », *IEEE Transactions on Engineering Management*, 41(2), p. 194-207.
- Chaxel, F. (1995) *Contribution à la gestion et à la conduite des systèmes manufacturiers par les objets nomades de production*. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Chen, C. H., Wu, T. et Occeña, L. G. (2002) « Knowledge organisation of product design blackboard systems via graph decomposition », *Knowledge-Based Systems*, 15(7), p. 423-435. doi: 10.1016/S0950-7051(02)00030-8.
- Chen, D., Doumeingts, G. et Vernadat, F. (2008) « Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future », *Computers in industry*. Elsevier, 59(7), p. 647-659.
- Chen, D. et Vernadat, F. (2004) « Standards on enterprise integration and engineering—state of the art », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(3), p. 235-253. doi: 10.1080/09511920310001607087.
- Chen, G., Li, M. et Kotz, D. (2008) « Data-centric middleware for context-aware pervasive computing », *Pervasive and mobile computing*, 4(2), p. 216-253.
- Chen, Y.-J., Chen, Y.-M. et Chu, H.-C. (2009) « Development of a mechanism for ontology-based product lifecycle knowledge integration », *Expert Systems with Applications*. Elsevier, 36(2), p. 2759-2779.

- Cheng, L., Chen, Y., Chen, C. et Ma, J. (2009) « Query-based data collection in wireless sensor networks with mobile sinks », *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing Connecting the World Wirelessly - IWCMC '09*, p. 1157. doi: 10.1145/1582379.1582633.
- Cheutet, V. (2012) *Contribution à la continuité des flux d'informations et de connaissances dans le lien conception-production*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne.
- Chin, A. G. (2002) « Incremental data allocation and reallocation in distributed database systems », in *Data warehousing and web engineering*, p. 137-160.
- Chopra, S. et Meindl, P. (2007) « Supply chain management. Strategy, planning & operation », in *Das summa summarum des management*. Springer, p. 265-275.
- Darabant, A. S., Campan, A. et Navroschi-Szasz, A. (2004) « Optimal Class Fragmentation Ordering in Object Oriented Databases », *Studia Universitatis Babeş Bolyai Informatica*, 49(1), p. 45-54.
- Das, S. M., Pucha, H. et Charlie Hu, Y. (2005) « Performance comparison of scalable location services for geographic ad hoc routing », in *Proceedings - IEEE INFOCOM*, p. 1228-1239. doi: 10.1109/INFOCOM.2005.1498349.
- Demoly, F. (2010) *Conception intégrée et gestion d'informations techniques: application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage*. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Dhalla, N. K. et Yuspeh, S. (1976) « Forget the product life cycle concept! », *Harvard Business Review*, 54(1), p. 102-112.
- Diall, H., Raja, K., Daskalopoulos, I., Hailes, S., Roussos, G., Torfs, T. et Van Hoof, C. (2007) « Sensor cube: A modular, ultra-compact, power-aware platform for sensor networks », *IPSIJ Digital Courier*. Information Processing Society of Japan, 3, p. 309-319.
- Dibie-Barthélemy, J., Haemmerlé, O. et Salvat, E. (2006) « A semantic validation of conceptual graphs », *Knowledge-Based Systems*, 19(7), p. 498-510. doi: 10.1016/j.knosys.2005.04.002.
- Dobre, D. et Bajic, E. (2008) « Active product modeling for chemical security management based on smart object concept », in *Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes, MOSIM 08*.
- Dong, M., Yang, D. et Su, L. (2011) « Ontology-based service product configuration system modeling and development », *Expert systems with applications*. Elsevier, 38(9), p. 11770-11786.
- Doss, R., Li, G., Mak, V. et Tissera, M. (2010) « Information discovery in mission-critical wireless sensor networks », *Computer Networks*, 54(14), p. 2383-2399. doi: 10.1016/j.comnet.2010.03.018.
- Drabkin, V., Friedman, R., Kliot, G. et Segal, M. (2007) « RAPID: Reliable probabilistic dissemination in wireless ad-hoc networks », in *Proceedings of the IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems*, p. 13-22. doi: 10.1109/SRDS.2007.4365680.
- Dubois, D. (2011) « The role of fuzzy sets in decision sciences: Old techniques and new directions », *Fuzzy Sets and Systems*, 184(1), p. 3-28.
- Ducellier, G., Eynard, B. et Caillaud, E. (2007) « Infrastructure PLM pour la capitalisation et la réutilisation de données en conception mécanique », *Congrès Français de Mécanique*, p. 1-6.
- East, E. W. (2007) « Construction Operations Building Information Exchange (COBIE):

