



**HAL**  
open science

## Produit ” actif ” tout au long de son cycle de vie

Yves Sallez

► **To cite this version:**

Yves Sallez. Produit ” actif ” tout au long de son cycle de vie. Automatique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2012. tel-00768771

**HAL Id: tel-00768771**

**<https://theses.hal.science/tel-00768771>**

Submitted on 23 Dec 2012

**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.



N° Ordre : 12/05

Thermique  
Ecoulement  
Mécanique  
Matériaux  
Mise en Forme  
PrOduction



# Habilitation à diriger des recherches

Présentée à

l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

Laboratoire TEMPO (Thermique Ecoulement Mécanique Matériaux Mise en Forme Production)

dans la spécialité Automatique

par

**Yves SALLEZ**

*Maître de conférences*

## **Produit « actif » tout au long de son cycle de vie**

Soutenue le 4 décembre 2012, devant le jury composé de :

### **Rapporteurs :**

Professeur Pierre CASTAGNA  
Professeur Bernard GRABOT  
Professeur André THOMAS

Institut Universitaire de Technologie de Nantes  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes  
Ecole Nationale Supérieure des Technologies et  
Industries du Bois & Centre de Recherche en  
Automatique de Nancy

### **Examineurs :**

Professeur Kary FRÄMLING  
Professeur Samir LAMOURI  
Professeur Christian TAHON

Université d'Aalto, Finlande  
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers,  
Paris Tech  
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis

### **Directeur de Recherche :**

Professeur Damien TRENTESAUX

Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>6</b>
<b>Chapitre 1 : Contexte et problématique</b>	<b>8</b>
Introduction	8
I/ Contexte de l'étude	8
I-1/ Notion de cycle de vie d'un produit	8
I-2/ Contraintes associées au cycle de vie	9
I-2-1/ Contraintes générales liées au développement durable	9
I-2-2/ Contraintes liées au « Produit »	10
I-2-3/ Contraintes liées aux différents systèmes de soutien	10
I-3/ Pistes de progrès proposées au niveau de la communauté Productique	10
II/ Les paradigmes de produit « intelligent » et de système contrôlé par la produit	11
II-1/ Implication du domaine de l'Automatique / Productique dans la thématique « Produit intelligent »	12
II-2/ Implication du domaine du Product Lifecycle Management dans la thématique « Produit intelligent »	12
II-3/ Implication du domaine de l'Informatique dans la thématique « Produit intelligent »	13
III/ Etat de l'art sur les définitions de produits « intelligents / actifs »	15
III-1/ Définitions issues du domaine de la Productique	15
III-2/ Définitions issues du domaine de l'Intelligence Ambiante	17
III-3/ Autres concepts proposés	18
III-4/ Synthèse des différentes définitions de produit « intelligent / actif »	19
IV/ Etat de l'art sur les typologies de produits « intelligents »	19
IV-1/ Typologies monocritère des produits « intelligents »	20
IV-2/ Typologie multicritères des produits « intelligents »	22
IV-3/ Etat de l'art sur les typologies de collectifs de produits « intelligents »	25
IV-4/ Synthèse des différentes typologies de produits « intelligents / actifs »	26
V/ Problématiques associées au concept de produit « intelligent / actif »	27
Conclusion	29
<b>Chapitre 2 : Concept de produit « actif » et modélisation associée</b>	<b>30</b>
Introduction	30
I/ Notion de produit « actif » tout au long de son cycle de vie	30
I-1/ Fonctions principales et secondaires associées à un produit	30
I-2/ Notion de processus décisionnel	31
I-3/ Définition de l'activité associée à un produit	31
I-4/ Intérêt d'un produit « actif » tout au long de son cycle de vie	32
I-4-1/ Amélioration des performances au sein de chaque phase du cycle de vie	32
I-4-2/ Amélioration de la qualité des flux d'informations entre les différentes phases du cycle de vie	34
II/ Présentation de l'approche de modélisation	34
II-1/ Spécifications	34
II-2/ Approche de modélisation	34
III/ Vue fonctionnelle globale	35
IV/ Vue évolutionniste	36
V/ Vue fonctionnelle / organique détaillée	37
V-1/ Volet « Cycle de vie »	38
V-2/ Volet « Classe »	38
V-3/ Volet « Descriptif du collectif »	38
V-4/ Volet « Descriptif relationnel »	40
V-5/ Volet « Implémentation »	40
Conclusion	41
<b>Chapitre 3 : Analyse des contributions internationales et nationales</b>	<b>42</b>
Introduction	42
I/ Proposition d'un cadre d'analyse de l'activité associée à un collectif de produits	42
II/ Positionnement des contributions au niveau international	43
II-1/ Communauté œuvrant dans le domaine du Pilotage des systèmes de production	43
II-1-1/ Approches bio-inspirées et bioniques	44
II-1-2/ Approches multi-agents	44
II-1-3/ Approches holoniques	45
II-2/ Communauté œuvrant dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques	45
II-3/ Communauté œuvrant dans le domaine du Closed loop PLM	46

II-4/ Communauté œuvrant dans le domaine de l'interopérabilité	48
III/ Positionnement des contributions au niveau national	49
III-1/ Les équipes développant une thématique « Produit actif / intelligent »	49
III-2/ Autres équipes nationales œuvrant plus ponctuellement sur le produit « actif / intelligent»	51
III-2-1/ Domaine du pilotage des systèmes manufacturiers	51
III-2-2/ Domaine du pilotage des chaînes logistiques	51
III-2-3/ Domaine du PLM (Product Lifecycle Management)	52
III-2-4/ Domaine de l'Interopérabilité	52
IV/ Les travaux des projets internationaux	52
V/ Les communautés scientifiques	54
Conclusion	55
<b>Chapitre 4 : Contributions et résultats de Recherche</b>	<b>56</b>
Introduction	56
I/ Thématique n°1 : Reconfiguration des systèmes automatisés de production / Premiers pas vers le concept d'activité associée au produit	56
I-1/ Contexte et problématique	56
I-2/ Travaux réalisés	56
I-2-1/ Formalisation des modes de fonctionnement d'un SAP	56
I-2-2/ Développement d'outils d'aide à l'exploitant	57
I-3/ Résultats obtenus et limitations mises en évidence	57
II/ Thématique n°2 : Apport du concept d'augmentation pour les systèmes contrôlés par le produit en phase de fabrication	58
II-1/ Contexte et problématique	58
II-2/ Application du concept d'augmentation dans le domaine manufacturier	58
II-3/ Instrumentation utilisée pour les expérimentations	59
II-4/ Travaux réalisés	60
II-5/ Résultats obtenus	61
III / Thématique n°3 : Apport du concept d'augmentation en phase d'usage pour des applications de diagnostic de systèmes complexes	62
III-1/ Contexte et problématique	62
III-2/ Application du concept d'augmentation en phase d'usage pour le diagnostic de systèmes complexes	63
III-3/ Travaux réalisés	63
III-3-1/ Architecture associée à la fonction diagnostic	63
III-3-2/ Méthode utilisée pour le diagnostic	63
III-4/ Résultats obtenus	65
IV/ Thématique n°4 : Apport du concept d'augmentation en phase d'usage pour des applications de routage en milieu urbain	65
IV-1/ Contexte général et problématique	65
IV-2/ Application du concept d'augmentation pour l'aide à la navigation	66
IV-3/ Travaux réalisés	66
IV-4/ Résultats obtenus	67
Conclusion	68
<b>Chapitre 5 : Perspectives de Recherche</b>	<b>70</b>
Introduction	70
I/ Thématique n°1 : Etude des concepts d'auto-organisation	71
I-1/ Contexte / Problématique	71
I-2/ Directions de recherche proposées	71
II/ Thématique n°2 : Etude de l'apport du concept de produit « actif » pour le closed-loop PLM	72
II-1/ Contexte / Problématique	72
II-2/ Directions de recherche proposées	72
III/ Thématique n°3 : Etude du concept de maquette « active » en phase de conception	74
III-1/ Contexte / Problématique	74
III-2/ Directions de recherche proposées	74
IV/ Thématique n°4 : Etude de l'apport des produits « actifs » pour le développement de l'Internet Physique	75
IV-1/ Contexte / Problématique	75
IV-2/ Directions de recherche proposées	75
IV-2-1/ Etude et mise en œuvre de containers « actifs »	75
IV-2-2/ Gestion de la logistique au sein des hubs	76
V/ Thématique n°5 : Etude d'un système d'aide à la décision intégrant une coopération Hommes-Produits « actifs »	77
V-1/ Contexte / Problématique	77

V-2/ Directions de recherche proposées	77
Conclusion	77
<b><i>Conclusion générale</i></b>	<b>78</b>
<b><i>Références</i></b>	<b>80</b>
<b><i>Liste des figures</i></b>	<b>94</b>
<b><i>Annexes</i></b>	<b>96</b>
ANNEXE I - Publications et thèses	98
ANNEXE II - Exemples de flux d'informations amont et aval	106
ANNEXE III - Bref état de l'art sur les typologies de collectifs	108
ANNEXE IV - Liste des projets Européens du volet ITC dans le domaine du Produit « Intelligent / Actif »	112



## *Introduction générale*

Mes activités de recherche sont menées au sein de l'équipe PSI (Production, Services, Information) sous la direction du professeur Damien Trentesaux. Cette équipe fait partie du laboratoire TEMPO (Thermique, Energétique, Mécanique et Matériaux, PrOcéds de mise en forme, PrOduction) - EA 4542, dirigée par le professeur Laurent Dubar à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Après ma nomination comme maître de conférences en 1988, j'ai mené mes premières activités de Recherche sous la direction du professeur René Soënen. Ces travaux ont porté sur l'exploitation des systèmes automatisés de production et ont donné lieu au co-encadrement de trois thèses. Cette problématique m'a amené à développer des modèles et outils d'aide à l'exploitant facilitant notamment la reconfiguration du système en présence de perturbations. La mise en œuvre centralisée des approches de reconfiguration se heurtait cependant à certaines limitations, notamment dues à l'impossibilité d'instrumenter le flux de produits à un coût raisonnable.

Après une période durant laquelle les responsabilités de Directeur-adjoint de l'EIGIP (Ecole d'Ingénieurs en Génie Informatique et Productique) m'ont accaparé, j'ai pu relancer mon activité de Recherche sous la direction du professeur Christian Tahon. J'ai alors abordé les problèmes d'exploitation des systèmes automatisés sous l'angle d'une reconfiguration plus implicite en passant d'une résolution « centralisée » du problème à une résolution « distribuée ». Ce changement de paradigme m'a amené à m'intéresser aux systèmes décisionnels distribués et plus particulièrement au concept de produit « actif ».

Au travers du projet PPF « Cœur de ville » portant sur la gestion d'une flotte de cyber-véhicules en milieu urbain et surtout du projet SCP (Système Contrôlé par le Produit) du GDR Macs, j'ai pu mener un ensemble de travaux sur la notion d'activité associée à un produit tout au long de son cycle de vie. Ces travaux ont donné lieu au co-encadrement de trois autres thèses avec Christian Tahon et Damien Trentesaux.

La co-direction du projet SCP (2007-2008) avec le professeur Eddy Bajic du CRAN m'a permis de mieux positionner mes travaux au sein de la communauté française qui commençait à se structurer autour du concept de produit « intelligent / actif ». Un certain nombre de travaux (Sallez et al., 2010a ; Sallez, 2012) et de discussions avec les principaux acteurs de la communauté nationale, au travers du groupe de travail IMS2 (Intelligent Manufacturing Systems and Services) du GDR Macs m'ont permis d'affiner les concepts décrits dans le cadre de ce mémoire.

Mon implication dans le suivi du projet FUI « SURFER » (SURveillance active FERroviaire), dirigé par Bombardier Transport, m'a donné l'occasion de mettre en œuvre ces concepts dans le domaine industriel et dans un nouveau contexte applicatif de maintenance prédictive.

Le présent document reprend uniquement la partie scientifique du mémoire original. La liste de mes publications ainsi que le détail des thèses co-encadrées sont disponibles en annexe I. Ce document est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre précise le contexte de l'étude et met en évidence les enjeux et problématiques associés au concept de produit « intelligent / actif ».

Le deuxième chapitre présente le concept d'activité associée au produit tout au long de son cycle de vie et propose un modèle générique permettant de prendre en compte les différentes facettes de cette activité.

Un cadre d'analyse, découlant de ce modèle générique, est introduit dans le troisième chapitre. Il est ensuite utilisé pour caractériser et positionner les différentes contributions nationales et internationales.

Le quatrième chapitre est dédié à une présentation de mes travaux et à leur caractérisation au regard du cadre d'analyse.

Un ensemble de thèmes de Recherche prospectifs, à court et moyen termes, sont enfin proposés dans le cinquième chapitre.





# ***Chapitre 1 : Contexte et problématique***

## **Introduction**

Ce premier chapitre a pour ambition de préciser le contexte global ainsi que les enjeux et problématiques associés au concept de produit « intelligent / actif ».

Dans une première partie, nous précisons le contexte de notre étude, établi notamment à partir de l'analyse de plusieurs documents prospectifs concernant le domaine de la Productique.

La seconde partie sera consacrée à une présentation des préoccupations de la communauté Productique ayant mené au développement des concepts de produit « intelligent / actif » et de « Systèmes Contrôlés par le Produit ». Les apports et implications d'autres communautés seront également mis en évidence et analysés.

Les parties 3 et 4 seront respectivement dédiées à un état de l'art des terminologies et des typologies relatives au produit « intelligent / actif », proposées par ces différentes communautés.

Dans une dernière partie, nous mettrons en évidence les problématiques et les verrous scientifiques et précisons ceux qui feront l'objet de nos travaux de Recherche.

## **I/ Contexte de l'étude**

Les paragraphes ci-après présentent le contexte de l'étude, les contraintes associées et les pistes de progrès envisagés en ce qui concerne la communauté Productique. Notre discours est amplement basé sur l'analyse de plusieurs études prospectives (Baptiste et al., 2007 ; Grabot, 2011 ; Lamnabhi-Lagarrigue, 2011 ; Manufuture, 2004 ; IMS, 2010 ; Ministère de l'Industrie, 2010).

Avant d'aborder la présentation des différentes contraintes, la section suivante précise la notion de cycle de vie d'un produit.

### **I-1/ Notion de cycle de vie d'un produit**

Trois principales phases du cycle de vie sont classiquement distinguées au niveau d'un produit (Stark, 2006 ; Terzi et al., 2008) :

- le début de la 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.

Dans la suite de ce mémoire, nous considérerons le produit comme une entité transitant au travers de différents systèmes de soutien tout au long de son cycle de vie.

Un système de soutien sera vu comme un ensemble de ressources (matérielles, logicielles, humaines) aptes à offrir des services au produit. Ces services peuvent être caractérisés de « physiques » ou « informationnels », classés selon les dimensions Espace / Temps / Forme utilisées en systémique (Le Moigne, 1994) :

- transformation d'espace : transformation physique (ex : service de transport) et transformation informationnelle (ex : transmission de données),
- transformation de temps : transformation physique (ex : service de stockage) et transformation informationnelle (ex : mémorisation de données),
- transformation de forme : transformation physique (ex : usinage, assemblage) et transformation d'informations (ex : traitement de données).

Notons que si un produit est essentiellement consommateur de services lors de son cycle de vie, il est à son tour producteur de services lors de sa phase d'usage. Lors de cette phase, il est cependant toujours tributaire de systèmes de soutien pour son approvisionnement ou sa maintenance.

## I-2/ Contraintes associées au cycle de vie

D'après un rapport récent, rédigé par 250 experts, sur les Technologies clés 2015 (Ministère de l'Industrie, 2010) et repris dans le rapport Prospectif STP (Grabot, 2011), les marchés exhibent de nouvelles caractéristiques :

- des cycles économiques de plus en plus rapides,
- une évolution des structures de marchés impliquant une imbrication de plus en plus forte entre industrie et services, et le développement d'entreprises « ouvertes », travaillant avec un réseau de partenaires.

Dans ce contexte, les produits et les systèmes de soutien associés sont confrontés à tout un ensemble de contraintes illustrées dans la figure 1. Ces contraintes peuvent être classées en trois catégories :

- les contraintes liées au produit en tant que tel, avec des exigences des consommateurs de plus en plus fortes, notamment en matière de personnalisation,
- les contraintes associées aux systèmes de soutien, induites en partie par les précédentes et se traduisant par exemple par une réduction drastique des temps de cycle,
- les contraintes de développement durable, affectant l'ensemble du cycle de vie du produit.

Ces trois catégories de contraintes sont détaillées dans les trois prochaines sections.

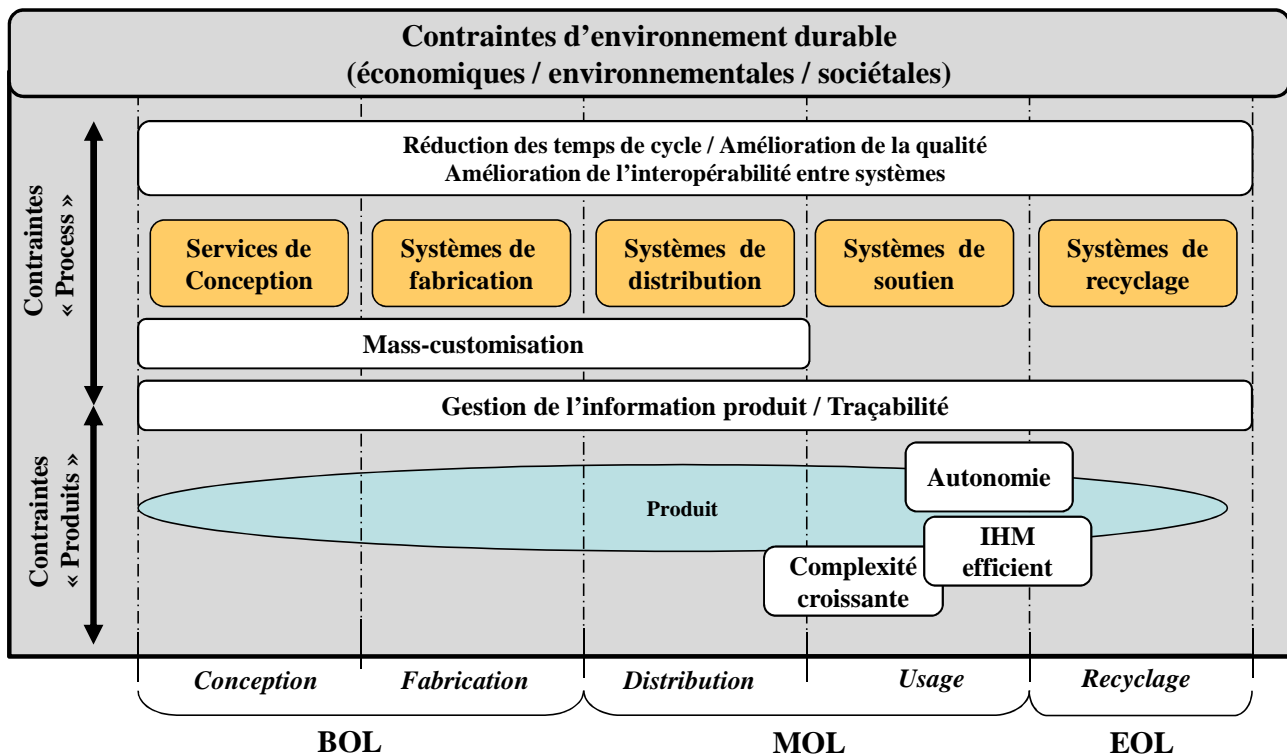


Figure 1. Contraintes associées au cycle de vie d'un produit

### I-2-1/ Contraintes générales liées au développement durable

La notion de développement durable est considérée comme le cadre général dans lequel doivent évoluer les entreprises. Cette notion peut être représentée par un triptyque intégrant contraintes économiques, sociétales et environnementales. Ces contraintes sont globales et s'appliquent tant aux produits qu'aux différents systèmes de soutien associés.