- Requirements Definition and Pilot Implementation Standard », *Construction Engineering Research Laboratory ERDC/CERL TR-07-30*, (June), p. 1-195.
- Eastman, C. (1975) « The use of computers instead of drawings in building design », *AIA Journal*, 63(3), p. 46-50.
- EIF (2004) *European Interoperability Framework - Interoperable Delivery of European eGovernment Services to public Administrations, Businesses and Citizens (IDABC)*.
- El-haouzi, H. (2008) *Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps : Application à l'entreprise Trane*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).
- Erman, A. T., Dilo, A. et Havinga, P. (2012) « A virtual infrastructure based on honeycomb tessellation for data dissemination in multi-sink mobile wireless sensor networks », *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012. doi: 10.1186/1687-1499-2012-17.
- Ezeife, C. I. et Barker, K. (1998) « Distributed object based design: Vertical fragmentation of classes », *Distributed and Parallel Databases*. Springer, 6(4), p. 317-350.
- Ezeife, C. I. et Zheng, J. (1999) « Measuring the performance of database object horizontal fragmentation schemes », in *Database Engineering and Applications*, p. 408-414.
- Fife, L. D. et Gruenwald, L. (2003) « Research issues for data communication in mobile ad-hoc network database systems », *ACM SIGMOD Record*. ACM, 32(2), p. 42-47.
- Fiorentini, X., Rachuri, S., Suh, H., Lee, J. et Sriram, R. D. (2010) « An analysis of description logic augmented with domain rules for the development of product models », *Journal of computing and information science in engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 10(2), p. 21008.
- Fortineau, V., Paviot, T. et Lamouri, S. (2013) « Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models-The state of the art », *Computers in Industry*. Elsevier B.V., 64(4), p. 363-375. doi: 10.1016/j.compind.2013.01.001.
- Främling, K. et Rabe, L. (2006) « Enriching product information during the product lifecycle », in *12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*.
- Fuentealba, C., Simon, C., Choffel, D., Charpentier, P. et Masson, D. (2004) « Wood products identification by internal characteristics readings », in *Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT'04. 2004 IEEE International Conference on*, p. 763-768.
- Fung, C., Karlapalem, K. et Li, Q. (2002) « An evaluation of vertical class partitioning for query processing in object-oriented databases », *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. Published by the IEEE Computer Society, p. 1095-1118.
- Ganesan, D., Govindan, R., Shenker, S. et Estrin, D. (2001) « Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks », *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 5(4), p. 11. doi: 10.1145/509506.509514.
- Gemini, C. (2005) *Global Data Synchronisation At Work in the Real World-Illustrating the Business Benefits*.
- Gero, J. S. et Kannengiesser, U. (2004) « The situated function-behaviour-structure framework », *Design Studies*, 25(4), p. 373-391. doi: 10.1016/j.destud.2003.10.010.
- Giménez, D. M., Vegetti, M., Leone, H. P. et Henning, G. P. (2008) « PRoduct ONTOlogy: Defining product-related concepts for logistics planning activities », *Computers in Industry*. Elsevier, 59(2-3), p. 231-241.

- Ginet, C. et Golja, R. (2007) « Traçabilité et échanges électroniques pour la filière Forêt-Bois-Papier », *Fiche information--forêt*, (750).
- Govil, M. et Proth, J.-M. (2002) *Supply chain design and management: strategic and tactical perspectives*. Academic Press.
- Grantham, L. M. (1997) « The validity of the product life cycle in the high-tech industry », *Marketing Intelligence & Planning*, 15(1), p. 4-10. doi: 10.1108/02634509710155606.
- Gray, J., Helland, P., O'Neil, P. et Shasha, D. (1996) « The dangers of replication and a solution », *SIGMOD Rec.*, 25, p. 173-182.
- Grebla, H., Moldovan, G., Darabant, S. A. et Câmpan, A. (2004) « Data allocation in distributed database systems performed by mobile intelligent agents », in *Journal, Proc. Intern. Conf. on Theory and Applications of Mathematics and Informatics*, p. 164-173.
- Gruber, T. (1993) « Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing BT - Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation », in *Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation*. Disponible sur: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.43.6200%5Cnpapers2://publication/uuid/64C65482-6725-413E-93FB-80B741461598>.
- Hababeh, I. O., Bowring, N. et Ramachandran, M. (2005) « A method for fragment allocation design in the distributed database systems », in *The 6th Annual UAE University Research Conference*.
- Hamida, E. B. et Chelius, G. (2008) « A Line-Based Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks with Mobile Sink », *2008 IEEE International Conference on Communications*, p. 2201-2205. doi: 10.1109/ICC.2008.420.
- Hara, T. et Madria, S. K. (2006) « Data replication for improving data accessibility in ad hoc networks », *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Published by the IEEE Computer Society, p. 1515-1532.
- Harrison, M. et Parlikad, A. K. (2006) *Lifecycle ID and lifecycle data management, AEROID-CAM-005*.
- Hassanein, H. et Luo, J. (2006) « Reliable Energy Aware Routing In Wireless Sensor Networks », in *Dependability and Security in Sensor Networks and Systems 2006 DSSNS 2006 Second IEEE Workshop on*, p. 54-64. doi: 10.1109/DSSNS.2006.10.
- Hauglid, J. O., Ryeng, N. H. et Nørnvåg, K. (2010) « DYFRAM: dynamic fragmentation and replica management in distributed database systems », *Distributed and Parallel Databases*. Springer, p. 1-29.
- Herrera, C. (2011) *Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).
- Huang, Y. F. et Chen, J. H. (2001) « Fragment allocation in distributed database design », *Journal of Information Science and Engineering*. Citeseer, 17(3), p. 491-506.
- Huang, Y., Sistla, P. et Wolfson, O. (1994) « Data replication for mobile computers », *ACM SIGMOD Record*. Association for Computing Machinery, Inc, One Astor Plaza, 1515 Broadway, New York, NY, 10036-5701, USA, 23(2), p. 13-24.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R. et Estrin, D. (2000) « Directed Diffusion : A Scalable and Robust Communication », *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '00)*, p. 56-67. doi: 10.1145/345910.345920.
- ISO-14258-1998 (1998) *Systèmes d'automatisation industrielle - Concepts et règles pour*

*modèles d'entreprise.*

ISO (2013) « Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries ». Disponible sur: <https://www.iso.org/standard/51622.html>.