Au niveau des produits, le développement durable implique par exemple :

- le développement de produits « éco-efficients » selon une philosophie « cradle to cradle » (McDonough & Braungart, 2011),
- la gestion des aspects sécuritaires liés à l'utilisation ou à toute intervention sur le produit,
- la diminution des coûts de possession du produit.

Au niveau des systèmes de soutien, la prise en compte des contraintes de développement durable se traduit, par exemple, par :

- une meilleure utilisation des sources d'énergie nécessaires aux systèmes de production,
- une diminution de l'empreinte carbone des chaînes logistiques,
- une diminution des délais et des coûts associés aux différents process.

#### I-2-2/ Contraintes liées au « Produit »

Les entreprises sont amenées à concevoir des produits :

- de plus en plus complexes : Les produits mécatroniques incluant composants mécaniques, électroniques et systèmes embarqués offrent des fonctionnalités étendues et sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne (appareils électro-ménagers, appareils audio-visuels, systèmes de transport),
- de plus en plus autonomes : De nombreux produits de consommation évoluent vers des degrés plus élevés d'autonomie afin de pouvoir effectuer des tâches complexes et réagir aux variations de l'environnement sans intervention de l'utilisateur,
- de plus en plus « intuitifs » à utiliser via des interfaces Homme-machine efficaces,
- de plus en plus « diversifiés » : la diversité au niveau des produits a pour objectif d'augmenter le choix proposé au client et de lui assurer ainsi une meilleure satisfaction.

#### I-2-3/ Contraintes liées aux différents systèmes de soutien

Les contraintes précédentes induisent également des contraintes au niveau des différents systèmes de soutien traversés par le produit :

- une complexité croissante des systèmes de production pour faire face à la mass-customisation (Da Silveira et al., 2001),
- la nécessité d'une diminution des temps de cycle et d'amélioration de la qualité des produits, impliquant la maîtrise des aléas (panne de ressource, perturbation de la chaîne logistique...),
- la nécessité d'une meilleure traçabilité, afin de mieux gérer les informations et les connaissances associées au produit tout au long de son cycle de vie,
- la nécessité de prendre en charge les problèmes d'interopérabilité entre les différents systèmes traversés par le produit. Un effet «Tour de Babel », induit par l'hétérogénéité des applications (MES, PDM, ERP...), des différents utilisateurs et des domaines applicatifs, conduit à des pertes d'information sémantique et à un manque de cohérence (Dassisti et al., 2006 ; Tursi et al., 2009). Ces pertes sont particulièrement notables lors du passage de la phase BOL à la phase MOL. En effet, lors de la phase BOL, les flux d'informations circulant entre les étapes de conception et de fabrication sont relativement bien maîtrisés par les systèmes de CAO/CFAO et les systèmes de gestion de données. Cependant, au cours de la phase MOL, la multiplicité et la diversité des utilisateurs et intervenants rend le flux d'informations plus imprécis et diffus, et perturbe considérablement la remontée des informations des phases MOL et EOL vers la phase BOL (Shin, 2009).

### I-3/ Pistes de progrès proposées au niveau de la communauté Productique

Pour faire face à l'ensemble des contraintes précédentes, les conclusions des différents travaux prospectifs cités précédemment prônent :

- l'adoption d'une approche holistique de cycle de vie des produits et organisations, incluant les différentes contraintes du développement durable (économiques, environnementales et sociétales),
- le développement de systèmes de production plus agiles facilement reconfigurables aptes à gérer la mass-customisation,
- le développement au niveau de la chaîne logistique, d'organisations capables de nouer des collaborations efficaces via des systèmes d'informations interopérables,
- le développement de nouveaux outils d'aide à la décision distribuée, aptes à supporter la collaboration des différents acteurs intervenant dans les différents systèmes de soutien.

Ces pistes viennent conforter les conclusions d'un rapport prospectif daté du 15 Janvier 2007 (Baptiste et al., 2007). Dans ce rapport, le Comité d'Experts Productique du CNRS mettait l'accent sur l'importance de rendre le produit « actif » au niveau de son cycle de vie. Il relevait notamment « *la difficulté à faire interopérer des objets de nature différente en explorant les possibilités d'homogénéiser leurs capacités respectives d'interactions tout en maîtrisant l'émergence des propriétés issues de ces interactions multiples.*

Un premier défi scientifique est ici de rendre interactif le comportement du procédé, et particulièrement du produit, en tirant parti des progrès des technologies infotroniques (Rfid, communication sans fil, ...) pour le pilotage (ordonnancement et commande) en exécution (« on the fly ») d'un système de production. Ce paradigme holonique du contrôle par le produit pour synchroniser logiquement les comportements du procédé et du pilotage en regard d'objectifs variants assignés au système ouvre des perspectives intéressantes d'intégration de micro et nanotechnologies (réseaux de capteurs, « smart technology », etc ) afin de rendre le produit actif dans la boucle cybernétique, ainsi que d'intégration de systèmes multi-agents pour rendre l'architecture de pilotage plus hétérarchique ».

Ces considérations ont motivé les travaux de Recherche présentés dans ce mémoire de HDR via le concept de produit « intelligent / actif ». Les bases de ce concept sont exposées dans la partie suivante.

## II/ Les paradigmes de produit « intelligent » et de système contrôlé par la produit

Comme illustré par la figure 2, le champ de Recherche qui nous intéresse via le concept de produit « intelligent / actif » se situe à la confluence de trois communautés de Recherche :

- la communauté Automatique / Productique via les travaux sur le pilotage des systèmes de production, des chaînes logistique et plus généralement des systèmes complexes,
- la communauté s'intéressant aux problématiques de Product Lifecycle Management via le concept de « Closed-loop PLM »,
- la communauté Informatique via principalement les travaux sur l'intelligence ambiante et l'Internet Of Things (IOT).

L'influence de chacune des trois communautés est présentée dans les sections suivantes.

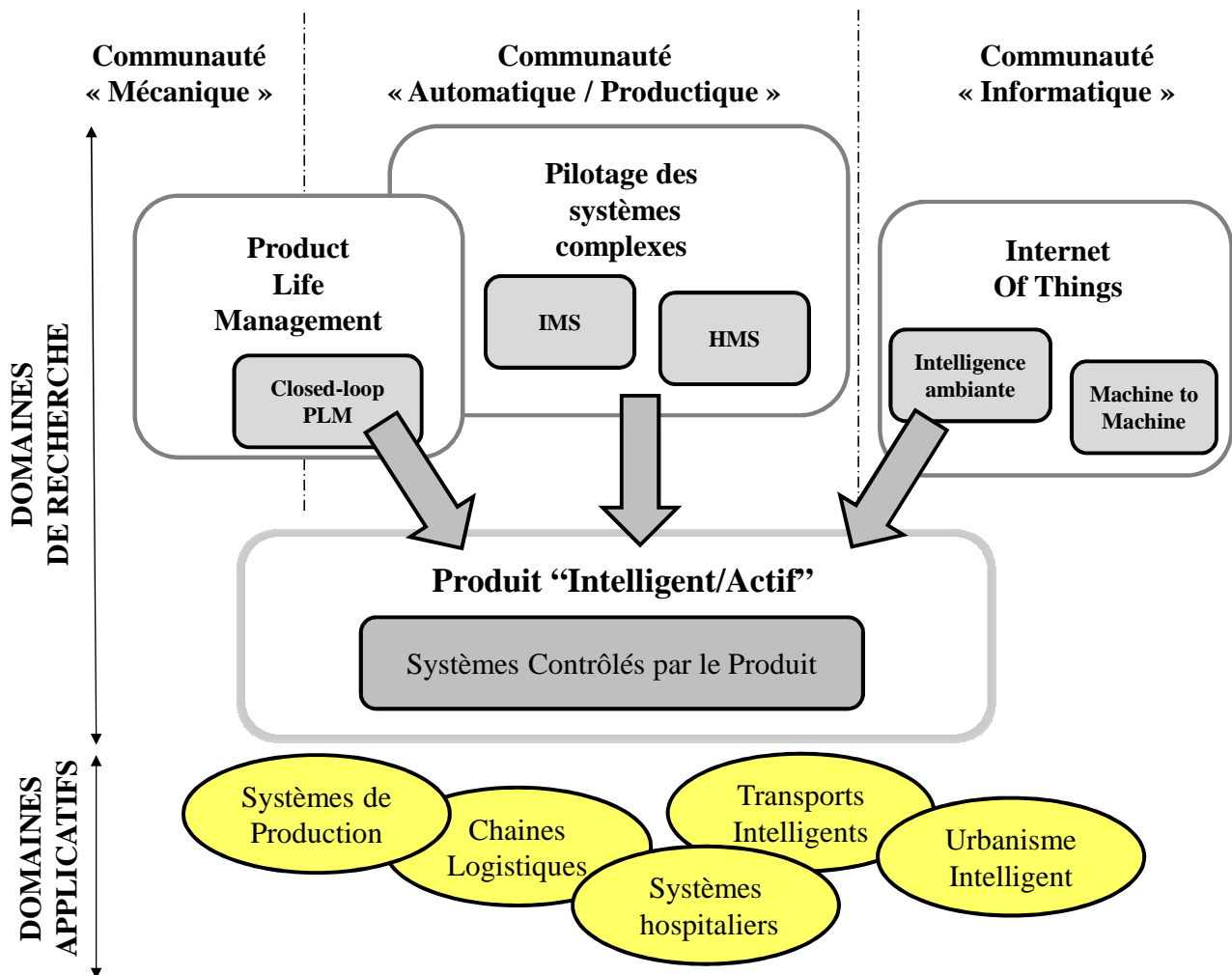


Figure 2. Positionnement de la thématique de Recherche « Produits Intelligents / Actifs »

## **II-1/ Implication du domaine de l'Automatique / Productique dans la thématique « Produit intelligent »**

Les évolutions scientifiques survenues ces deux dernières décennies dans les thématiques de recherche en productique ont eu vocation à conférer plus d'automatisation aux équipements, à définir de nouvelles architectures de commande et pilotage des moyens de production permettant une plus grande flexibilité, reconfigurabilité et réactivité du système. Les initiatives de recherches françaises (MRT, SPI-SHS, PROSPER, ...) et internationales IMS (Intelligent Manufacturing Systems), HMS (Holonomic Manufacturing Systems) ont permis de proposer de nouveaux concepts, modèles conceptuels, et architectures s'appuyant sur la décentralisation et la distribution des fonctions dites « intelligentes » de conduite des moyens et ressources, par des modèles hétérarchiques, distribués et appuyés par des systèmes et solutions multi-agents (Leitão, 2009; Trentesaux, 2009).

Une nouvelle approche en Productique s'est faite jour dans les années 90, visant à aborder la gestion et la conduite d'un système de production en accordant plus d'importance au produit lui-même, au détriment du système supérieur. La littérature a vu apparaître le terme de « produit intelligent » caractérisant les nouvelles compétences données au produit (McFarlane et al., 2003 ; Kärkkäinen et al., 2003).

Une approche de conduite centrée sur le produit s'est développée et a connu un développement dans le cadre du paradigme Holonique. Dans le paradigme de « Système contrôlé par le Produit », il s'agit de conférer au produit un rôle actif et participatif dans les décisions et les flux d'informations engendrés tout au long de son cycle de vie (Morel et al., 2003 ; Morel et al., 2007).

Un produit n'est plus un simple matériau circulant dans un atelier, mais un objet de production capable de réaliser des échanges et des interactions intelligentes avec des systèmes de décision et de pilotage de production. Ces fonctions de communication et d'interaction avec le produit sont rendues disponibles par les technologies d'identification automatique Rfid (Radio Frequency Identification), les réseaux de capteurs sans fils (Wireless Sensors Network) annonçant une forme d'intelligence technique permettant d'aller au-delà du transfert de données vers le partage et l'échange d'informations, la connaissance contextuelle, les services.

Au niveau de la communauté Automaticienne, on note également un vif intérêt pour la notion de produit ou système « intelligent ». Le rapport prospectif (Lamnabhi-Lagarrigue, 2011), résultant d'un travail collectif au sein du Réseau d'Excellence HYCON2 et validé par nombre d'industriels européens, met en évidence certains faits marquants :

- *« Récemment les systèmes de contrôle ont donc évolué vers les systèmes de contrôle embarqués et en réseau, appelés aussi 'systèmes cyber-physiques' (cyber-physical systems – CPS), prenant ainsi en compte la forte interaction des transmissions et du traitement de l'information en temps réel avec le dispositif physique ou le processus ».*
- *« Les futurs systèmes autonomes, comme les robots pour des opérations de recherche et de sauvetage, pour l'exploitation minière, pour exploration des fonds marins, etc. auront besoin de capacités cognitives importantes comme la perception, le raisonnement, l'apprentissage et autres. Les systèmes de contrôle cognitif dans les automobiles, les avions, les maisons et les applications d'ingénierie permettront d'améliorer la sécurité et des performances diverses. Les systèmes autonomes posent d'énormes défis pour concevoir et tester des méthodologies afin d'assurer un comportement sûr et fonctionnellement correct à partir du traitement en temps-réel de données de ces systèmes très complexes, dans toutes les situations imaginables. »*

Ce rapport met également en évidence la nécessité de maîtriser le pilotage de systèmes complexes constitués de nombreuses entités fortement interconnectées et exhibant de fortes non-linéarités au niveau de leur comportement tels que les réseaux de distribution électriques ou les infrastructures de transport.

Les nouvelles problématiques prônées par la communauté Automaticienne se situent à la croisée de l'automatique traditionnelle, de l'informatique et des télécommunications.

## **II-2/ Implication du domaine du Product Lifecycle Management dans la thématique « Produit intelligent »**

Les équipes de Recherche s'intéressant au Product Lifecycle Management, situées à l'intersection des communautés Mécanique et Productique, s'intéressent depuis quelques années au concept de « closed-loop PLM » (Cassina et al., 2006 ; Cassina et al. 2009 ; Kiritsis et al., 2003 ; Kiritsis, 2011).

Ce concept consiste à élaborer des flux d'informations aval et/ou amont à partir des connaissances glanées par le produit lors d'une phase spécifique du cycle de vie. Les flux d'informations aval sont utilisés comme intrants pour les phases suivantes de façon à améliorer leurs performances. Les flux d'informations amont supportent les retours d'expérience de façon à améliorer le produit existant ou les produits futurs (selon la durée de vie du produit). Ce concept repose principalement sur une intelligence ou activité associée au produit.

Quelques exemples de flux d'informations entre les phases BOL, MOL et EOL, dans un contexte closed-loop PLM, sont présentés en annexe II.

### **II-3/ Implication du domaine de l'Informatique dans la thématique « Produit intelligent »**

Après l'avènement du World Wide Web (dans les années 1990) et de l'Internet mobile (dans les années 2000), l'Internet évolue vers une nouvelle étape : l'Internet Of Things (IOT). L'internet des « objets » se réfère à un cyberspace où les objets, les utilisateurs ainsi que des environnements virtuels, interagissent les uns avec les autres.

Ce nouveau concept d'IOT peut être considéré comme une généralisation du concept de « Machine to Machine ». Dans le livre blanc (FING, 2006), la définition donnée pour ce dernier concept est la suivante : *Association des technologies de l'information et de la communication (TIC), avec des objets intelligents et communicants, dans le but de donner à ces derniers les moyens d'interagir sans intervention humaine avec le système d'information d'une organisation ou d'une entreprise.*

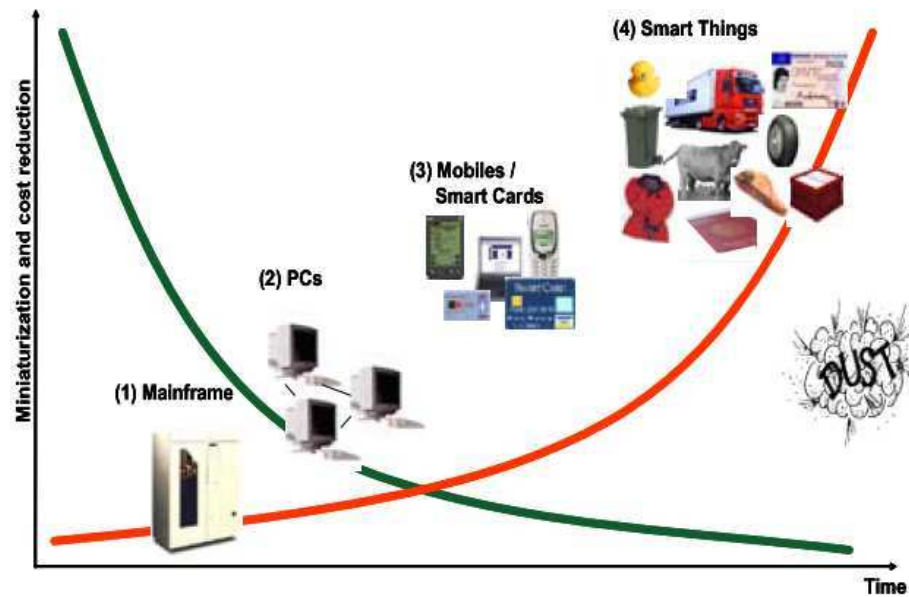
L'IOT exploite aussi pleinement les recherches réalisées dans le domaine de l'intelligence ambiante (Riva et al., 2005 ; Cook et al., 2009). Les chercheurs œuvrant dans le domaine de l'intelligence ambiante mettent en évidence quatre briques de base (vues d'un point de vue utilisateur) :

- l'ubiquité : capacité pour l'utilisateur d'interagir, n'importe où, avec une multitude d'entités interconnectées (capteurs, actuateurs, systèmes électroniques « enfouis »). Cette faculté s'appuie sur des réseaux de communication adéquats et une architecture informatique distribuée.
- l'attentivité : faculté du système à « sentir » en permanence la présence et la localisation des autres entités et utilisateurs. Différents types de dispositifs (caméras, systèmes Rfid,...) rendent possible cette faculté.
- l'interaction naturelle : possibilité d'accéder aux services fournis par le système de façon conviviale pour l'utilisateur.
- l'intelligence : faculté d'analyser le contexte d'exploitation et de s'adapter dynamiquement aux situations.

Plusieurs rapports sur l'IOT (ITU, 2005 ; CERP-IOT, 2010 ; AIC, 2011) prônent une approche globale holistique et prédisent une révolution dans la vie des entreprises et des citoyens. Ils arguent que l'IOT va permettre de connecter les objets à la fois de façon sensorielle et intelligente, via la convergence et la synergie de plusieurs évolutions technologiques :

- l'identification des objets : les objets taggés peuvent être suivis,
- les capteurs et les réseaux de capteurs sans fil : les objets sont capables de « ressentir » (awareness) leur environnement,
- les systèmes de traitement de l'information embarqués : les objets sont capables de supporter des processus décisionnels,
- les nanotechnologies : les composants associés aux objets sont de plus en plus miniaturisés.

Comme l'illustre la figure 3, les composants supportant ces technologies sont de plus en plus miniaturisés et disponibles à moindre coût. Il s'avère ainsi envisageable de les associer au plus près des produits.



Source: ITU "Ubiquitous Network Societies and their impact on the telecommunication industry", April 2005, available at [www.itu.int/ubiquitous](http://www.itu.int/ubiquitous)

Figure 3. Miniaturisation croissante des capacités de traitement (ITU, 2005)

Dans un récent état de l'art (Atzori et al., 2010), les auteurs mettent en évidence la convergence de trois principaux courants de Recherche (visions) orientés « Objets », « Internet » et « Sémantique » (voir figure 4). Comme on peut le constater, les concepts de « produit intelligent » ou de « smart items » sont au cœur de la vision « Objets ».

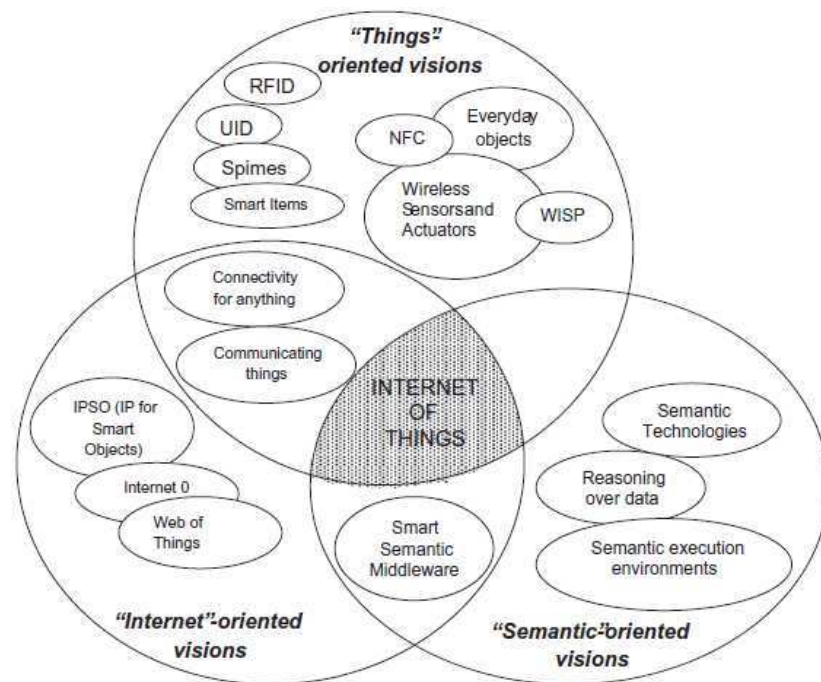


Figure 4. Les différents courants de Recherche (visions) associés à l'IOT extrait de (Atzori et al., 2010)

Comme on a pu le voir, au travers de cette partie, plusieurs communautés au niveau national et international s'intéressent au concept de produit « intelligent / actif ». Ces communautés ayant chacune leur sensibilité et leurs centres d'intérêts, la synergie résultant des différents points de vue permet d'enrichir ce concept encore en phase de maturation.

Les deux prochaines parties sont respectivement dédiées à une présentation des différentes terminologies et typologies associées au concept de produit « intelligent / actif » et usitées au sein de ces différentes communautés.



### III/ Etat de l'art sur les définitions de produits « intelligents / actifs »

Comme souligné dans (Främling et al., 2011), les travaux encore récents portant sur le domaine ne permettent pas de dégager une définition claire et unanime du « produit intelligent ». Cette section présente les différentes définitions de produits « intelligents / actifs » recensées dans la littérature. Toutes ces définitions mettent l'accent sur certaines caractéristiques des produits intelligents, dans différents domaines d'application et pour certaines phases du cycle de vie du produit. Les définitions données par les auteurs étrangers ont été laissées intentionnellement en anglais, de façon à ne pas « trahir » le sens de certaines propositions.

Comme illustré par la figure 5, les différentes définitions relevées sont issues des communautés mentionnées dans la partie précédente. Celles s'intéressant respectivement à l'Intelligence Ambiante et à la Productique sont les plus fécondes. Ces différentes définitions sont présentées dans les sections suivantes.

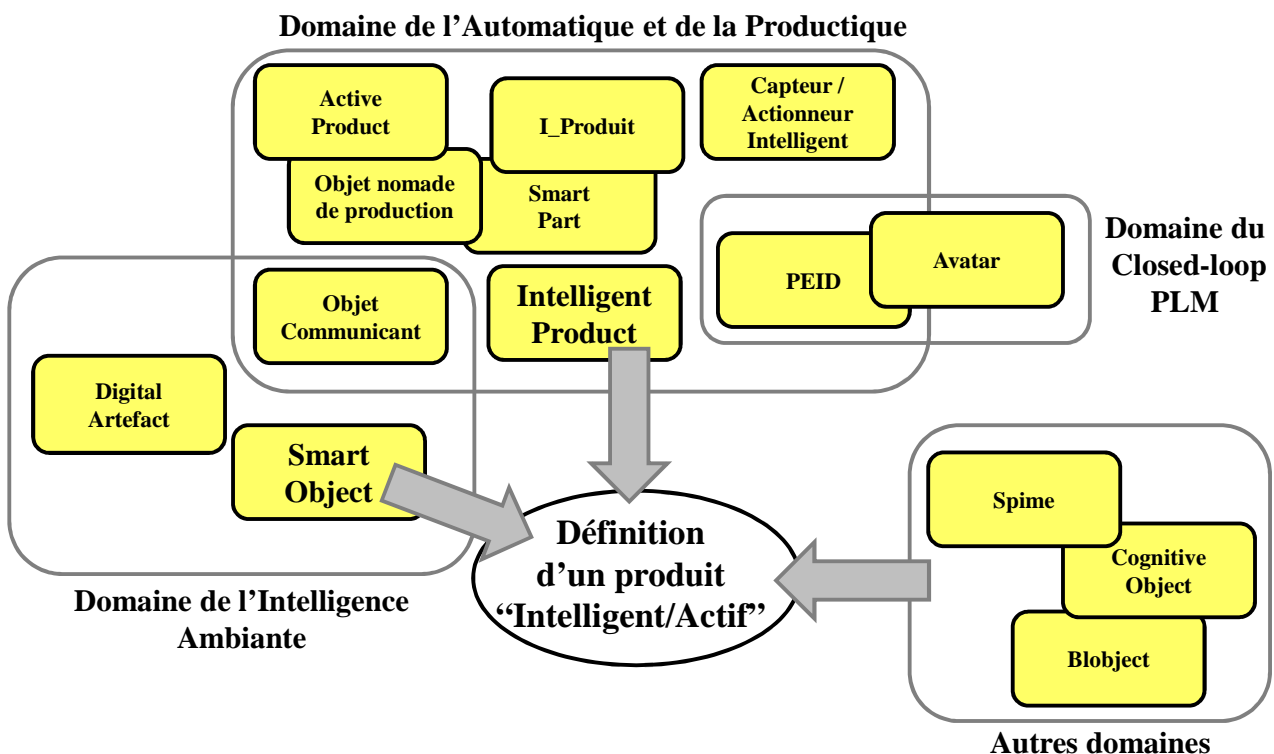


Figure 5. : Les différents vocables associés au produit « intelligent / actif »

#### III-1/ Définitions issues du domaine de la Productique

Plusieurs vocables ont été proposés ces dernières années pour décrire l'association d'intelligence à un produit au niveau de la communauté productique et sont détaillés ci-après. Le terme le plus répandu est celui d' « Intelligent Product » introduit dans (McFarlane et al., 2003).

**Objet nomade de production** : Exploitant les techniques Rfid, dans sa thèse de doctorat (Chaxel, 1995) propose la notion d' « objet nomade de production » :

- capable de fournir des données aux clients,
- de coopérer avec les autres entités participant à son évolution,
- d'adapter ses règles de décision en tenant compte de l'expérience acquise durant les phases précédentes de son cycle de production,
- de gérer des processus de décision et, pour le niveau le plus avancé, de s'auto-finaliser.

**Active Product** : Brun Picard et al. (1997) définissent le concept d' « active product » dans un contexte de contrôle de système manufacturier, dans lequel des entités autonomes coopèrent et coordonnent leurs actions pour atteindre un but commun. Dans ce contexte, chaque entité est capable de communiquer, de décider et d'agir (i.e. envoi d'ordres). Les prises de décisions reposent également sur une base de données locale à chaque entité.

**I\_Produit** : Dans (Pujo & Brun-Picard, 2002), le concept précédent est approfondi via la notion d'« I\_produit ». A chaque produit physique présent dans un système de production, est associée un I\_Produit, entité décisionnelle et informationnelle le représentant. Le I\_produit (Pujo, 2009) dispose pour mener à bien son processus décisionnel de ses propres informations (identifiant, gamme opératoire...) mais également de connaissances sur le processus de production (buts de production, règles de décision, caractéristiques de l'environnement de production).

**Objet Communicant** : Dans (Cea Ramirez et al., 2004), les auteurs reprennent un concept introduit dans (Kintzig et al., 2002) et définissent la notion d'« objet communicant » comme un objet physique :

- qui interagit avec son environnement physique, avec d'autres objets communicants et les utilisateurs,
- doté de la capacité d'acquérir, de recevoir et de distribuer une information dans un environnement proche ou distant,
- doté de capacité de réaliser et/ou de faire réaliser par d'autres objets des actions diverses.

Dans cet article, les auteurs considèrent les termes « produit intelligent », « smart product » et « objet communicant » comme des synonymes.

**Intelligent Product** : Plusieurs définitions ont été introduites.

Définition introduite par McFarlane : Dans le même contexte manufacturier, (McFarlane et al., 2003) ont défini un « *Intelligent product* » comme un objet présentant les cinq caractéristiques suivantes :

1. *Possesses a unique identification,*
2. *Is capable of communicating effectively with its environment,*
3. *Can retain or store data about itself,*
4. *Deploys a language to display its features, production requirements, etc,*
5. *Is capable of participating in or making decisions relevant to its own destin.*

Comme souligné dans (Meyer et al., 2009), cette définition est principalement destinée à la description de produits s'appuyant sur une technologie Rfid dans la fabrication ou dans la chaîne logistique, sans couvrir par exemple des produits avec des capacités de traitement intégré.

Définition introduite par Kärrkkäinen : Dans un contexte logistique, un « *Intelligent product* » selon (Kärrkkäinen et al., 2003) est capable de gérer son cheminement au sein de la chaîne logistique. Il est alors en charge de déterminer sa destination ainsi que ses conditions de manipulation et de transport. Il exhibe alors les propriétés suivantes :

1. *Globally unique identification code,*
2. *Links to information sources about the product across organizational borders, either included in the identification code itself or accessible by some look-up mechanism,*
3. *Can communicate what needs to be done with them to information systems and users when needed (even pro-actively).*

Malgré une meilleure prise en compte des capacités de traitement embarqués et du cycle de vie du produit dans son ensemble, cette classification est encore principalement centrée sur l'utilisation de la technologie Rfid, semblable à la classification de McFarlane.

Définition introduite par Ventä : Dans un contexte de phase d'utilisation (notamment de maintenance de systèmes), Ventä (2007) définit un « *Intelligent product* » comme devant posséder les caractéristiques suivantes :

1. *Continuously monitor their status and environment,*
2. *React and adapt to environmental and operational conditions,*
3. *Maintain optimal performance in variable circumstances, also in exceptional cases,*
4. *Actively communicate with the user, environment or with other products and systems.*

Cette définition se révèle plus générique que les précédentes et est clairement axé sur les produits ayant des capacités « décisionnelles » (point 5 de la définition de McFarlane et point 3 de la définition de Kärrkkäinen). Les produits envisagés doivent disposer d'une puissance de calcul embarquée suffisante pour communiquer directement avec les autres systèmes d'information.

**Smart part** : Dans (Wycisk et al., 2008), les auteurs s'intéressent aux chaînes logistiques vues comme des systèmes complexes adaptatifs. Ils soulignent un changement de paradigme dans les chaînes logistiques qui passent d'un contrôle centralisé d'éléments non-intelligents vers des opérations décentralisées réalisées par des éléments intelligents nommés « Smart Parts ». Ces derniers peuvent être des matières premières, des composants ou de produits ainsi que des équipements. Les auteurs en donnent la définition suivante :

« The term “smart parts” describes logistics entities, which possess the feature of interaction and autonomous decision making by usage of modern communication and information technologies, such as Rfid, GPS, and sensor networks. »

Dans (Hülsmann et al., 2008), les auteurs exploitent la notion de « smart parts » dans un cadre plus global d'Autonomous Control :

“Autonomous Control describes processes of decentralized decision-making in heterarchical structures. It presumes interacting elements in non-deterministic systems, which possess the capability and possibility to render decisions”.

Ce terme est très proche de la notion d' « Intelligent product » mais reste uniquement appliqué au domaine des chaînes logistiques et perd ainsi un peu de sa généralité.

Les deux prochaines définitions sont issues de travaux plus spécifiquement liés au concept de Closed-loop PLM.

**PEID** : Dans le cadre des travaux du projet PROMISE (PROMISE, 2008a), la notion de PEID (Product Embedded Information Device) a été introduite. Un PEID constitue le lien entre un produit et sa représentation électronique dans un système d'information, autorisant ainsi la réalisation de produits intelligents. Quatre types de PEID peuvent être distingués allant d'un simple code barre jusqu'à des systèmes ayant une puissance de calcul suffisante pour se connecter au middleware PROMISE au travers de services Web.

**Avatar** : Dans (Cassina et al., 2009), les auteurs mettent en avant le concept d'avatar considéré comme une représentation virtuelle du produit et contenant toutes les informations et connaissances associées au produit physique : « The Avatar is a virtual representation of the product, a digital shadow that contains all the information and knowledge of it ».

L'Avatar est toujours connecté de manière informationnelle au produit physique et autorise une meilleure communication entre toutes les parties prenantes (systèmes de soutien, clients) tout au long du cycle de vie. Le « produit-avatar » qui en résulte est l'association de l'avatar et du produit physique.

Les notions de PEID ou d'Avatar s'avèrent des solutions pour mettre en œuvre un produit « intelligent / actif » dans un contexte PLM. L'aspect coopératif entre PEIDs ou avatars n'est cependant que partiellement évoqué.

### III-2/ Définitions issues du domaine de l'Intelligence Ambiante

Les nombreuses recherches, menées dans le domaine de l'Intelligence Ambiante, ont permis d'affiner progressivement le concept de « **Smart Object** ». Ce terme, consacré au sein de cette communauté, a donné lieu à nombre de définitions. Les plus significatives sont reprises ci-dessous.

- Définition introduite par Beigl : Dans son article présentant la célèbre application Médiacup (Beigl et al., 2001), l'auteur introduit la notion de Digital Artefact :  
« The artefact computing model is based on computer-augmentation of everyday artefacts to yield digital artefacts :
  - o An “everyday artifact” is a non-computational physical entity with established purpose, appearance and use in everyday experience.
  - o A “digital artifact” is an everyday artifact augmented with computing and communication, enabling it to establish and exchange information about itself with other digital artefacts and/or computer applications ».

L'accent est mis sur le partage d'informations contextuelles mais l'aspect traitement décisionnel n'est pas mis en évidence dans cette définition.

- Définition introduite par Kintzig : Kintzig donne une première définition du « Smart object » dans (Kintzig et al., 2003) :  
« A physical device equipped with a processor, memory, at least one network connection, and various sensors/actuators, some of which may correspond to human interfaces »

Les définitions précédentes mettent principalement l'accent sur la capture et la communication des informations contextuelles, tout en laissant d'autres entités exploiter ces contextes.

- Définition introduite par Mattern : Mattern (2003) met l'accent sur le fait de pouvoir retracer un historique des interactions en plus des capacités sensibles :

*« Smart Objects might be able not only to communicate with people and other smart objects, but also to discover where they are, which other objects are in their vicinity, and what has happened to them in the past ».*

- Définition introduite par Siegemund : Siegemund (2004) met l'accent sur les aspects « communication » :  
*« A Smart object can perceive its environment through sensors and communicates wirelessly with others objects in its vicinity ».*
- Définition introduite par Kortuem : Dans (Kortuem et al., 2007), les auteurs fournissent une définition assez semblable :  
*« Objects of our everyday lives, augmented with information technology and equipped with sensing, computation and communication capabilities, that are able to perceive and interact with their environment and with other smart objects ».*

Contrairement aux autres définitions de Beigl et Kintzig, plutôt « centrées - artefact », dans les définitions de Mattern, Siegemund et de Kortuem, l'accent est mis sur l'aspect collaboratif entre plusieurs Smart Objects.