Jeong, S., Wegner, D. et Noh, S. (2010) « Validation of an ontology-based approach for enhancing human simulation in general assembly environments », *Proceedings of the WCE*, 3.

Jover, J. (2013) *Contribution à la réduction des pertes d'informations dans l'industrie du bois*. Université de Lorraine.

Jover, J., Thomas, A., Leban, J. M. et Canet, D. (2013) « Interest of new communicating material paradigm: An attempt in wood industry », *Journal of Physics: Conference Series*, 416(1), p. 12-31.

Jun, H. B., Kiritsis, D. et Xirouchakis, P. (2007) « Research issues on closed-loop PLM », *Computers in Industry*, 58(8), p. 855-868.

El Kadiri, S. et Kiritsis, D. (2015) « Ontologies in the context of product lifecycle management: state of the art literature review », *International Journal of Production Research*, 53(18), p. 5657-5668. doi: 10.1080/00207543.2015.1052155.

Kärkkäinen, M., Ala-Risku, T. et Främling, K. (2003) « The product centric approach: a solution to supply network information management problems? », *Computers in Industry*, 52(2), p. 147-159.

Kärkkäinen, M., Ala-Risku, T. et Främling, K. (2003) « The product centric approach: A solution to supply network information management problems? », *Computers in Industry*, 52(2), p. 147-159. doi: 10.1016/S0166-3615(03)00086-1.

Kärkkäinen, M., Ala-Risku, T. et Främling, K. (2004) « Efficient tracking for short-term multi-company networks », *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(7), p. 545-564.

Khan, S. I. et Hoque, A. S. M. (2010) « A New Technique for Database Fragmentation in Distributed Systems », *International Journal of Computer Applications, IJCA*, 5(9), p. 20-24.

Kim, K.-Y., Manley, D. G. et Yang, H. (2006) « Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development », *Computer-Aided Design*. Elsevier, 38(12), p. 1233-1250.

Kiritsis, D. (2011) « Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the {I}nternet of {T}hings », *Computer-Aided Design*, 43(5), p. 479-501.

Klein, M. (2003) « Towards a Systematic Repository of Knowledge about Managing Collaborative Design Conflicts », in *International Conference on Artificial Intelligence in Design*, p. 1-21. doi: 10.1007/978-94-011-4154-3\_7.

Klein, T. (2008) *Le kanban actif pour assurer l'intéropérabilité décisionnelle centralisé/distribué : Application à un industriel de l'ameublement*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).

Koestler, A. (1967) *The ghost in the machine*. Hutchinson.

Koestler, A. (1979) « Janus: A summing up », *Bulletin of the Atomic Scientists*. Taylor & Francis, 35(3), p. 4.

Krima, S., Barbau, R., Fiorentini, X., Sudarsan, R. et Sriram, R. D. (2009) « Ontostep: OWL-DL ontology for step », *National Institute of Standards and Technology, NISTIR*, 7561.

Krommenacker, N., Charpentier, P. et Peña, R. (2013) « Towards Product Health Monitoring throughout its life-cycle », *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, p. 169-173. doi:

10.3182/20130522-3-BR-4036.00090.

Kubler, S., Derigent, W., Thomas, A. et Rondeau, É. (2011) « Prototyping of a communicating textile », in *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Metz*, p. 1333-1342.

Kubler, S., Madhikermi, M. et Främling, K. (2014) « QLM messaging standards: introduction and comparison with existing messaging protocols », in Springer (éd.) *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics*, Springer International, p. 237-256.

Kusiak, A. et Wang, J. (1995) « Dependency Analysis in Constraint Negotiation », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 25(9), p. 1301-1313. doi: 10.1109/21.400508.

Lambert, D. M., Stock, J. R. et Ellram, L. M. (1998) *Fundamentals of logistics management*. McGraw-Hill/Irwin.

Lee, H. L. et Billington, C. (1993) « Material management in decentralized supply chains », *Operations research*. INFORMS, 41(5), p. 835-847.

Lee, J., Chae, H., Kim, C.-H. et Kim, K. (2009) « Design of product ontology architecture for collaborative enterprises », *Expert Systems with Applications*. Elsevier, 36(2), p. 2300-2309.

Lee, J. Y. et Kim, K. (1996) « Geometric reasoning for knowledge-based parametric design using graph representation », *Computer-Aided Design*, 28(10), p. 831-841. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(96\)00016-4](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(96)00016-4).

Lee, L. S., Fiedler, K. D. et Smith, J. S. (2008) « Radio frequency identification (RFID) implementation in the service sector: A customer-facing diffusion model », *International Journal of Production Economics*. Elsevier, 112(2), p. 587-600.