- Définition introduite par de Kawsar : Dans (Kawsar et al., 2008 ; Kawsar, 2009) les auteurs effectuent une synthèse des définitions précédentes et décrivent un « Smart Object » comme :  
*« A computationally instrumented tangible object with an established purpose that augments human perception and is aware of its operational situations and capable of providing supplementary services without compromising its original appearance and interaction metaphor. Supplementary services typically include sharing object's situational awareness and state of use; supporting proactive and reactive information delivery, actuation and state transition ».*
- Définition introduite par Sánchez López : Dans (Sánchez López et al., 2011b), les auteurs donnent une définition assez similaire :  
*« A “smart object” is any object or product that is—by way of embedded technologies—aware of its environment and state, and it may have the ability to make its own decisions about itself and its uses, communicate state information, and achieve actuation under its own control ».*

Les définitions de Kawsar et de Sánchez López semblent les plus abouties et rejoignent celles du « Intelligent Product » issues de la communauté Producticienne.

### III-3/ Autres concepts proposés

Bien que non issus des grands domaines de Recherche précédents, certains concepts méritent d'être cités pour leur originalité :

- Concept de « **Spime** » : Dans (Sterling, 2005), l'auteur américain de science-fiction, introduit ce néologisme pour décrire un objet pouvant être suivi à travers l'espace et le temps pendant toute sa durée de vie (de sa phase de conception jusqu'à son recyclage en nouveaux matériaux réutilisables). Le Spime est issu de la convergence de plusieurs technologies émergentes concernant le processus de fabrication (imprimantes 3D), l'identification (Rfid), et les technologies de localisation (GPS). Il exploite aussi pleinement la philosophie du « cradle to cradle » (McDonough & Braungart, 2011).
- Concept de « **Blobject** » : Blecker (2006) entrevoit l'avenir de l'internet des objets via l'introduction de Blobjects. Ce néologisme se réfère à des objets qui « bloguent » et participent aux réseaux sociaux (blogosphère). Le Blobject devient un « producteur » de conversations de la même manière qu'un humain sur des thèmes d'intérêt pour une communauté donnée.
- Concept de « **Cognitive object** » : Dans (Kranz, et al. 2011), les auteurs définissent les « Cognitives objects » comme des artefacts physiques, comportant des capteurs, actionneurs, des moyens de communication et de traitement, permettant de supporter les humains et les systèmes robotiques dans l'exécution de diverses tâches. Leur nature coopérative constitue une nouvelle façon de combler le fossé dans l'interaction entre les humains et les machines.

Parmi les trois propositions précédentes, le concept de Spime, bien qu'encore assez futuriste, s'avère le plus proche de nos préoccupations. Il prend notamment en compte les aspects « cycle de vie » associés à un produit « intelligent / actif ».

D'autres concepts tels que les « actionneurs / capteurs intelligents » (CIAME, 1987 ; Bayart et al., 2005 ; Cauffriez, 2005) ou les systèmes « Watchdog » utilisés en Maintenance (Liao et al., 2008) ont également été proposés. Cependant ces concepts sont trop spécifiques à une étape du cycle de vie et ne présentent par conséquent pas un degré de généralité suffisant.

### III-4/ Synthèse des différentes définitions de produit « intelligent / actif »

Le foisonnement de travaux en productique ou dans le domaine de l'IOT a entraîné un certain flou au niveau des définitions proposées. A l'issue de cette analyse, nous pouvons conclure qu'il n'existe pas de définition stable de la notion de produit « intelligent / actif ». De plus, plusieurs faits significatifs méritent d'être soulignés :

- La signification du terme « intelligent » peut différer fortement d'un auteur à un autre. La plupart des définitions reconnues sont axées sur une technologie ou une phase spécifique du cycle de vie du produit. Par exemple, les recherches sur les « Smart Objects » concernent principalement la phase d'usage.
- Les aspects « intelligence » et « interaction avec l'environnement » sont parfois amalgamés ou insuffisamment distingués.
- Les aspects « sociaux » d'interaction avec les autres objets « intelligents /actifs » restent également assez flous.

Après cette analyse des différentes définitions d'un produit « intelligent », nous dressons dans la partie suivante un état de l'art des différentes typologies introduites dans la littérature.

### IV/ Etat de l'art sur les typologies de produits « intelligents »

Comme explicité sur la figure 6, deux grandes catégories de typologies correspondant à des granularités d'analyse différentes, peuvent être distinguées :

- Au niveau « Individuel » : la première catégorie s'intéresse au produit vu comme une entité « individuelle » et se scinde à son tour en deux grandes classes de typologie :
  - o les typologies monocritère distinguant des grandes classes de produits « intelligents » selon leur niveau d'intelligence,
  - o les typologies multicritères prenant en compte les différentes caractéristiques d'un produit « intelligent » (capacités sensibles, localisation de l'intelligence...).
- Au niveau « Collectif » : la seconde catégorie de typologies essaie de caractériser les types d'interactions existant dans un collectif de produits.

La prise en compte d'un niveau « collectif » est à notre avis indispensable pour bien appréhender toutes les facettes de l'activité associée au produit. En effet, tant dans le modèle proposé que dans les travaux réalisés dans le cadre de cette HDR, nous montrerons que les interactions entre produits « actifs » permettent d'améliorer les performances associées au produit.

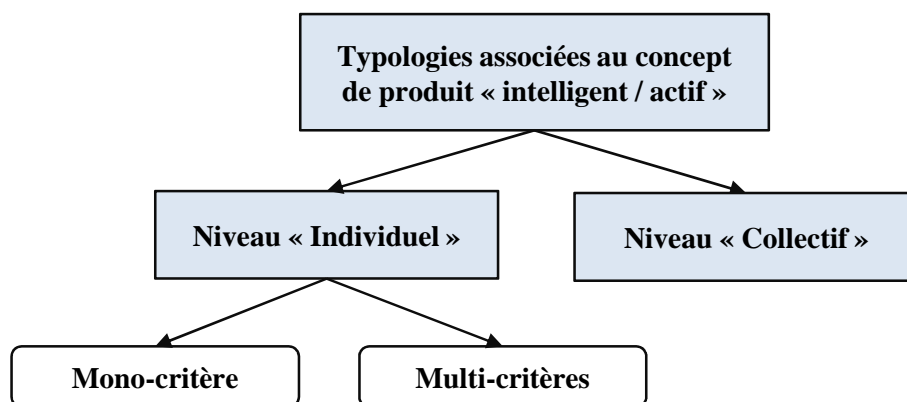


Figure 6. Les différentes typologies de produits « intelligents »

Les sections suivantes sont consacrées à une présentation de ces différentes typologies.

#### IV-1/ Typologies monocritère des produits « intelligents »

Les typologies présentées ci-après essaient de classer les produits selon un seul axe / critère correspondant au niveau d'intelligence ou d'activité associée. Elles sont présentées par ordre chronologique.

**Typologie de Le Moigne :** Dans un contexte très général, Le Moigne (1994) distingue 7 niveaux d'intelligence, de l'objet totalement passif à l'objet auto-finalisé. Il considère un objet « actif » comme un objet physique capable d'exercer une activité sur d'autres objets matériels et d'évoluer au cours du temps, sans perdre son identité unique. En se basant sur cette définition, il a proposé une classification systémique reposant sur trois niveaux : les produits physiques tels que les matières premières, les produits informationnels (qui ont des capacités informationnelles et qui sont capables de communiquer) et les produits décisionnels (capables d'optimiser leur comportement pour atteindre leurs objectifs).

Cette première typologie met bien en évidence les différents niveaux d'intelligence pouvant être associés à un objet. La décomposition en 7 niveaux s'avère par contre un peu lourde. Le concept d'objet s'auto-finalisant paraît également un peu futuriste.

**Typologie de Wong :** Sur la base de la définition introduite par McFarlane, dans (Wong et al., 2002), les auteurs définissent deux niveaux d'*Intelligent Product* :

- « Information oriented product » : Ce type de produit « fournit » de l'information dans son environnement. Seules les trois premières caractéristiques introduites par McFarlane sont concernées.
- « Decision oriented product » : ce type de produit présente les cinq caractéristiques mentionnées dans la définition, et dispose de la capacité d'influencer son propre « destin » par la mise en œuvre de processus décisionnels.

Comme souligné dans (Meyer et al., 2009), cette typologie est principalement destinée à la description d'objets utilisant la technologie Rfid dans les domaines de la fabrication et de la logistique. Elle ne couvre pas avec précision les produits avec traitements embarqués.

**Typologie de Bajic :** Dans (Bajic, 2004) quatre catégories d'objets sont distingués :

1. Objet porteur des données : L'objet stocke des données minimales qui sont ensuite accessibles par des ressources externes. Les technologies du code barre et de la Rfid sont utilisées pour implémenter ce type d'objet.
2. Objet pointeur vers un système d'information : La technologie Rfid est utilisée pour identifier l'objet et pour faire le lien avec un système d'information (page web par exemple). Dans ce système d'information, une image virtuelle est associée à l'objet. Un tel objet ne peut agir directement avec les autres entités.
3. Objet fournisseur et demandeur des services : Cet objet a un double rôle : passif lorsqu'il répond aux ordres (fournisseur de services aux autres acteurs) et actif lorsqu'il génère une requête (demandeur de services).
4. Objet communicant sensitif : Des capteurs, permettant d'acquérir de l'information sur son environnement, sont intégrés dans l'objet. L'objet est également capable de communiquer avec d'autres entités et de traiter de façon autonome des données locales.

Des travaux de Recherche plus récents (Cea Ramirez, 2006 ; Dobre & Bajic, 2008) ont enrichi les propositions initiales de Bajic et proposé trois types d'objets communicants (passif, actif et actif unifié) exploitant les fonctionnalités de dispositifs UPnP (Universal Plug and Play).

**Typologie de Kiritsis :** Dans (Kiritsis, 2011), l'auteur propose une nouvelle typologie de l'« Intelligent product » inspirée de la Nature et de la manière dont se développent intelligence et connaissance (en particulier chez les êtres humains). Il considère qu'un produit « intelligent » est un produit qui contient des capacités de sensibilité, de mémorisation, de traitement de données, de raisonnement et de communication avec différents niveaux d'intelligence :

- Niveau 1 : Produits physiques sans aucun système embarqué (équipement ou logiciel). Ils n'interagissent pas avec leur environnement.
- Niveau 2 : Produits physiques équipés de capteurs simples (ex : thermostat). Leurs capteurs embarqués leur permettent d'interagir avec leur environnement.
- Niveau 3 : Produits physiques avec des capteurs embarqués et des capacités de mémorisation et de traitement de données. Les dispositifs et logiciels embarqués permettent au produit de s'adapter rapidement à des environnements fortement changeants.

- Niveau 4 : Produits physiques équipés de PEID (Product Embedded Information Devices). Des exemples de PEIDs sont des dispositifs tels des étiquettes Rfid, des réseaux de capteurs, ou des processeurs embarqués. A ce niveau, des moyens d'identification et des capacités de communication sont ajoutés au produit. Ces nouvelles capacités permettent aux produits d'évaluer des changements internes ou / et grâce à des technologies relevant de l'IOT de communiquer avec leurs pairs (d'autres produits) et leur environnement, de développer leurs propres connaissances et de mettre en œuvre des processus décisionnels.

(Kiritsis, 2011) utilise cette typologie pour présenter ses travaux dans le cadre du Closed-loop PLM et de l'IOT. Cette classification reprend en la détaillant un peu plus la classification de Wong.

**Typologie du CERP- IOT** : Dans l'ouvrage (CERP-IOT, 2010) faisant le point sur les travaux des clusters européens œuvrant dans le domaine de l'IOT, une typologie des « Things » est proposée. Cinq domaines correspondant à différents niveau d'intelligence sont présentés (voir figure 7 ci-après).

Le cinquième niveau (domaine) fait référence à des objets capables de créer, gérer ou détruire d'autres objets et susceptibles de s'auto-reproduire. Cette vision futuriste se démarque des autres typologies. Même si cela ne semble pas opportun pour les applications actuelles, un tel niveau pourrait se révéler utile dans le contexte prometteur des nano-technologies.

<b>Domain 1</b> Fundamental characteristics	<b>“Things”</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• can be “real world entities” or “virtual entities”</li> <li>• have identity; there are means for automatically identifying them</li> <li>• are environmentally safe</li> <li>• (and their virtual representations) respect the privacy, security and safety of other “things” or people with which they interact</li> <li>• use protocols to communicate with each other and the infrastructure</li> <li>• are involved in the information exchange between real/physical, digital and virtual worlds</li> </ul>
<b>Domain 2</b> Common characteristics of all things, even the most basic (applies to all higher classes too)	<b>“Things”</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• can use services that act as interfaces to “things”</li> <li>• would be competing with other “things” on resources, services and subject to selective pressures</li> <li>• may have sensors attached, thus they can interact with their environment</li> </ul>
<b>Domain 3</b> Characteristics of social things (applies to all higher classes too)	<b>“Things”</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• can communicate with other “things”, computing devices and with people</li> <li>• can collaborate to create groups or networks</li> <li>• can initiate communication</li> </ul>
<b>Domain 4</b> Characteristics of considerate autonomous things (applies to all higher classes too)	<b>“Things”</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• can do many tasks autonomously</li> <li>• can negotiate, understand and adapt to their environment</li> <li>• can extract patterns from the environment or to learn from other “things”</li> <li>• can take decisions through their reasoning capabilities</li> <li>• can selectively evolve and propagate information</li> </ul>
<b>Domain 5</b> Characteristics of things that are capable of self-replication or control	<b>“Things”</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• can create, manage and destroy other “things”</li> </ul>

Figure 7. Typologie du CERP-IOT

#### IV-2/ Typologie multicritères des produits « intelligents »

Plusieurs travaux de recherche ont introduit des classifications construites sur la prise en compte de plusieurs critères. Ces typologies multicritères prennent en compte les différentes caractéristiques d'un produit « intelligent » et se révèlent plus détaillées dans leur capacité de description que les précédentes, qui ne distinguent que des grandes classes de produits.

Elles sont présentées ci-après dans un ordre chronologique.

**Typologie de Meyer :** Dans (Meyer et al., 2009), les auteurs proposent une typologie utilisant trois axes décrivant respectivement le niveau d'intelligence, la localisation et le niveau d'agrégation de l'intelligence associée au produit (voir figure 8) :

- L'axe « niveau d'intelligence » est divisé en 3 catégories : « Information handling », « Problem notification » et « Decision making », permettant de représenter respectivement des produits uniquement capables de « porter » de l'information, de générer des alarmes quant à leur état, et de mener un processus décisionnel.
- L'axe « localisation de l'intelligence » distingue deux classes selon que l'intelligence est embarquée dans le produit ou extérieure (accessible par réseau).
- L'axe « niveau d'agrégation de l'intelligence » compte deux classes :
  - o Intelligent Item : Le produit ne gère que l'information et/ou les décisions le concernant.
  - o Intelligent Container : Le produit est « conscient » des éléments qui le composent et peut servir d'intermédiaire (proxy) pour eux.

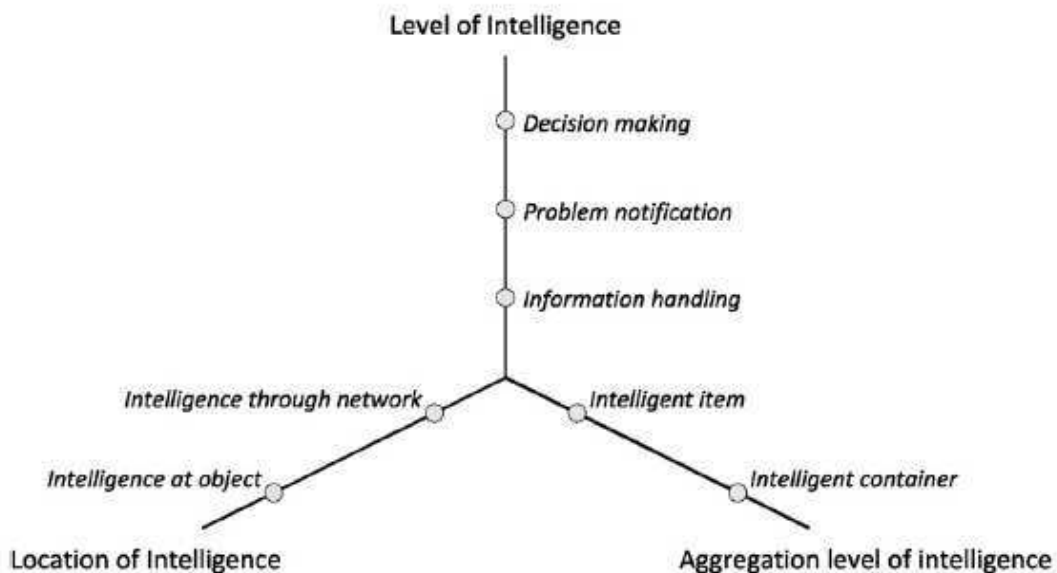


Figure 8. Trièdre de Meyer

Les auteurs ont utilisé cette typologie pour positionner tout un ensemble de travaux portant notamment sur des applications de traçabilité des produits. Le principal point fort de cette typologie est de faire apparaître les niveaux d'intelligence associés au produit. Cet axe sera repris et revisité dans notre proposition. Cependant l'axe « niveau d'agrégation de l'intelligence », n'offrant que deux classes, ne fait pas apparaître les différents types de relations existant au sein d'un produit de type « Intelligent container ». L'aspect relationnel au sein d'un collectif de produits « intelligents » n'est également pas abordé par cette typologie.



**Typologie de Kawsar :** Dans son mémoire de thèse (Kawsar , 2009), l’auteur définit un ensemble d’objets coopérants comme un SOS (Smart Object System) et distingue trois catégories de « smart objects », conformément à la figure 9 ci-après.