Leitão, P. et Restivo, F. (2006) « ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control », *Computers in Industry*, 57(2), p. 121-130. doi: 10.1016/j.compind.2005.05.005.

Lemoigne, J.-L. (1977) *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Collection. Disponible sur: [www.mcxapc.org](http://www.mcxapc.org).

Li, S., Neelisetti, R., Liu, C. et Lim, A. (2010) « Efficient multi-path protocol for wireless sensor networks », *Journal of Wireless and Mobile Networks*, 2(1), p. 110-130. Disponible sur: <http://www.doaj.org/doaj?func=fulltext&aId=498708>.

Lim, S. C. J., Liu, Y. et Lee, W. B. (2011) « A methodology for building a semantically annotated multi-faceted ontology for product family modelling », *Advanced Engineering Informatics*. Elsevier, 25(2), p. 147-161.

Lima, L. et Barros, J. (2007) « Random Walks on Sensor Networks », *2007 5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops*, p. 1-5. doi: 10.1109/WIOPT.2007.4480064.

Liu, X., Huang, Q. et Zhang, Y. (2007) « Balancing push and pull for efficient information discovery in large-scale sensor networks », *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(3), p. 241-251. doi: 10.1109/TMC.2007.34.

Lockhead, S. (2011) « The Global Data Synchronisation Network (GDSN): Technology and standards improving supply chain efficiency », in *IEEE International Technology Management Conference*, p. 630-637.

Lou, W. (2005) « An Efficient N-to-1 Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks », *Computer Engineering*, p. 665-672. doi: 10.1109/MAHSS.2005.1542857.

Loukopoulos, T. et Ahmad, I. (2004) « Static and adaptive distributed data replication using

- genetic algorithms », *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(11), p. 1270-1285.
- Lu, C., Xing, G., Chipara, O., Fok, C.-L. et Bhattacharya, S. (2005) « A spatiotemporal query service for mobile users in sensor networks », in *Distributed Computing Systems, 2005. ICDCS 2005. Proceedings. 25th IEEE International Conference on*, p. 381-390.
- Lu, Y., Morris, K. et Frechette, S. (2016) *Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems*, National Institute of Standards and Technology, NISTIR. doi: 10.6028/NIST.IR.8107.
- Lu, Y., Panetto, H. et Gu, X. (2010) « Ontology approach for the interoperability of networked enterprises in supply chain environment », in *OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems"*, p. 229-238.
- Lubinski, A. (2000) « Small database answers for small mobile resources », in *International Conference on Intelligent Interactive Assistance and Mobile Multimedia Computing*, p. 9-10.
- Lubinski, A. et Heuer, A. (2000) « Configured replication for mobile applications », in *Rostocker informatik berichte*.
- Luo, H., Ye, F., Cheng, J., Lu, S. et Zhang, L. (2005) « TTDD: Two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks », in *Wireless Networks*, p. 161-175. doi: 10.1007/s11276-004-4753-x.
- Madria, S. K., Mohania, M. et Roddick, J. F. (1998) « A query processing model for mobile computing using concept hierarchies and summary databases », in *5th International Conference on Foundation for Data Organization*.
- Maia, G., Guidoni, D. L., Viana, A. C., Aquino, A. L. L., Mini, R. A. F. et Loureiro, A. A. F. (2013) « A distributed data storage protocol for heterogeneous wireless sensor networks with mobile sinks », *Ad Hoc Networks*. Elsevier, 11(5), p. 1588-1602.
- Maimour, M. (2008) « Maximally radio-disjoint multipath routing for wireless multimedia sensor networks », in *Proceedings of the 4th ACM workshop on Wireless multimedia networking and performance modeling - WMuNep '08*, p. 26. doi: 10.1145/1454573.1454579.
- Malinowski, E. et Chakravarthy, S. (1997) « Fragmentation Techniques for Distributing Object-Oriented Databases », in *16th International Conference on Conceptual Modeling*, p. 347-360.
- Matsokis, A. et Kiritsis, D. (2010) « An ontology-based approach for Product Lifecycle Management », *Computers in industry*. Elsevier, 61(8), p. 787-797.
- McFarlane, D., Giannikas, V., Wong, A. C. Y. et Harrison, M. (2012) « Intelligent Products in the Supply Chain - 10 Years On », in *14th Symposium of Information Control Problems in Manufacturing*.
- McFarlane, D., Giannikas, V., Wong, A. C. Y. et Harrison, M. (2013) « Product intelligence in industrial control: Theory and practice », *Annual Reviews in Control*, 37(1), p. 69-88. doi: 10.1016/j.arcontrol.2013.03.003.
- McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J. L., Wong, C. Y. et Ashton, K. (2003) « Auto ID systems and intelligent manufacturing control », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), p. 365-376. doi: DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00077-0.
- McFarlane, D. et Sheffi, Y. (2003) « The impact of automatic identification on supply chain operations », *International Journal of Logistics Management*, The. MCB UP Ltd, 14(1), p. 1-17.
- Mekki, K., Derigent, W., Zouinkhi, A., Rondeau, E. et Abdelkrim, M. N. (2014) « Data