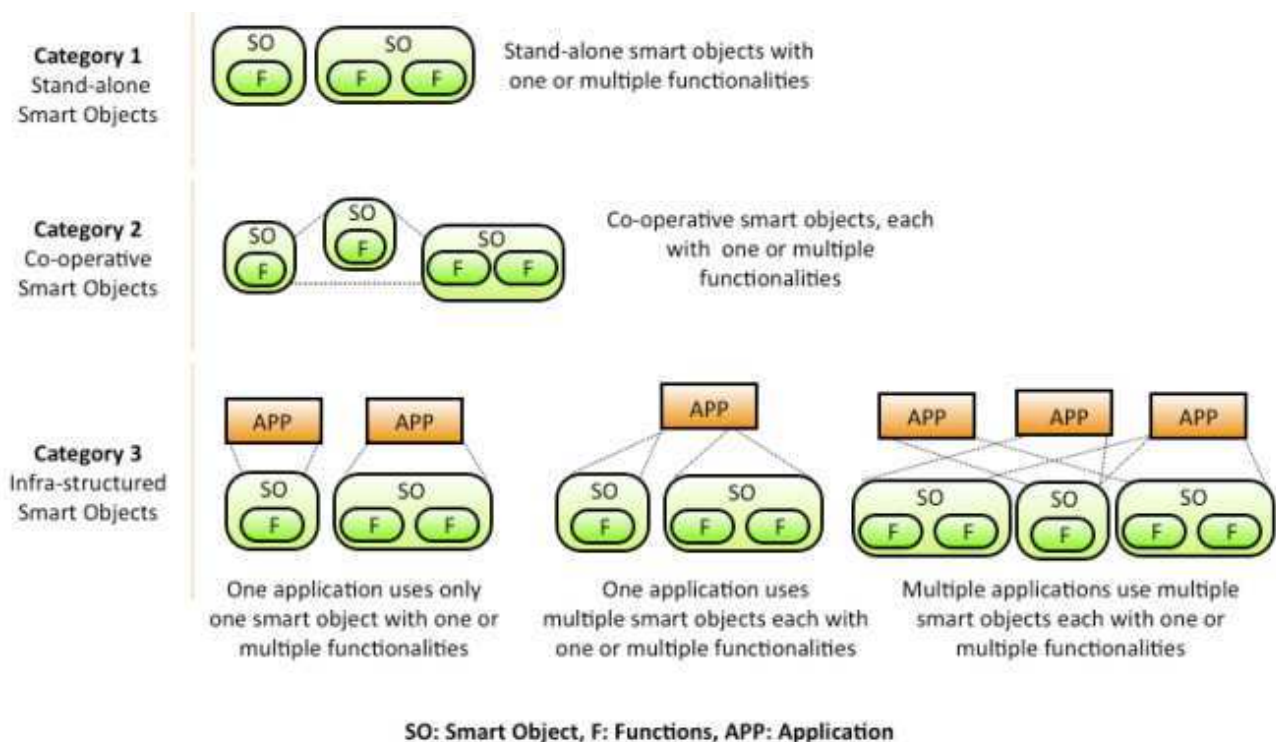


Figure 9. Typologie de Kawsar

- Objets « autonomes » : ils sont indépendants de toute infrastructure, capables de percevoir leur environnement et de prendre des décisions en toute autonomie. Des technologies « awareness » ainsi que des services contextuels sont typiquement embarqués dans l’objet (Ex : Smart coffee machine (Aitenbichler et al., 2007), smart objets commerciaux...).
- Objets « coopérants » : objets capables de communiquer avec leurs pairs, de partager leurs capacités sensibles « awareness » pour réaliser des actions collectives. Une infrastructure secondaire est souvent utilisée dans ce type de systèmes. Une application d’entreposage de fûts chimiques (Strohbach et al., 2004) est donnée comme exemple d’une telle classe.
- Objets avec infrastructure : Les objets sont les constituants d’un système plus vaste, et ne peuvent pas travailler de manière individuelle. Une ou des applications intègrent les objets dans une infrastructure (secondaire).

La notion de SOS est à rapprocher de la notion de collectif de produits « actifs / intelligents ». Cependant les relations existant au sein d’un collectif d’objets « coopérants » ne sont pas détaillées.

**Typologie de Zbib :** Dans (Zbib, 2010), nous avons proposé une typologie du produit « actif » basée sur quatre axes et illustrée par la figure 10. Le premier axe représente le cycle de vie du produit et ses différentes phases : conception, fabrication, distribution, utilisation et recyclage. Le deuxième axe reprend de manière simplifiée la dimension systémique définie par (Le Moigne, 1994). Les deux autres axes reprennent les axes « localisation » et « agrégation » de l’intelligence de la typologie de Meyer.

Cette typologie a constitué pour l’équipe TEMPO-PSI une première tentative de situer les différentes contributions selon un axe « cycle de vie ». Cependant comme pour les autres typologies, l’aspect « social » des relations entre produits a été négligé.

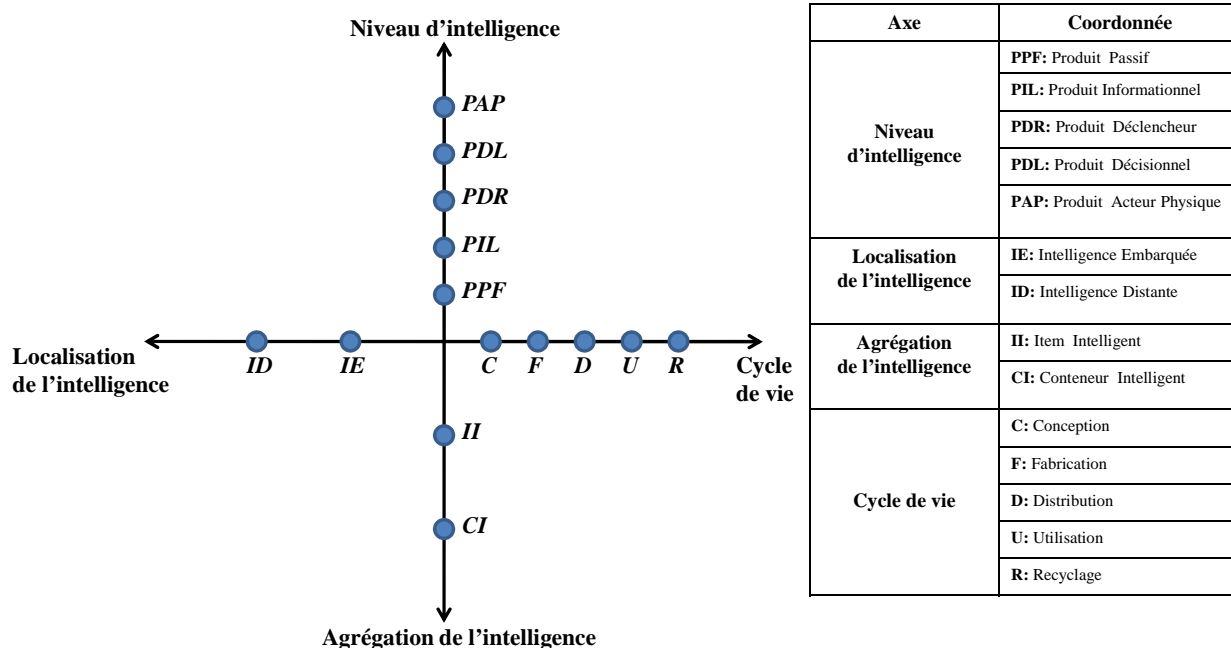


Figure 10. Typologie de Zbib

**Typologie de Kortuem :** Dans (Kortuem et al., 2010), une typologie selon trois axes est introduite (voir figure 11) :

- « Awareness » : définie comme la capacité d'un objet à détecter et à réagir à des événements et à des activités humaines qui se produisent dans le monde physique.
- « Interaction » : définie comme la capacité de l'objet à interagir avec l'utilisateur en termes d'entrées/sorties et de contrôle.
- « Representation » : fait référence au modèle associé à l'objet (en termes d'abstraction de programmation).

Trois classes de « Smart Object » sont ensuite définies :

- « Activity-Aware Smart Object » : Un tel objet peut enregistrer des informations sur son état et sur ses conditions d'utilisation. Il ne dispose pas de capacités d'interagir avec l'utilisateur.
- « Policy-Aware Smart Object »: Il peut interpréter les événements et activités à l'égard de règles organisationnelles prédéfinies. Il peut générer des alarmes en cas de mauvaise utilisation par l'opérateur.
- « Process-Aware Smart Object »: Il a les capacités d'analyser les événements et d'appréhender le processus organisationnel dont il fait partie. Disposant d'un modèle du processus, il est capable de fournir à l'utilisateur une aide contextuelle.

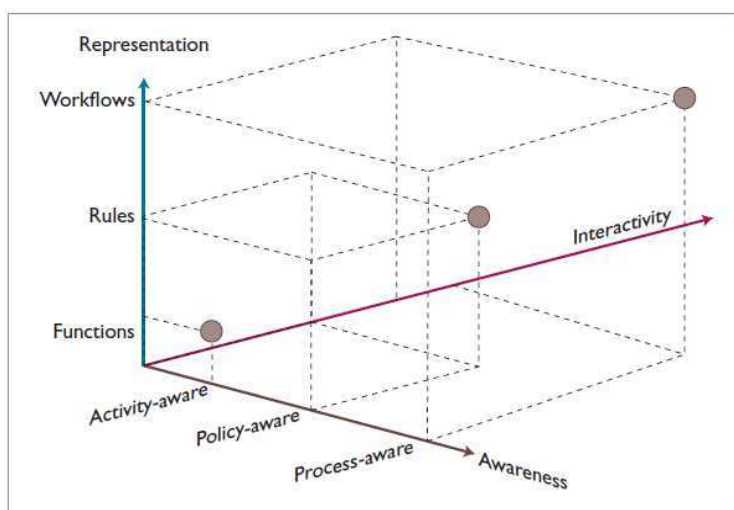


Figure 11. Typologie de Kortuem

Cette caractérisation des « smart objects » est intéressante mais s'avère très centrée sur l'interaction avec l'utilisateur. L'aspect relationnel susceptible d'exister entre produits « actifs » n'est pas abordé.

**Typologie de Sánchez López :** Dans (Sánchez López et al., 2011a), une classification des « smart object », utilisant un alphabet, est proposée. Cet alphabet repose sur cinq lettres caractéristiques des différentes capacités associées à l'objet:

- « I » pour l'identification et le stockage de toute donnée pertinente,
- « S » pour la capacité à capter son propre état physique et celui de son environnement. Cette caractéristique recouvre également l'aspect « awareness » de l'objet,
- « A » pour la capacité d'actionner des dispositifs (actionneurs) internes ou externes,
- « D » pour la capacité de prendre des décisions et de participer au contrôle d'autres dispositifs ou systèmes,
- « N » pour la capacité d'accéder à de l'information au travers d'un réseau (filaire ou sans fil).

La taxonomie « ISADN » constitue une description des caractéristiques fonctionnelles des objets intelligents. Comme souligné par les auteurs, toutes les combinaisons de lettres ne sont pas réalistes. Par exemple, un "N-smart" objet n'a pas d'intérêt s'il n'est pas au moins « IN-smart ».

Reprenant des fonctionnalités de base, cette typologie permet de représenter une vaste gamme de produits intelligents. Bien que dans leur papier, les auteurs décrivent plusieurs situations d'interaction entre produits, l'aspect « social » n'est vu qu'au travers de la caractéristique « N ». De plus, l'aspect Décisionnel « D » ne fait pas apparaître les différents niveaux existant dans un processus décisionnel.

#### IV-3/ Etat de l'art sur les typologies de collectifs de produits « intelligents »

De nombreuses typologies de collectifs sont proposées par différentes communautés relevant de domaines aussi variés que la Sociologie, les Systèmes Multi-agents, la Robotique, ou l'IOT. Seules celles relatives au domaine de l'IOT sont décrites ci-après, les autres étant résumées en annexe III.

Vu le caractère récent des recherches dans le domaine de l'IOT, encore peu de travaux ont été entrepris pour établir des typologies de collectifs de produits « intelligents / actifs ».

**Typologie de Salkham :** Dans (Salkham et al., 2006), les auteurs proposent une typologie s'adressant aux systèmes collaboratifs contextuels. Un « *collaborative context-aware system (CCAS)* » est défini comme « *a system that comprises a group of entities, capable of sensing, inferring, and actuating that communicate in order to achieve a common goal* ».

Cette définition est assez proche de ce que nous considérons comme un collectif de produits « actifs ». La structure de la typologie, illustrée sur la figure 12, repose sur trois axes: but, approches et moyens.

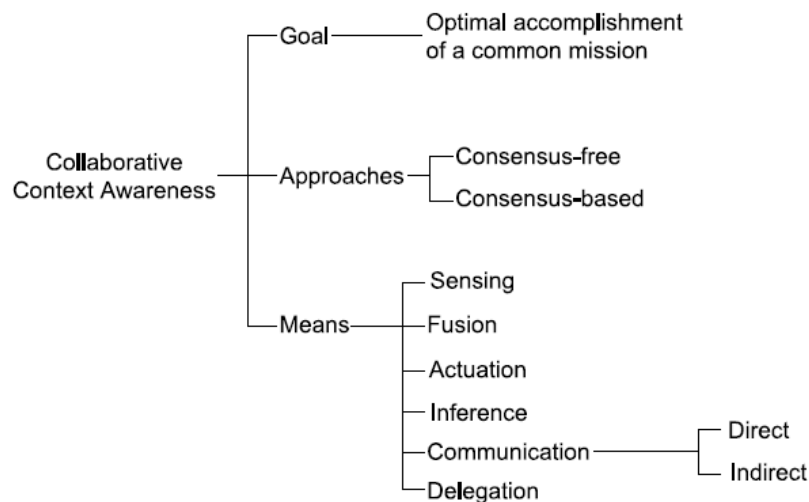


Figure 12. Typologie de Salkham

Le but: Tous les CCAS visent à atteindre un objectif commun, par exemple, à accomplir de façon optimale la mission assignée, via une forme de collaboration, de coopération et / ou de coordination entre entités.

Les approches: Deux approches sont distinguées, avec ou sans consensus :

- En « *Consensus free* », les entités peuvent prendre des décisions locales sans négocier une décision commune. Ils peuvent communiquer des informations (données sensorielles, fusion d'informations, informations contextuelles) afin de faciliter cette prise de décision locale.
- En « *Consensus-based* », une décision commune est requise de la part des différentes entités en présence.

Les moyens : Sept moyens sont proposés pour réaliser cette collaboration : capacité à capter l'environnement, fusion des différentes sources d'informations, capacité à agir sur l'environnement, capacité à construire, mettre à jour et à raisonner sur les connaissances obtenues, capacité à communiquer et à déléguer les tâches entre entités voisines. L'accent est mis sur l'échange d'informations et éventuellement les techniques de la délégation.

Cette typologie ne fait pas apparaître clairement les notions de liens d'autorité reliant parfois les entités. La notion de consensus est à notre avis un peu trop vague pour décrire ce type de relation.

**Typologie de Iera** : Dans (Iera, 2011), l'auteur reprend la typologie introduite préalablement par le sociologue Fiske (1992) et l'applique dans le cadre de l'IOT. Les quatre classes mises en exergue par Fiske sont revisitées afin de caractériser les différents liens possibles entre entités :

- Communal Sharing : Il peut être associé à des comportements d'objets, qui ne sont pas pertinents individuellement, mais qui ont une pertinence collective. Cette classe permet de regrouper les objets qui fonctionnent sous la forme d'essaim. Ce n'est pas le service offert par l'objet individuel qui importe mais le service que l'essaim peut fournir aux utilisateurs.
- Equality Matching : Il peut représenter toutes les formes d'échange d'informations entre des objets qui fonctionnent comme des égaux en tant que fournisseurs ou consommateurs d'informations (ou de services). Ils fournissent des services aux utilisateurs tout en conservant leur individualité.
- Authority ranking : Ce type de relation est établi entre des objets de complexité différente et de niveaux hiérarchiques différents (tels que : lecteur Rfid et les étiquettes, le maître et le terminal esclave Bluetooth, etc) parmi lesquels l'échange d'informations est très asymétrique. Dans ce cas, le service « annoncé / publié » est généralement associé à l'ensemble du groupe d'objets (coalition composé de maîtres et d'esclaves) ou à l'objet de plus haut rang.
- Market pricing : Cette classe représente des situations d'interaction où les objets travaillent ensemble dans l'objectif d'obtenir un profit mutuel. Les objets entrent dans ce type de relation quand cela en vaut la peine pour eux.

La classification proposée est intéressante car elle fait apparaître des notions de liens hiérarchiques entre entités (type Authority ranking) utiles pour décrire des produits « intelligents / actifs » composés de plusieurs sous-systèmes.

#### **IV-4/ Synthèse des différentes typologies de produits « intelligents / actifs »**

Les principales critiques que l'on peut apporter à ces typologies sont les suivantes :

- Elles s'intéressent généralement à une phase précise du cycle de vie et ne décrivent pas l'impact sur les autres phases. Cette limite nuit à une utilisation dans le cadre d'une approche Closed-loop PLM, nécessitant de maîtriser les différents flux d'informations amont et/ou aval entre phases.
- Elles considèrent un objet ou un produit comme « tout actif » ou « tout passif » or il est nécessaire de distinguer le niveau d'activité d'un produit selon la fonction étudiée. Un produit peut très bien être passif pour une fonction donnée et actif pour une autre.
- Trop peu prennent en compte les interactions pouvant exister entre produits et ne permettent donc pas de représenter la dynamique d'un collectif de produits. Cela s'avère pénalisant pour nombre d'applications.

La recherche d'une définition claire d'un produit « intelligent / actif » et de typologies adéquates reste plus que jamais d'actualité dans la communauté Productique et a fait l'objet d'un séminaire organisé en septembre 2012 par D. McFarlane à Cambridge. De manière complémentaire aux typologies existantes, ce dernier propose dans (McFarlane, 2011) une classification permettant de positionner plusieurs domaines d'intérêt (IOT, Smart Object, Intelligent Product, Systèmes holoniques...). Cette classification repose sur deux axes, repris sur la figure 13 :

- le premier est relatif au déroulement d'un processus décisionnel,
- le second représente l'étendue des interactions entre l'entité individuelle (machine, produit) et un environnement de plus en plus élargi.