- Dissemination Algorithms for Communicating Materials using Wireless Sensor Networks », in *Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), 2014 International Conference on*, p. 230-237.
- Merdan, M., Lepuschitz, W., Meurer, T. et Vincze, M. (2010) « Towards ontology-based automated disassembly systems », in *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, p. 1392-1397.
- Meyer, G. G., Främbling, K. et Holmström, J. (2009) « Intelligent Products: A survey », *Computers in Industry*, 60(3), p. 137-148. doi: 10.1016/j.compind.2008.12.005.
- Meyer, G. G., Främbling, K., Holmström, J., Främbling, K. et Holmström, J. (2009) « Intelligent Products: A survey », *Computers in Industry*, 60(3), p. 137-148. doi: 10.1016/j.compind.2008.12.005.
- Mir, Z. H. et Ko, Y. B. (2007) « A quadtree-based hierarchical data dissemination for mobile sensor networks », *Telecommunication Systems*, 36(1-3), p. 117-128. doi: Doi 10.1007/S11235-007-9062-0.
- Moiz, S. A. et Rajamani, L. (2009) « Replication Strategies in Mobile Environments », *International Journal of Information Technology, BVICAM'S*, 2.
- Monostori, L. (2014) « Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges », *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 17, p. 9-13. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- Morel, G. et Grabot, B. (2003) « Special issue on intelligent manufacturing », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), p. 271-393.
- Morel, G., Panetto, H., Zaremba, M. et Mayer, F. (2003) « Manufacturing enterprise control and management system engineering: paradigms and open issues », *Annual reviews in Control*. Elsevier, 27(2), p. 199-209.
- Le Mortellec, A., Clarhaut, J., Sallez, Y., Berger, T. et Trentesaux, D. (2013) « Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Elsevier, 26(1), p. 227-240. doi: 10.1016/j.engappai.2012.09.008.
- Muhs, W. F. (1985) « The Product Life Cycle Concept: Origin and Early Antecedents », in *Proceedings of the 2nd Workshop on Historical Research in Marketing, Stanley Hollander et al., eds., Michigan State University*, p. 413-419.
- Mun, D., Lee, S., Kim, B. et Han, S. (2006) « ISO 15926-based data repository and related web services for sharing lifecycle data of process plants », in *International Conference on Product Lifecycle Management, Bath, UK*, p. 713-725.
- Navathe, S. B. et Ra, M. (1989) « Vertical partitioning for database design: a graphical algorithm », in *ACM SIGMOD Record*, p. 440-450.
- Navathe, S., Ceri, S., Wiederhold, G. et Dou, J. (1984) « Vertical partitioning algorithms for database design », *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 9(4), p. 680-710.
- Navathe, S., Karlapalem, K. et Ra, M. (1995) « A mixed fragmentation methodology for initial distributed database design », *Journal of Computer and Software Engineering*, 3(4), p. 395-426.
- Noyel, M. (2015) *Contrôle intégré du pilotage d ' atelier et de la qualité des produits*. Université de Lorraine, Nancy (France).
- Nuseibeh, B., Easterbrook, S. et Russo, A. (2001) « Making inconsistency respectable in software development », *Journal of Systems and Software*, 58(2), p. 171-180. doi: 10.1016/S0164-1212(01)00036-X.
- Ouertani, M. Z. et Graza, L. (2008) « Tracking product specification dependencies in collaborative design for conflict management », *Computer-Aided Design*, 40, p. 828-837. doi:

10.1016/j.cad.2007.07.002.

Ouertani, M. Z. et Gzara, L. (2008) « Tracking product specification dependencies in collaborative design for conflict management », *CAD Computer Aided Design*, 40(7), p. 828-837. doi: 10.1016/j.cad.2007.07.002.

Pabmanabhan, P. et Gruenwald, L. (2006) « DREAM: A Data Replication Technique for Real-Time Mobile Ad-hoc Network Databases », in *22nd International Conference on Data Engineering, ICDE'06*, p. 134.

Pach, C., Z., G., Adam, E., Berger, T. et Trentesaux, D. (2011) « Roles-Based MAS Applied to the Control of Intelligent Products in FMS », in Marík, V., Vrba, P., et Leitão, P. (éd.) *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science).

Padmanabhan, P., Gruenwald, L., Vallur, A. et Atiquzzaman, M. (2008) « A survey of data replication techniques for mobile ad hoc network databases », *The VLDB Journal*, 17(5), p. 1143-1164.

Pandit, A. et Zhu, Y. (2007) « An ontology-based approach to support decision-making for the design of ETO (Engineer-To-Order) products », *Automation in Construction*. Elsevier, 16(6), p. 759-770.

Panetto, H. (2006) *Meta-modèles et modèles pour l'intégration et l'interopérabilité des applications d'entreprises de production*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).

Panetto, H. et Molina, A. (2008) « Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues », *Computers in industry*. Elsevier, 59(7), p. 641-646.

Pannequin, R. (2007) *Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy (France).

Parlikad, A. K., McFarlane, D. C., Fleisch, E. et Gross, S. (2003) *The role of product identity in End-of-Life decision making*.

Pauwels, P., Krijnen, T., Terkaj, W. et Beetz, J. (2017) « Enhancing the ifcOWL ontology with an alternative representation for geometric data », *Automation in Construction*, 80, p. 77-94. doi: 10.1016/j.autcon.2017.03.001.

Pauwels, P. et Terkaj, W. (2016) « EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology », *Automation in Construction*, 63, p. 100-133. doi: 10.1016/j.autcon.2015.12.003.

Paviot, T. (2010) *Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du PLM*. Ecole Centrale Paris, Paris (France).

Petersen, K., Spreitzer, M. J., Terry, D. B., Theimer, M. M. et Demers, A. J. (1997) « Flexible update propagation for weakly consistent replication », in *Operating Systems Review, SIGOPS*, p. 288-301.

Petrescu, M. (Horvat) (2010) *Dynamic Relocation of data fragments in a distributed database*. Babes-Bolyai University, Faculty of Mathematics and Computer Science.

Phatak, S. H. et Badrinath, B. R. (1999) « Data partitioning for disconnected client server databases », in *1st International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access*, p. 102-109.

Pinto, D. et Torres, G. (2002) « On dynamic fragmentation of distributed databases using partial replication », *Advances in systems theory, mathematical methods and applications*, p. 208-211.

- Plossl, W. G. (1993) « La nouvelle donne de la gestion de production », *Afnor gestion, Paris*.
- Pratt, M. J. (2005) « ISO 10303, the STEP standard for product data exchange, and its PLM capabilities », *International Journal of Product Lifecycle Management*, 1(1), p. 86. doi: 10.1504/IJPLM.2005.007347.
- Price, D. et Bodington, R. (2004) « Applying semantic web technology to the life cycle support of complex engineering assets », in *International Semantic Web Conference*, p. 812-822.
- PROMISE (2006) « PROduct lifecycle Management and Information tracking using Smart Embedded systems (PROMISE) ». Disponible sur: home.
- PROMISE (2009) *Product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems*.
- Pujo, P. (2011) *De l'Isoarchie pour le Pilotage des Systèmes de Production*. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, Marseille (France).
- Pujo, P., Broissin, N. et Ounnar, F. (2009) « PROSIS: An isoarchic structure for HMS control », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Elsevier, 22(7), p. 1034-1045.
- Pujo, P. et Kieffer, J. (2002) « Fondements du pilotage des systèmes de production ». Hermès Science.
- Rachuri, S., Subrahmanian, E., Bouras, A., Fenves, S. J., Foufou, S. et Sriram, R. D. (2008) « Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management: Role of standards », *Computer-Aided Design*, 40(7), p. 789-800.
- Ramirez, A. A. C. (2006) *Contribution à la modélisation et à la gestion des interactions produit-processus dans la chaîne logistique par l'approche produits communicants*.
- Ramparany, F. et Boissier, O. (2002) « Smart devices embedding multi-agent technologies for a pro-active world », in *Proc. of the Ubiquitous Computing Workshop*.
- Ranasinghe, D. C., Harrison, M., Främling, K., McFarlane, D., Främling, K. et McFarlane, D. (2010) « Enabling through life product-instance management: Solutions and challenges », *Journal of Network and Computer Applications*. Elsevier, 34(3), p. 1015-1031.
- Raza, M., Kirkham, T., Harrison, R. et Reul, Q. (2011) « Knowledge-based flexible and integrated PLM system at Ford », *Journal of Information and Systems management*, 1(1), p. 8-16.
- Reix, R., Fallery, B., Kalika, M. et Rowe, F. (2016) *Systèmes d'information et management*. Vuibert.
- Rink, D. (1979) « Product life cycle research: A literature review », *Journal of Business Research*, 7(3), p. 219-242. doi: 10.1016/0148-2963(79)90030-4.
- Roucoules, L., Noël, F., Teissandier, D., Lombard, M., Debarbouille, G., Girard, P., Merlo, C. et Eynard, B. (2006) « IPPOP: an open source collaborative design platform to link product, design process and industrial organisation information », in *6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME'06*, p. CDROM.
- Saaty, T. L. (1990) « How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process », *European journal of operational research*, 48(1), p. 9-26.
- Sallez, Y. (2012) *Produit « actif » tout au long de son cycle de vie*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Sallez, Y., Berger, T., Deneux, D. et Trentesaux, D. (2010) « The lifecycle of active and intelligent products: The augmentation concept », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(10), p. 905-924.