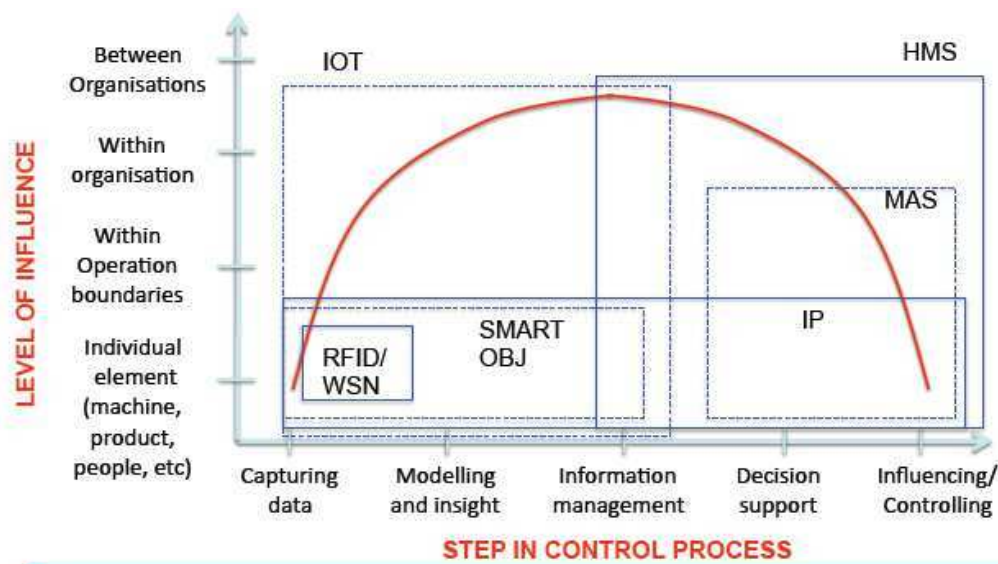


Figure 13. Positionnement introduit dans (McFarlane, 2011)

A l'issue de cette analyse de la situation actuelle du champ de Recherche que constitue le produit « intelligent / actif », nous détaillons les problématiques associées dans la partie suivante.

## V/ Problématiques associées au concept de produit « intelligent / actif »

En reprenant les pistes de progrès en Productique exposées dans la section I-3 et les préoccupations des différentes communautés présentées précédemment, nous pouvons dégager un ensemble de verrous scientifiques qui constitueront la problématique de nos travaux de HDR et de nos travaux prospectifs.

- V1. **Proposition d'une définition claire du concept de produit « Intelligent / actif »** : Comme on a pu le constater dans les sections précédentes, que ce soit au niveau des terminologies et des typologies, il n'existe pas de définition stable de la notion de produit « intelligent / actif ». L'impact des concepts d'intelligence et d'autonomie décisionnelle doit notamment être analysé tout au long du cycle de vie des produits.
- V2. **Proposition de modèles adéquats aptes à supporter le contrôle coopératif entre produit « intelligent / actif » et systèmes de soutien dans une architecture de conduite distribuée** :
  - Etude des différents niveaux d'activité ou d'intelligence qu'un produit peut exhiber au niveau de son comportement,
  - Caractérisation des différents types d'interactions avec son environnement (systèmes de soutien, utilisateurs et autres produits « intelligents / actifs »),
  - Prise en compte des contraintes de traçabilité et d'interopérabilité, inhérentes aux étapes successives du cycle de vie.
- V3. **Etude de la robustesse et de la prédictibilité des systèmes contrôlés par le produit** : Il est indispensable de garantir la bonne performance (efficacité mais aussi sécurité et fiabilité) de ces systèmes à base de produits « intelligents / actifs ». Comme tout système constitué d'entités décisionnelles autonomes reliées entre elles par des liens hétérarchiques, ils sont en effet confrontés au problème de myopie. Cette dernière caractérise notamment la difficulté pour une entité décisionnelle de prendre une décision adéquate en n'ayant qu'une connaissance limitée de l'évolution du système sur un certain horizon temporel (Zambrano Rey et al., 2012).
- V4. **Proposition de méthodologies de déploiement de telles architectures et étude de leur interopérabilité avec les systèmes d'information et de décision existants (ERP, MES...)** : Afin de prouver le réel intérêt des approches à base de produits « intelligents / actifs », il est nécessaire d'accompagner le déploiement dans le monde industriel par le développement de méthodologies prenant notamment en compte les contraintes de développement durable introduites dans la section I-2-1. De plus, vu le caractère « centrée produit » de l'approche, le produit « intelligent / actif » interagit avec nombres de systèmes d'informations différents tout au long de son cycle de vie (ERP, systèmes de gestion de la chaîne logistique, systèmes de GMAO...).

D'importants problèmes d'interopérabilité doivent de ce fait être résolus afin de permettre l'adoption de l'approche « centrée produit » dans le monde industriel (Morel et al., 2003 ; Tursi et al., 2009).

- V5. **Etude des aspects « gestion des connaissances »** : Dans un contexte PLM, il convient de gérer les informations et connaissances acquises par le produit dans les différentes phases de son cycle de vie. Les problèmes liés à la gestion de l'enrichissement et de l'obsolescence des informations associées au produit devront notamment être abordés. La faculté d'apprentissage n'est à l'heure actuelle que rarement abordée au sein des typologies. Doter les produits d'une telle faculté nécessite d'étudier des techniques d'apprentissage compatibles avec un contexte décisionnel fortement distribué.
- V6. **Etude de la coopération Hommes-Produits « actifs »** : De manière transversale aux verrous précédents se pose également la problématique de développer des interfaces Homme-machine aptes à supporter la coopération Hommes-Produits « actifs ». Dans un contexte décisionnel fortement distribué, avec de multiples acteurs (clients, fabricants, transporteurs, maintenanciers...) et dans des environnements changeants, il est nécessaire d'offrir des interfaces contextuelles efficaces.
- V7. **Validation de ces approches et concepts au travers d'expérimentations réelles** : Un facteur important de pérennité des travaux de recherche réside en la valorisation et en la réalisation de plateformes de test et d'évaluation. Représentatives du contexte industriel, par les besoins et le facteur d'échelle, elles permettent d'expérimenter et de valider les propositions avancées en terme de modèles et méthodologies. Comme souligné dans (Leitão, 2009 ; Trentesaux, 2009), un des freins important à l'essaiage des approches de pilotage distribué dans le milieu industriel est dû à de trop rares implémentations sur site réel.

La résolution de ces différents verrous nécessite d'adopter une stratégie de développement de nos travaux de Recherche, illustrée par la figure 14 ci-après.

Les verrous V1 et V2 doivent être abordés en priorité car de par les concepts et modèles proposés, ils constituent la base indispensable au développement d'un concept fédérateur de produit « intelligent / actif ». Ces deux verrous constitueront la cible principale de nos travaux de HDR.

Le verrou V7 occupe également une position centrale dans nos travaux car comme souligné précédemment, sa prise en compte s'avère indispensable à l'essaiage dans le monde industriel. Les différentes expérimentations présentées dans le chapitre 4 de ce mémoire relèvent directement de ce verrou.

Le verrou V3 faisant l'objet de travaux plus récents au sein de l'équipe TEMPO-PSI, ne sera pas détaillé dans ce mémoire. Les verrous V5 et V6 s'inscrivent dans le cadre de nos perspectives de Recherche. Leurs propositions, validées expérimentalement, permettront d'enrichir les concepts et modèles proposés dans ce mémoire.

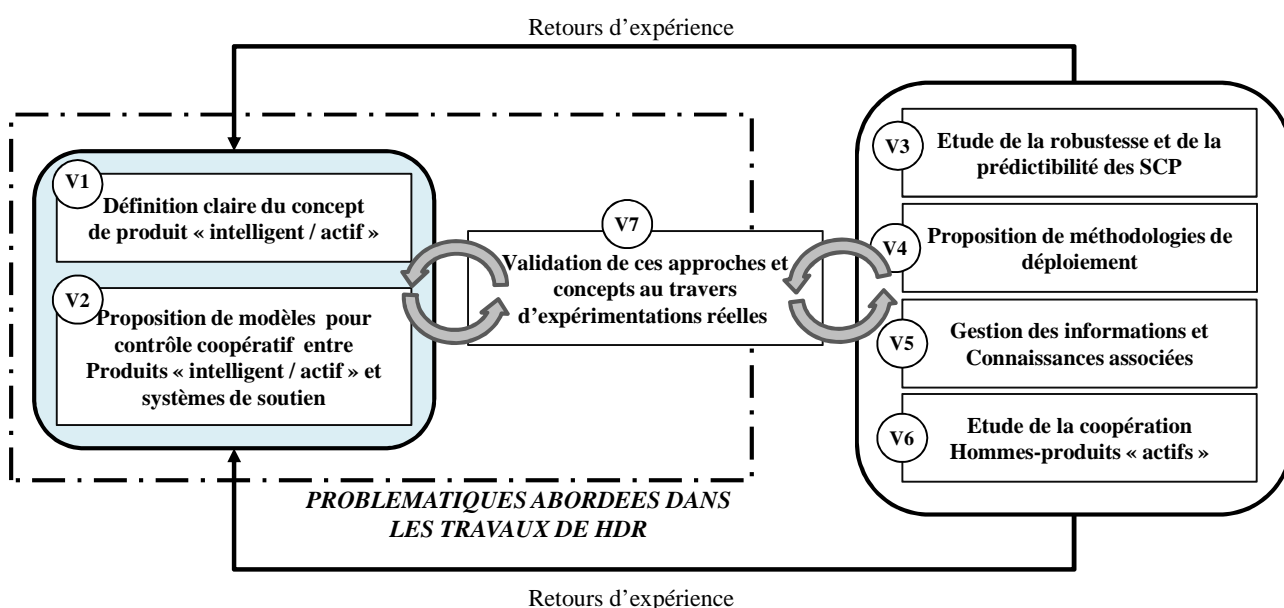


Figure 14. Stratégie de développement des travaux de Recherche

## Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous avons pu dresser un état des lieux des différents courants de Recherche travaillant sur la thématique du produit « intelligent / actif ». Cette thématique consiste à donner un rôle « actif » au produit, classiquement considéré comme passif lors de son cycle de vie. Le produit « intelligent / actif » est alors doté de moyens permettant de capter les variations de son environnement, de prendre des décisions et donc d'interagir pleinement avec son environnement (ressources des différents systèmes de soutien, autres produits, opérateurs humains...). Ces nouvelles fonctionnalités associées au produit sont rendues possibles par les nouvelles avancées technologiques (communication sans fil, Rfid, systèmes embarqués...).

L'analyse des apports respectifs de chaque communauté nous a permis de mettre en évidence certains manques inhérents au caractère encore récent des recherches menées dans le domaine :

- il n'existe pas de définition stable de la notion de produit « intelligent / actif », ni de typologie adéquate que ce soit au niveau du produit ou d'un collectif de produits,
- l'intérêt des interactions entre produits « intelligents / actifs » n'a pas suffisamment été mis en évidence,
- la prise en compte de l'activité d'un produit « intelligent / actif » sur l'ensemble du cycle vie n'est pas encore suffisamment développée.

Ces manques associés aux pistes de progrès en Productique mises en évidence par plusieurs analyses prospectives, nous ont permis de mettre en évidence et de hiérarchiser un ensemble de problématiques et de verrous scientifiques.

Nos considérations sur l'activité associée à un produit « intelligent / actif » tout au long de son cycle de vie ainsi qu'un modèle apte à supporter toutes les facettes liées à cette « activité » sont présentés dans le prochain chapitre.

## Chapitre 2 : Concept de produit « actif » et modélisation associée

### Introduction

Face aux manques relevés dans le chapitre précédent et à fin de proposer des éléments de réponse aux verrous V1 et V2, ce chapitre a un double objectif :

- Le premier est d'affiner le concept d'activité associée au produit tout au long de son cycle de vie. Nous mettrons notamment en évidence l'intérêt d'une activité associée au produit en matière d'amélioration de performances tant pour le produit que pour le système de soutien associé.
- Le second objectif est de proposer un modèle générique que nous utiliserons dans la suite de ce mémoire pour caractériser et positionner les différentes contributions nationales et internationales ainsi que nos travaux.

Dans une première partie, le concept de produit « actif » tout au long de son cycle vie ainsi que les apports attendus sont présentés. Ce concept a été affiné au fur et à mesure de nos publications (Sallez et al., 2010a ; Sallez, 2012).

Nous proposerons dans une seconde partie une approche de modélisation du produit « actif » exploitant le concept d'augmentation et s'articulant selon trois vues : fonctionnelle générale, évolutionniste et fonctionnelle / organique détaillée.

Ces différentes vues seront successivement détaillées dans les autres parties.

### I/ Notion de produit « actif » tout au long de son cycle de vie

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre précédent, le produit est vu comme une entité « consommatrice » de services transitant entre différents systèmes de soutien tout au long de son cycle vie (Exception faite de la phase d'usage où le produit est également « producteur » de services).

Après avoir explicité les différents types de fonctions liant le produit à son système de soutien, et précisé la notion de processus décisionnel, nous présenterons le concept de produit « actif » et en détaillerons les avantages.

#### I-1/ Fonctions principales et secondaires associées à un produit

Comme illustré par la figure 15, le produit dispose d'un ensemble de fonctions primaires (FP) permettant de fournir des services à un ou plusieurs utilisateurs. Pour exister et continuer d'exister, le produit a également besoin de fonctions secondaires avec les objectifs suivants :

- assurer que le produit soit bien conçu, fabriqué, livré, entretenu et enfin recyclé,
- améliorer les critères de performance associés aux fonctions primaires. Par exemple, une fonction secondaire d'autodiagnostic autorise une meilleure disponibilité du produit.

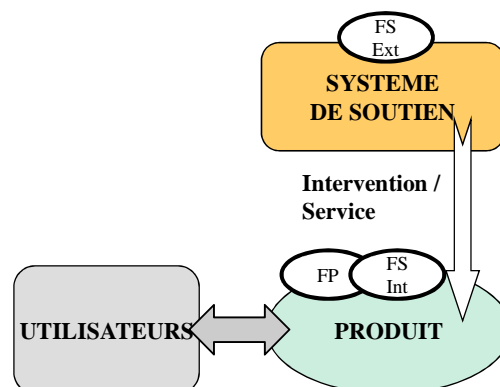


Figure 15. Fonctions principales et secondaires



Toutes les fonctions primaires sont censées être intégrées et gérées au sein du produit. Elles ne sont effectives qu'en phase d'usage. Les fonctions secondaires (FS) quant à elles se divisent en deux catégories :

- les fonctions secondaires « internes » (FS Int) supportées par le produit. Ces fonctions ne sont effectives qu'en phase d'usage et sont principalement dédiées aux interactions Produit-Utilisateurs (avertissement d'un manque de consommable, par exemple),
- les fonctions secondaires « externes » (FS Ext) gérées par le système de soutien.

Au niveau de chaque étape du cycle de vie du produit, il conviendra donc de gérer les fonctions secondaires externes en maîtrisant les processus décisionnels associés. Les terminologies associées à ces processus décisionnels sont explicitées dans la section suivante.

## **I-2/ Notion de processus décisionnel**

La prise en charge d'une fonction nécessite de mener un processus décisionnel de façon à assurer un bon niveau de performances au regard de cette fonction.

En accord avec (Pomerol, 1997) et (Trentesaux, 2007), nous considérons qu'une décision correspond à « l'acte de résolution d'un problème (sous-entendu « décisionnel ») dans l'objectif de réduire une distance entre une situation donnée et une situation désirée ».

L'activité de décision ne constitue cependant qu'une étape d'un processus plus global, appelé « processus décisionnel ». Ce dernier comporte six étapes : Déclenchement, Renseignement, Conception, Décision, Application et Evaluation (Pomerol, 1997 ; Tahon & Trentesaux, 2001) :

- l'activité de « Déclenchement » consiste à activer un processus décisionnel (de manière périodique ou événementielle),
- l'activité de « Renseignement » consiste à rechercher l'ensemble des informations qui seront exploitées lors des phases de Conception, Décision et Evaluation,
- l'activité de « Conception » consiste à élaborer l'ensemble des alternatives possibles et l'évaluation à priori de leur impact potentiel sur les performances du système,
- l'activité de « Décision » consiste à effectuer un choix parmi les alternatives proposées,
- l'activité d'« Application » consiste à transformer une décision prise en actions à mener au niveau du système,
- l'activité d'« Evaluation » consiste à évaluer à posteriori l'application d'une décision.

## **I-3/ Définition de l'activité associée à un produit**

Le concept d'activité associée à un produit va consister à soulager le système de soutien en prenant en charge certaines étapes du processus décisionnel associé à une fonction secondaire donnée.

Cette notion d'activité contraste avec le caractère « passif » du produit classiquement considéré. Le produit « passif » se trouve dans l'impossibilité de prendre d'initiative vis-à-vis du système de soutien et ne peut que subir l'intervention de ce dernier.

Les définitions suivantes peuvent alors être proposées :

- Un produit est « actif » dans une phase particulière de son cycle de vie s'il prend en charge une partie du (des) processus décisionnel(s) associé(s) à une ou plusieurs fonctions externes secondaire(s) pertinente(s) pour cette phase.
- A contrario, un produit est « passif » si toutes les fonctions secondaires externes associées sont prises en charge par un système de soutien externe.

Selon une approche événementielle, le produit actif doit être capable à minima de comparer son état actuel avec un état désiré. Si certaines conditions sont remplies, il interagit alors avec le système de soutien (envoi d'alarme / notification) de façon à déclencher un processus décisionnel. Par exemple, un produit « actif » dans sa phase de fabrication, disposant d'une liste des services à obtenir, doit être capable selon son avancement dans la liste de lancer une requête pour obtenir un service spécifique.

Bien évidemment, cette faculté de « déclenchement » ne constitue qu'un premier niveau d'activité. Des activités plus complexes (mémorisation, communication, négociation, apprentissage...) participant à un processus décisionnel plus complet peuvent être envisagées. Par exemple, en phase d'usage, des fonctions de diagnostic (généralement prises en charge par le système soutien de maintenance) pourront être prises en charge par le produit « actif ». Cette surveillance « active » peut aller d'une simple détection de

franchissement d'un seuil au niveau d'une mesure jusqu'à la génération d'informations de diagnostics de haut-niveau pour des opérations de maintenance curative et / ou prédictive.

Ces différents niveaux d'activité seront pris en compte au niveau de notre modèle générique via les classes proposées dans la prochaine section V-2.

Nous privilégierons dans la suite de ce mémoire le terme « actif » au terme « intelligent ». La notion d'activité permet à notre avis de mieux expliciter le type de relation que le produit entretient avec un système de soutien pour une fonction donnée. Plusieurs spécificités, différenciant notre proposition des différents concepts introduits dans l'état de l'art du chapitre précédent, sont explicitées ci-après :

- Le terme de produit « actif » avait déjà été proposé dans (Brun Picard et al., 1997). Cependant les auteurs s'intéressant principalement à la phase de fabrication dans un contexte manufacturier, le concept perdait de sa généralité.
- Notre proposition se distingue également de celle de « smart product » proposée dans l'état de l'art. La communauté Informatique ayant proposé ce concept ne s'intéresse généralement qu'à la phase d'usage, entraînant également une perte de généralité du concept.
- Le concept de produit « actif » est plus proche du paradigme « Intelligent product » proposé par la communauté Productique. Cependant, il s'en distingue par le fait qu'une analyse fonction par fonction est réalisée, un produit pouvant très bien être considéré « actif » pour une fonction  $f_i$  et « passif » pour une autre fonction  $f_j$ . Cette analyse, fonction par fonction, apporte un degré de précision plus important que le terme trop général d'« Intelligent product ».
- De plus, les travaux sur l'« Intelligent product » exploitent pour la plupart la technologie Rfid avec une implémentation « distante » de l'intelligence associée au produit. Notre proposition ne sous-entend pas l'utilisation d'une technologie particulière de façon à assurer un haut degré de généralité.
- Dans un contexte d'activité tout au long du cycle vie, notre proposition est à rapprocher des concepts de PEID et d'Avatar proposés par la communauté Closed-loop PLM. Cependant ces dernières propositions sont très liées à l'architecture spécifique du projet PROMISE et ne mettent pas suffisamment en avant les aspects de coopération pouvant exister entre produits « actifs ».