- Sallez, Y., Montreuil, B. et Ballot, E. (2015) « On the activeness of physical internet containers », *Studies in Computational Intelligence*. Elsevier B.V., 594, p. 259-269. doi: 10.1007/978-3-319-15159-5\_24.
- Schemm, J., Legner, C. et Otto, B. (2007) « Global Data Synchronization-Current Status and Future Trends ». Institute of Information Management, University of St. Gallen.
- Schurgers, C. et Srivastava, M. B. (2001) « Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks », *IEEE Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001*, 1(c), p. 357-361. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MILCOM.2001.985819>.
- Selma, C., El Haouzi, H. B., Thomas, P., Gaudreault, J. et Morin, M. (2018) « An iterative closest point method for measuring the level of similarity of 3D log scans in wood industry », in *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. Springer, p. 433-444.
- Sen, J. et Ukil, A. (2009) « An adaptable and QoS-aware routing protocol for wireless sensor networks », in *Proceedings of the 2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems Technology, Wireless VITAE 2009*, p. 767-771. doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172546.
- Shah, R. C. et Rabaey, J. M. (2002) « Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks », *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE*, 1, p. 350-355. doi: 10.1109/WCNC.2002.993520.
- Shi, G., Zheng, J., Yang, J. et Zhao, Z. (2012) « Double-blind data discovery using double cross for large-scale wireless sensor networks with mobile sinks », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(5), p. 2294-2304. doi: 10.1109/TVT.2012.2194310.
- Shin, J.-H., Kim, J., Park, K. et Park, D. (2005) « Railroad: virtual infrastructure for data dissemination in wireless sensor networks », in *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, p. 168-174.
- Shokrzadeh, H., Haghghat, a. T., Tashtarian, F. et Nayebi, a. (2007) « Directional rumor routing in wireless sensor networks », *2007 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet*, p. 1-5. doi: 10.1109/CANET.2007.4401659.
- Singh, A. et Kahlon, K. S. (2009) « Non-replicated Dynamic Data Allocation in Distributed Database Systems », *IJCSNS*, 9(9), p. 176.
- Sleit, A., AlMobaideen, W., Al-Areqi, S. et Yahya, A. (2007) « A Dynamic Object Fragmentation and Replication Algorithm In Distributed Database Systems », *American Journal of Applied Sciences*, 4(8), p. 613-618.
- Son, J. H. et Kim, M. H. (2004) « An adaptable vertical partitioning method in distributed systems », *Journal of Systems and Software*, 73(3), p. 551-561.
- Stark, J. (2011) « Product Lifecycle Management », *Product Lifecycle Management*, p. 6-7. doi: 10.1007/978-0-85729-546-0.
- Stock, T. et Seliger, G. (2016) « Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0 », *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 40(Icc), p. 536-541. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.129.
- Streitz, N. et Nixon, P. (2005) « The disappearing computer », *Communications of the ACM*, 48(3), p. 32-35.
- Sudarsan, R., Fenves, S. J., Sriram, R. D. et Wang, F. (2005) « A product information modeling framework for product lifecycle management », *Computer-aided design*, 37(13), p. 1399-1411.

- Sun, H., Fan, W., Shen, W. et Xiao, T. (2012) « Ontology-based interoperation model of collaborative product development », *Journal of Network and Computer applications*. Elsevier, 35(1), p. 132-144.
- Sundmaeker, H., Guillemin, P., Friess, P. et Woelfflé, S. (2010) « Vision and challenges for realising the Internet of Things », *Cluster of European Research Projects on the Internet of Things, European Commission*.
- Tajima, M. (2007) « Strategic value of RFID in supply chain management », *Journal of purchasing and supply management*, 13(4), p. 261-273.
- Tamhankar, A. M. et Ram, S. (1998) « Database fragmentation and allocation: an integrated methodology and case study », *Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 28(3), p. 288-305.
- Tan, L. et Wang, N. (2010) « Future Internet: The Internet of Things », in *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, p. V5--376.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. et Sui, F. (2017) « Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. doi: 10.1007/s00170-017-0233-1.
- Tasharofi, S. et Basseda, R. (2006) « Near Neighborhood Allocation (NNA): A Novel Dynamic Data Allocation Algorithm in DDB », in *11th Computer Society of Iran Computer Conference*.
- Tayur, S., Ganeshan, R. et Magazine, M. (1999) *Quantitative models for supply chain management*. Springer Netherlands.
- Terzi, S., Ball, P. D., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., Gurumoorthy, B., Han, S. et Kiritsis, D. (2008) « A new point of view on Product Lifecycle Management », *International Journal of Product Lifecycle Management*. Inderscience, 4, p. 497-528.
- Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D. et Garetti, M. (2010) « Product lifecycle management--from its history to its new role », *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(4), p. 360-389.
- The Open Group (2014a) « O-DF, Open Data Format, an Open Group Internet of Things (IoT) Standard, C14A, US ISBN 1-937218-59-1 ».
- The Open Group (2014b) « O-MI, Open Messaging Interface, an Open Group Internet of Things (IoT) Standard, Reference C14B, US ISBN 1-937218-60-7 ».
- Thomas, A. (2009) « RFID et nouvelles technologies de communication; enjeux économiques incontournables et problèmes d'éthique », in *6ème Conférence Internationale Conception et Production Intégrées (CPI'2009)*.
- Thomas, P. (2014) *Exploitation de données pour la modélisation*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Lorraine.
- Tian, H., Shen, H. et Matsuzawa, T. (2006) « Random walk routing in WSNs with regular topologies », *Journal of Computer Science and Technology*, 21(4), p. 496-502. doi: 10.1007/s11390-006-0496-8.
- Tran-Dang, H., Krommenacker, N. et Charpentier, P. (2014) « Localization algorithms based on hop counting for wireless nano-sensor networks », in *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2014 International Conference on*, p. 300-306.
- Tran-Dang, H., Krommenacker, N. et Charpentier, P. (2015) « Enhancing the functionality of