De façon à préciser le concept d'activité proposé, ses principaux apports tout au long du cycle de vie du produit sont détaillés dans la section suivante.

#### **I-4/ Intérêt d'un produit « actif » tout au long de son cycle de vie**

L'adoption du concept de produit « actif » dans un contexte de cycle de vie offre deux types d'avantages principaux comme l'illustre la figure 16 suivante :

- Un apport « interne » à chaque phase du cycle de vie, via une amélioration des performances du couple « Produit - Système de soutien »,
- Une amélioration de la qualité des flux d'informations entre les différentes phases du cycle de vie.

##### **I-4-1/ Amélioration des performances au sein de chaque phase du cycle de vie**

Comme illustré sur la figure 16, cette première amélioration résulte des capacités décisionnelles associées au produit, exploitant différentes sources d'informations :

- des informations proprioceptives (1) : Ces informations sont relatives à l'état (physique et informationnel) du produit et regroupent :
  - o les données statiques ou dynamiques embarquées,
  - o les informations sur l'état physique (température ou pression internes par exemple). obtenues par des capteurs.
- des informations extéroceptives (2) : Ce second flux d'informations est obtenu au travers des interactions avec son environnement informationnel (profils des utilisateurs, par exemple) ou de la captation de son environnement physique (température, hygrométrie par exemple).

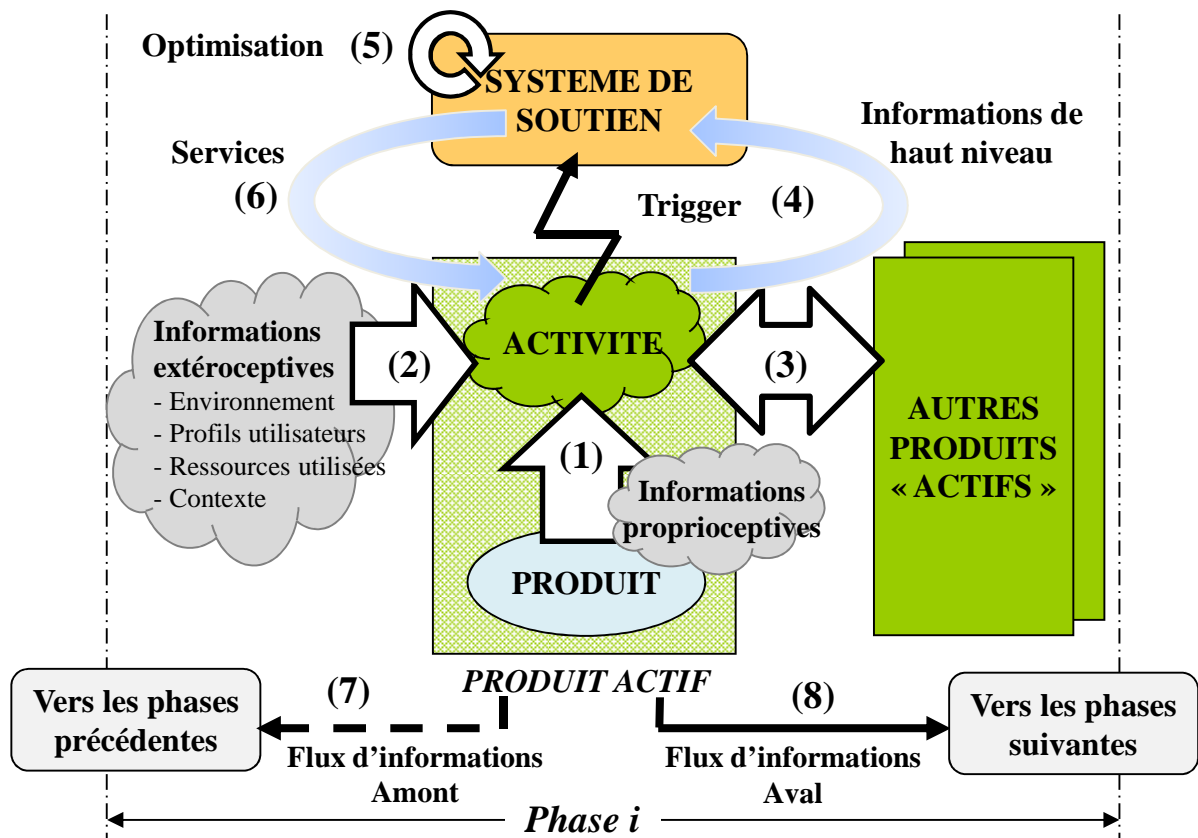


Figure 16. Illustration de l'activité associée au produit pour une phase donnée du cycle de vie

- des interactions entre produits (3) : Le produit « actif » n'est pas isolé mais fait partie d'un collectif. Les interactions avec les autres produits « actifs » permettent :
  - à minima un enrichissement quantitatif et / ou qualitatif de la connaissance qu'a le produit sur son environnement. Par exemple, les informations obtenues par le produit « actif » (flux 1 et 2) peuvent être confrontées à celles obtenues par d'autres produits « actifs » (3) de façon à renforcer leur validité et éviter la transmission d'informations erronées.
  - à un niveau d'activité plus complexe, ces interactions seront le support de mécanismes plus élaborés de relations inter-produits (négociation pour se partager une ressource critique, redistribution des rôles associés aux produits par exemple).

Ces capacités interactionnelles et décisionnelles permettent l'envoi de requêtes et d'informations de haut niveau vers le système de soutien (4).

Ce flux d'informations « fiables » permet au système de soutien d'améliorer ses performances (5). Par exemple, suite aux informations recueillies par le produit, la dérive d'un procédé au niveau d'une ressource peut être détectée et traitée plus précocement, améliorant ainsi sa disponibilité.

Une amélioration des performances du système de soutien, couplée avec des informations plus précises sur l'état du produit, induisent logiquement un meilleur service fourni au produit (6).

L'ensemble de ces différentes interactions constituent un cercle vertueux entre le produit « actif » (ou le collectif de produits) et le système de soutien.

Cette première amélioration s'accompagne d'une amélioration des flux d'informations vers les autres phases du cycle de vie, explicitée dans la section suivante.

#### I-4-2/ Amélioration de la qualité des flux d'informations entre les différentes phases du cycle de vie

Cette seconde amélioration est intimement liée à la traçabilité du produit et concernent l'instauration de flux d'informations plus rapidement disponibles et plus « riches » en amont et en aval de chaque phase du cycle de vie (flèches 7 et 8 de la figure 16). Les flux d'informations amont et aval supportent les bouclages exploitables dans une approche de type Closed-loop PLM introduite dans le précédent chapitre.

Ces boucles d'informations aval et amont peuvent être considérés, au niveau du cycle de vie, comme une généralisation du cercle vertueux vu précédemment. Elles peuvent être prises en compte de manière complémentaire aux retours d'expérience des utilisateurs et aux flux d'informations existant entre les différents systèmes de soutien.

L'approche de modélisation permettant de caractériser l'activité associée à un produit fait l'objet de la partie suivante.

## II/ Présentation de l'approche de modélisation

Nous présentons dans un premier paragraphe les spécifications attendues, nous proposons alors un modèle de produit « actif » s'appuyant sur le concept d'augmentation.

### II-1/ Spécifications

De façon à assurer la généricité du concept de produit « actif », le modèle associé doit présenter les propriétés suivantes:

- Il doit être suffisamment générique pour être pertinent pour toutes les phases du cycle de vie. Par conséquent, il doit être en mesure de prendre en compte différents niveaux de maturité du produit (maquette, produit en cours de fabrication, produit en exploitation...).
- Il doit être récursif de façon à prendre en compte le fait que les sous-systèmes d'un produit « actif » peuvent être eux-mêmes « actifs ».
- Il doit être capable de prendre en compte l'évolution des produits sur plusieurs cycles de vie successifs.
- Il doit être indépendant de la technologie pour ne pas perdre en généricité.

### II-2/ Approche de modélisation

Sur la base de ces spécifications, la figure 17, illustre notre approche de modélisation, structurée en trois vues complémentaires :

- La vue fonctionnelle globale est nécessaire pour comprendre l'ensemble des différentes fonctions qui interviennent au cours du cycle de vie du produit. Ces fonctions sont ensuite projetées sur le produit (système cible) ou sur les différents systèmes de soutien intervenant lors de chaque phase du cycle de vie.
- la vue évolutionniste explicite comment les fonctions sont redistribuées entre les différents systèmes impliqués au cours de plusieurs cycles de vie du produit, représentatifs de plusieurs générations de produits.
- La vue fonctionnelle / organique détaillée décrit plus précisément la situation d'interaction entre le collectif de produits « actifs » et le système de soutien pour chaque fonction secondaire étudiée.

Ces différentes vues sont successivement présentées dans les parties suivantes.

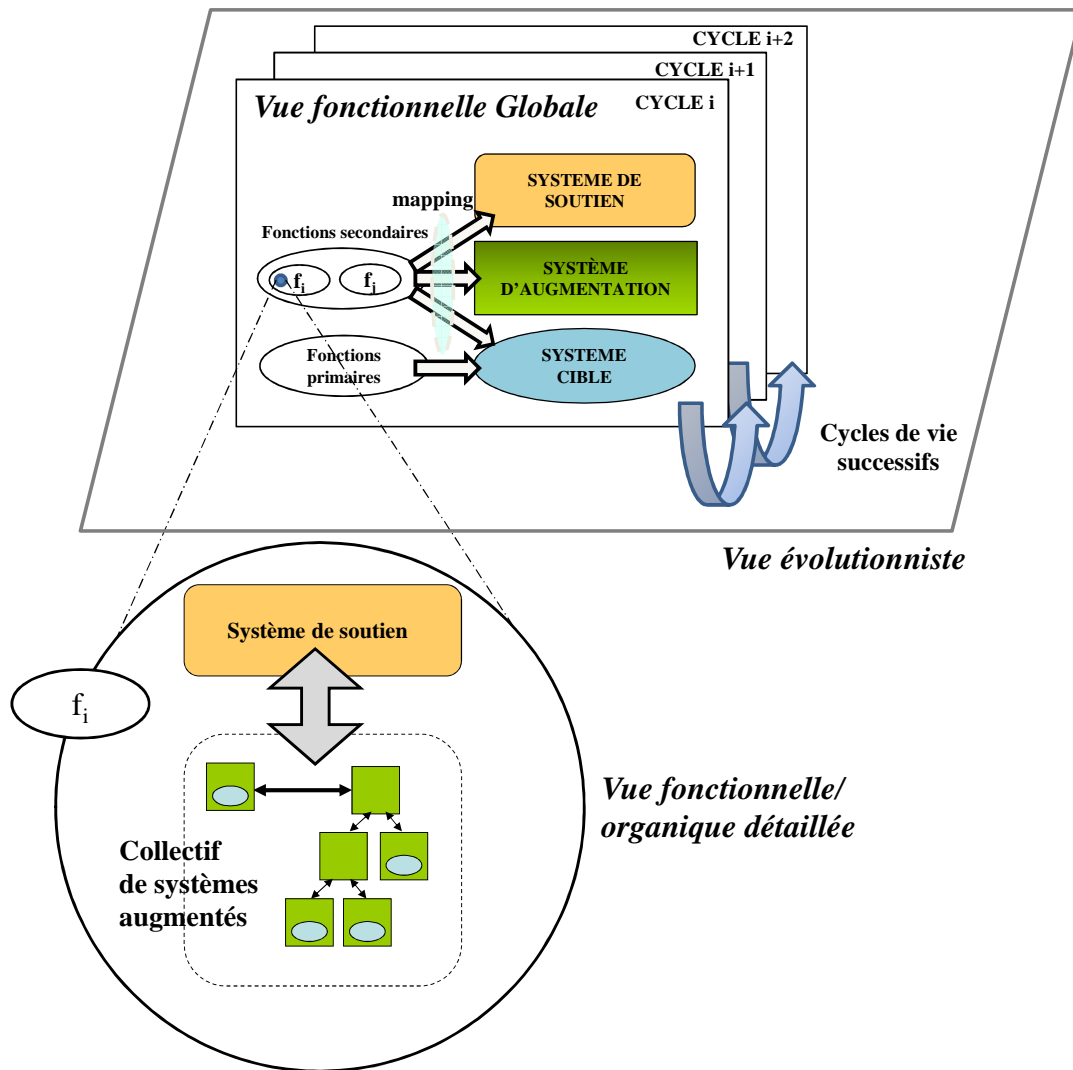


Figure 17. Les différents points de vue de la modélisation

### III/ Vue fonctionnelle globale

Dans notre approche de modélisation, nous adoptons une vue systémique, qui considère le produit comme un système appelé « système cible », noté  $\sum^C$ . Le système de soutien est noté  $\sum^S$ .

Comme introduit dans la section I-1, toutes les fonctions primaires sont censées être intégrées et exécutées au sein du système cible. Les fonctions secondaires quant à elles ne sont pas nécessairement toutes intégrées dans le « système cible ». Certaines d'entre elles (fonctions secondaires externes) sont prises en charges par le système de soutien  $\sum^S$ . Notre approche de modélisation consiste à supporter certaines fonctions secondaires externes sur un système particulier, appelé système d'augmentation et noté  $\sum^{SA}$ . Le système d'augmentation aura donc pour rôle de supporter le caractère « actif » associé au système cible. Il devra ainsi supporter des activités allant d'un simple envoi de requête ou de message d'alarme à des activités plus complexes telles que le traitement d'informations associé à la gestion d'un appel d'offres.

Comme représenté sur la figure 18 ci-après, un système « cible augmenté » est le résultat de l'association de  $\sum^{SA}$  avec  $\sum^C$ .

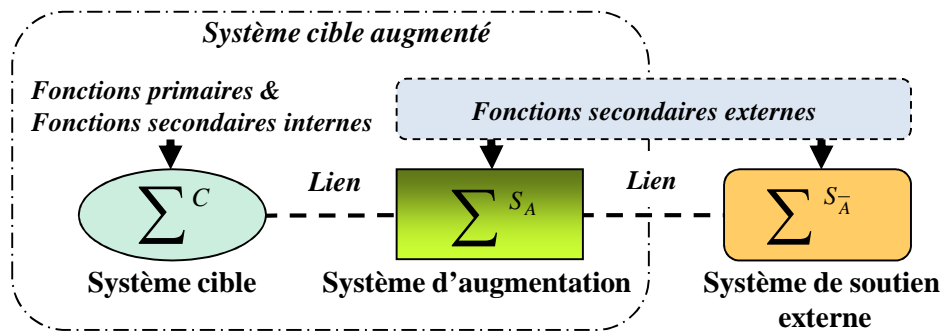


Figure 18. Représentation du système cible augmenté, du système d'augmentation et du système de soutien externe

Cette vue fonctionnelle ne doit pas être considérée comme statique. Elle est amenée à évoluer comme explicité dans la partie suivante.

#### IV/ Vue évolutionniste

La répartition des fonctions entre les différents systèmes peut évoluer au cours des cycles de vie successifs du produit, correspondant ainsi aux différentes versions successives. Cette évolution peut être provoquée, par exemple, par le désir d'offrir de nouveaux services aux consommateurs, la nécessité d'améliorer la traçabilité du produit, ou la volonté d'associer une fonction d'autodiagnostic au produit. Cette évolution peut se faire en :

- ajoutant (ou supprimant) une fonction primaire ou secondaire soutenue, correspondant à l'évolution du système cible ou,
- en redistribuant les fonctions secondaires entre les différents systèmes  $\Sigma^C$ ,  $\Sigma^{S_A}$  et  $\Sigma^{S_{\bar{A}}}$ .

La figure 19 illustre un scénario de migration de certaines fonctions d'un système à l'autre, entre deux cycles de vie successifs. Par exemple, la fonction de diagnostic  $f_8$  (pour la maintenance prédictive), initialement supporté au cycle  $i-1$  par le système de soutien  $\Sigma^{S_{\bar{A}}}$ , est prise en charge par le système d'augmentation  $\Sigma^{S_A}$  au cycle  $i$ . Elle est en définitive intégrée dans le système cible  $\Sigma^C$  pour une nouvelle génération de produits (cycle  $i+1$ ).

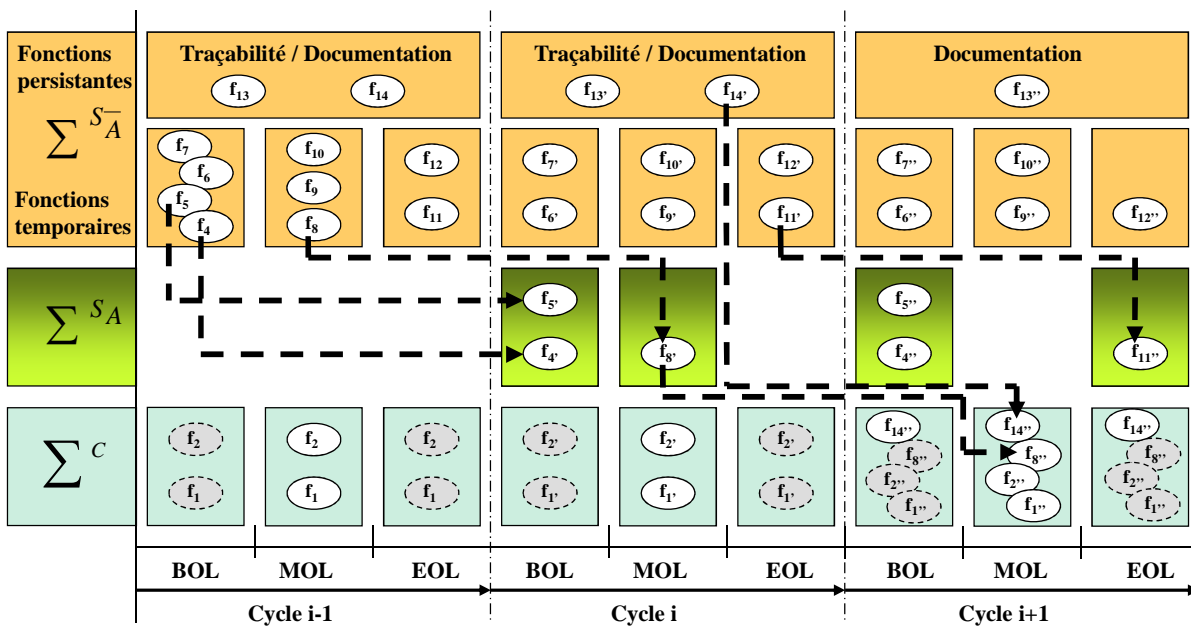


Figure 19. Vue évolutionniste

**Remarque** : Dans un même cycle de vie  $i$ , certaines fonctions (par exemple, traçabilité, documentation) sont persistantes tout au long du cycle de vie, tandis que d'autres sont temporaires et uniquement pertinentes pour une phase spécifique.