- Physical Internet containers by wireless sensor networks », in *Second International Physical Internet Conference, IPIC'2015*.
- Trentesaux, D. (2002) *Pilotage hétéroarchique des systèmes de production*. L'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), Valenciennes (France).
- Tunca, C., Isik, S., Donmez, M. Y. et Ersoy, C. (2014) « Distributed Mobile Sink Routing for Wireless Sensor Networks: A Survey », *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(2), p. 877-897. doi: 10.1109/SURV.2013.100113.00293.
- Tursi, A., Panetto, H., Morel, G. et Dassisti, M. (2009) « Ontological approach for products-centric information system interoperability in networked manufacturing enterprises », *Annual Reviews in Control*, 33(2), p. 238-245. doi: 10.1016/j.arcontrol.2009.05.003.
- Ulus, T. et Uysal, M. (2003) « Heuristic approach to dynamic data allocation in distributed database systems », *Pakistan Journal of Information and Technology*, 2(3), p. 231-239.
- Uysal, M. et Ulus, T. (2007) « A Threshold Based Dynamic Data Allocation Algorithm-A Markov Chain Model Approach », *Journal of Applied Sciences*, 7, p. 165-174.
- Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bongaerts, L. et Wyns, J. (1997) « Holonic manufacturing systems », *Integrated Computer-Aided Engineering*, 4(3), p. 191-201.
- Vecchio, M., Viana, A. C., Ziviani, A. et Friedman, R. (2010) « DEEP: Density-based proactive data dissemination protocol for wireless sensor networks with uncontrolled sink mobility », *Computer Communications*, 33(8), p. 929-939. doi: 10.1016/j.comcom.2010.01.003.
- Vegetti, M., Leone, H. et Henning, G. (2011) « PRONTO: An ontology for comprehensive and consistent representation of product information », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(8), p. 1305-1327. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2011.02.014>.
- Ventä, O. (2007) « Intelligent products and systems », *Technology Theme-Final Report. VTT, Espoo: VTT Publications*, p. 304.
- Vernadat, F. B. (2007) « Interoperable enterprise systems: Principles, concepts, and methods », *Annual Reviews in Control*, 31(1), p. 137-145. doi: 10.1016/j.arcontrol.2007.03.004.
- Wan, W. H. (1999) « Introduction to STL format », *polytechnical university of Hong Kong*. Disponible sur: [http://download.novedge.com/Brands/FPS/Documents/Introduction\\_To\\_STL\\_File\\_Format.pdf](http://download.novedge.com/Brands/FPS/Documents/Introduction_To_STL_File_Format.pdf).
- Wang, G., Wang, T., Jia, W., Guo, M. et Li, J. (2009) « Adaptive location updates for mobile sinks in wireless sensor networks », *The Journal of Supercomputing*. Springer, 47(2), p. 127-145.
- Wang, Y.-M., Luo, Y. et Hua, Z. (2008) « On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications », *European Journal of Operational Research*, 186(2), p. 735-747.
- Weiser, M. (1991) « The computer for the 21st century », *Scientific American*, 265(3), p. 94-104.
- Wohlers, R., Trigoni, N., Zhang, R. et Ellwood, S. (2009) « TwinRoute: Energy-efficient data collection in fixed sensor networks with mobile sinks », in *Proceedings - IEEE International Conference on Mobile Data Management*, p. 192-201. doi: 10.1109/MDM.2009.30.
- Wong, C. Y., Mcfarlane, D., Zaharudin, A. A. et Agarwal, V. (2002) « The Intelligent Product Driven Supply Chain », in *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, p. 4-6.
- Wycisk, C., McKelvey, B. et Hülsmann, M. (2008) « “Smart parts” supply networks as complex adaptive systems: analysis and implications », *International Journal of Physical Distribution*

& *Logistics Management*. Emerald Group Publishing Limited, 38(2), p. 108-125.

Yang, X., Moore, P., Pu, J.-S. et Wong, C.-B. (2009) « A practical methodology for realizing product service systems for consumer products », *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), p. 224-235. doi: 10.1016/j.cie.2008.05.008.

Ye, F., Chen, A., Lu, S. et Zhang, L. (2001) « A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks », *Proceedings - International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN*, 2001-Janua, p. 304-309. doi: 10.1109/ICCCN.2001.956276.

Ye, F., Zhong, G., Lu, S. et Zhang, L. (2005) « GRAdient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks », *Wireless Networks*, 11(3), p. 285-298. doi: 10.1007/s11276-005-6612-9.

Zabovsky, K. M. M. (2008) « A data replication for mobile environment », *Journal of Electrical Engineering*, 59(5), p. 277-280.

Zambrano Rey, G., Pach, C., Aissani, N., Bekrar, A., Berger, T. et Trentesaux, D. (2013) « The control of myopic behavior in semi-heterarchical production systems: A holonic framework », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(2), p. 800-817. doi: 10.1016/j.engappai.2012.08.011.

Zhang, Y. F., Wang, J. Q. et Sun, S. D. (2011) « Real-Time Information Capturing and Integration Framework of the Internet of Manufacturing Things », *Applied Mechanics and Materials*, 121-126(8), p. 4059-4063. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.4059.

Zhao, W. et Liu, J. K. (2008) « OWL/SWRL representation methodology for EXPRESS-driven product information model: Part I. Implementation methodology », *Computers in industry*. Elsevier, 59(6), p. 580-589.