Les deux vues précédentes donnent un panorama d'ensemble des différentes fonctions mais doivent être complétées par une analyse fonction par fonction, constituant la vue « fonctionnelle / organique détaillée » décrite dans la partie suivante.

## V/ Vue fonctionnelle / organique détaillée

La vue fonctionnelle / organique détaillée permet de représenter la situation d'interaction entre le collectif de produits « actifs » et le système de soutien, au regard de la fonction secondaire étudiée. Comme précisé dans la section I-3, une analyse fonction par fonction est indispensable, un produit pouvant être « passif » pour une fonction  $f_i$  et « actif » pour une autre fonction  $f_j$ .

Conformément à l'exemple de la figure 20 (fonction  $f_j$  en phase d'usage), l'analyse d'une fonction se décompose en deux points de vue, fonctionnel et organique, décomposés eux-mêmes en plusieurs volets.

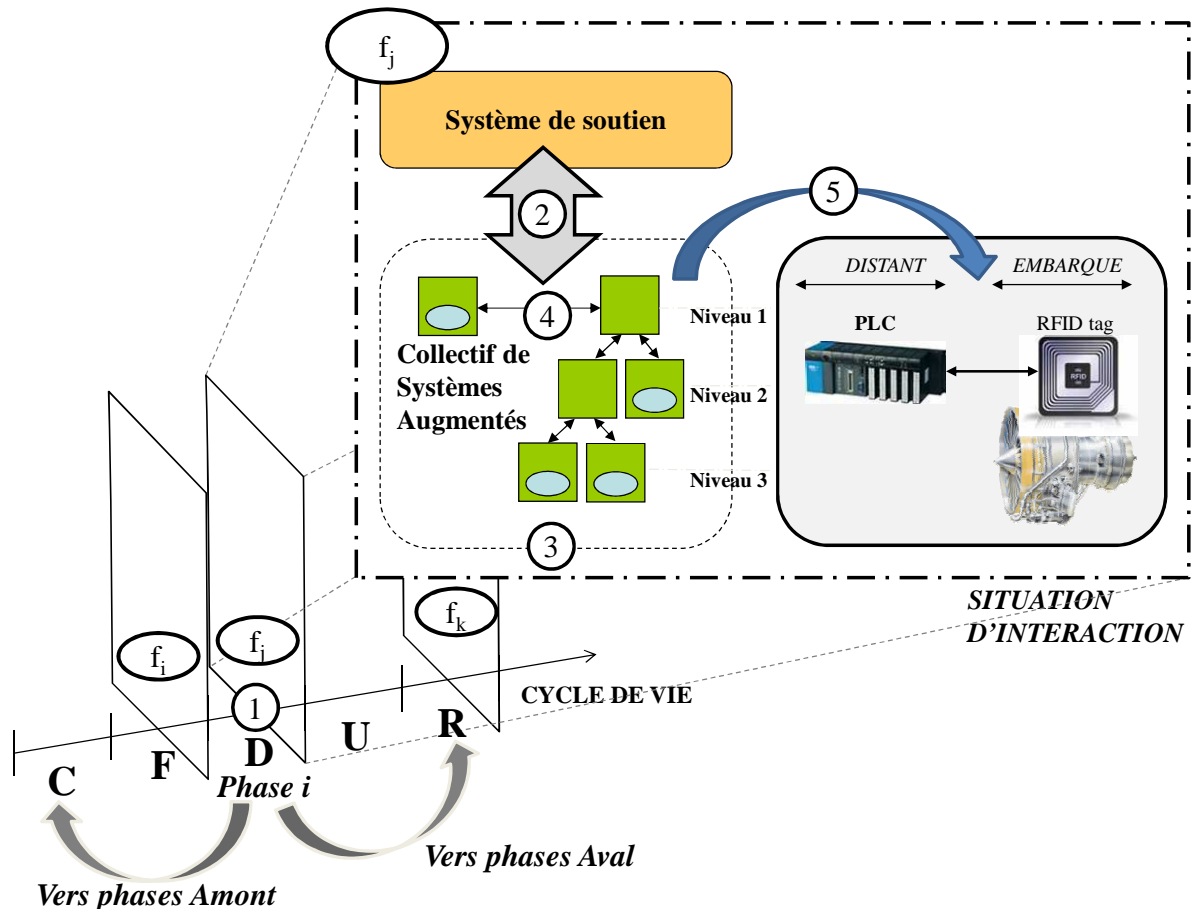


Figure 20. Exemple d'analyse d'une fonction

- **Point de vue fonctionnel** : Il comporte deux volets :
  - (1) Un volet « Cycle de vie » permettant de caractériser la fonction secondaire analysée, la phase concernée du cycle de vie et les flux d'informations générés vers les autres phases (amont ou aval) du cycle de vie.
  - (2) Un volet « Classe » permettant de caractériser le type de lien entretenu entre le collectif de produits et le système de soutien pour la fonction considérée.
- **Point de vue organique** : Il comporte trois volets :
  - (3) Un volet « Descriptif du collectif » fournissant une vue organique du collectif. Exploitant une approche de décomposition holonique, il met en évidence les liens entre systèmes « actifs » supportant la fonction.
  - (4) Un volet « Descriptif des interactions » permettant de caractériser les interactions au sein du collectif.
  - (5) Un volet « Implémentation » permettant de préciser le type d'implémentation adoptée.

Ces différents volets font l'objet des sections suivantes.

### V-1/ Volet « Cycle de vie »

Ce volet permet de positionner la situation d'interaction, et par là même la fonction analysée, dans le cadre d'une approche Closed-loop PLM. Il permet de caractériser :

- la phase courante (C : Conception, F : Fabrication, D : Distribution, U : Usage ou R : Recyclage),
- les liens informationnels éventuels avec les phases amont,
- les liens informationnels éventuels avec les phases aval.

### V-2/ Volet « Classe »

Comme illustré par la figure 21, pour une fonction secondaire donnée, quatre classes peuvent être distinguées selon la part prise par le collectif de systèmes « actifs » dans le processus décisionnel associé :

- (1) La classe 1 correspond à un collectif de systèmes « passifs ». le système de soutien gère complètement le processus décisionnel associé à la fonction. Il recueille lui-même les informations au près du collectif et gère l'ensemble du processus décisionnel associé à la fonction considérée (Déclenchement, Renseignement, Conception, Décision, Application et Evaluation).
- (2) La classe 2 est représentative d'un collectif de systèmes augmentés ayant un rôle d'initiateur du processus décisionnel. Nous considérons que le collectif à un rôle « actif » car il est à l'initiative du déclenchement d'un processus décisionnel, même si les autres étapes de ce dernier sont prises en charge par le système de soutien.
- (3) La classe 3 est caractéristique d'un collectif de systèmes gérant entièrement le processus décisionnel associé à la fonction. Le système de soutien est uniquement utilisé pour fournir le ou les services associés à la mise en œuvre de la fonction secondaire.
- (4) La classe 4 caractérise un collectif au sein duquel les systèmes sont auto-suffisants. Ils sont à même d'assurer le service qui était rendu par le système de soutien pour les classes précédentes.

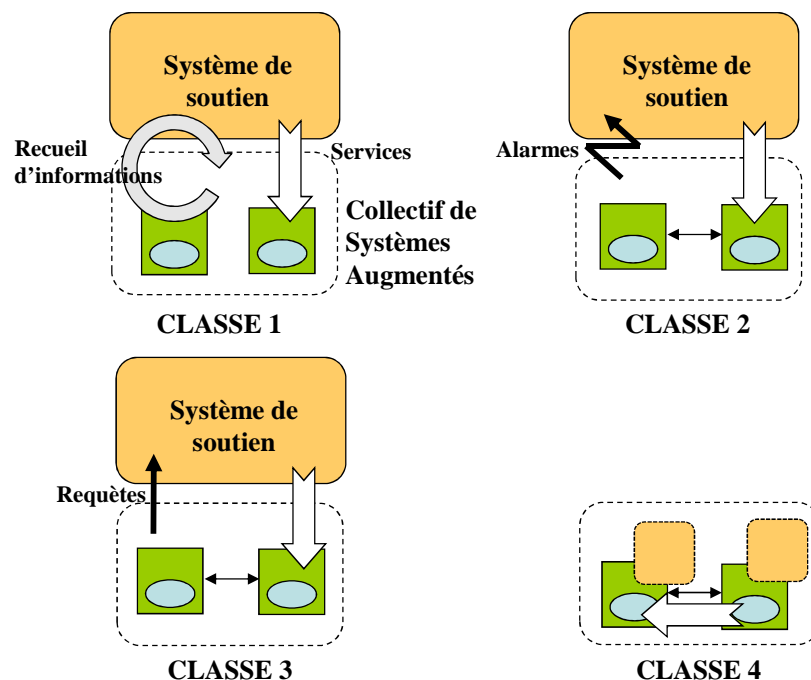


Figure 21. Les classes de relations Collectif – Système de soutien

### V-3/ Volet « Descriptif du collectif »

Selon un point de vue organique, le collectif de systèmes augmentés est vu comme un ensemble de systèmes en interaction. Chaque système augmenté est composé d'une partie physique et d'une partie informationnelle. Il est constitué d'un ensemble de sous-systèmes pouvant à leur tour être re-décomposés en sous-systèmes. L'activité associée au système résulte de l'activité des sous-systèmes « actifs » positionnés sur différents niveaux de décomposition.



Selon le principe introduit par Koestler (1967), cette architecture de systèmes peut être considérée comme une holarchie. Pour chaque couple  $(f_i, S_i)$  de l'architecture holonique, un holon  $H_i$  est défini. Par exemple, dans la figure 22 ci-après, le couple  $(f_{13}, S_{13})$  constitue le holon  $H_{13}$ .

Chaque holon  $H_i$  est caractérisé par deux propriétés principales :

- **Autonomie** : Au niveau  $i$ , un holon  $H_i$  prend en charge de manière autonome le traitement décisionnel associé à la fonction  $f_i$ .
- **Coopération** : Au niveau  $i$ , dans le but d'assurer son traitement décisionnel, le holon  $H_i$  interagit avec d'autres holons situés sur le même niveau  $i$ , et avec les holons des niveaux  $i-1$  et  $i+1$  de l'architecture holonique. Ces interactions ont lieu dans un espace de collaboration supportant les différents échanges d'informations entre holons.

A chaque niveau de décomposition, un type peut être associé à chaque système :

- **MOL (Moléculaire)** : décomposé en sous-systèmes,
- **ATO (Atomique)** : non décomposable.

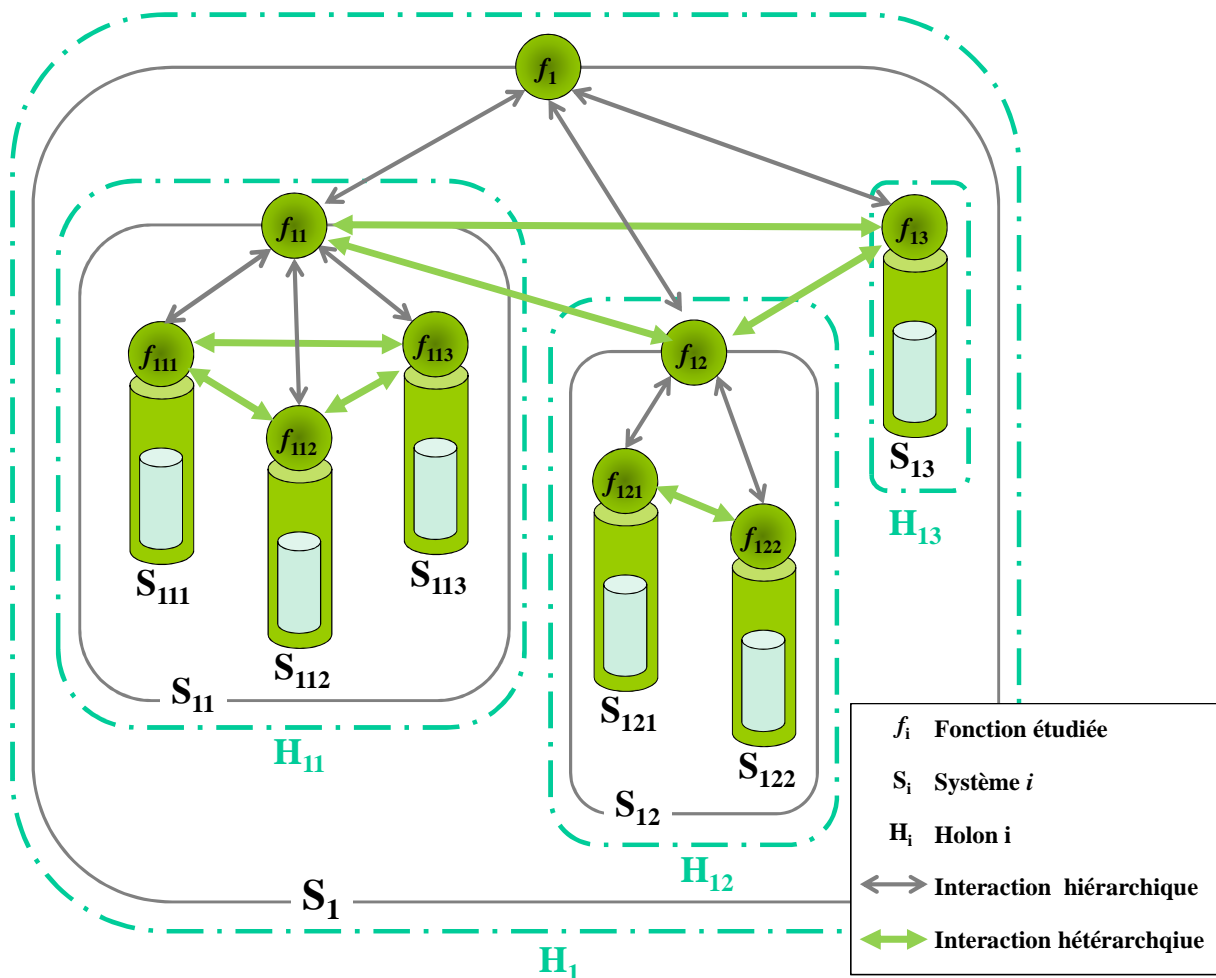


Figure 22. Exemple de décomposition holonique

#### V-4/ Volet « Descriptif relationnel »

Ce volet décrit les interactions existant entre les différents systèmes augmentés faisant partie du collectif de produits « actifs ». Quatre types de relations peuvent être distingués :

- *NUL (Inexistante)* : il n'existe pas d'interaction informationnelle entre les systèmes. Le terme de collectif n'évoque ici qu'une juxtaposition de systèmes pris individuellement.
- *SLA (Social Sans Lien d'Autorité)* : il existe des interactions informationnelles entre systèmes, mais aucun lien d'autorité n'existe entre eux. Par exemple, les systèmes interagissent pour s'échanger des informations sur leurs contextes respectifs.
- *LAV (Social avec liens d'Autorité Variables)* : Les systèmes interagissent entre eux et des liens d'autorité variables existent entre eux. Dans cette classe, on retrouve des relations de type hétérarchique avec des mécanismes d'interaction telles que la délégation de rôles, des relations de type contract-net...
- *LAF (Social avec liens d'Autorité Fixes)* : Dans cette catégorie, des liens d'autorité fixes existent entre les systèmes, faisant apparaître une hiérarchie.

Les deux derniers types de relations peuvent être formalisés en utilisant la théorie des graphes (Trentesaux, 2009). Un graphe orienté, composé de nœuds représentant les entités décisionnelles et d'arcs représentant l'interaction maître-esclave d'une entité décisionnelle (maître) avec une autre entité (esclave), est appelé « graphe d'influence ». Lorsque chaque nœud peut être considéré à la fois comme maître et esclave, le graphe est alors considéré comme fortement connexe et définit une hétérarchie. Au sein des espaces collaboratifs de la structure holonique introduite dans le volet précédent, les relations inter-niveaux sont de type LAF. Les liens intra-niveau sont de type NUL, SLA ou LAV.

#### V-5/ Volet « Implémentation »

Ce volet reprend en l'affinant le principe de la classification de Meyer (Meyer et al., 2009), relatif à la localisation de l'intelligence. En effet, les deux classes distinguées par Meyer (Intelligence au travers d'un réseau, Intelligence au niveau de l'objet) se révèlent un peu ambiguës. Par exemple, dans un véhicule, comment caractériser un système d'augmentation qui observe ou diagnostique un système cible localisé dans le véhicule ? L'intelligence est en effet proche du système à diagnostiquer et peut accéder aux paramètres de ce dernier au travers d'un réseau.

Nous lui préférons la dualité « Embarqué / Distant » :

- *EMB (Embarquée)* : La partie décisionnelle du système d'augmentation est reliée physiquement au système cible par une chaîne cinématique (temporaire ou persistante). Nous pouvons distinguer deux sous-classes :
  - o *Intégré* : La liaison entre le système d'augmentation et le système cible est alors indissociable. Elle persiste tout au long du cycle de vie du produit (de l'opération physique permettant l'intégration jusqu'au recyclage / démantèlement).
  - o *Associé* : La liaison cinématique reliant le système d'augmentation au système cible est temporaire. Cette classe permet par exemple de représenter des associations de type « produit brut / support instrumenté » lors des phases de fabrication ou de distribution.
- *DIS (Distante)* : La partie décisionnelle du système d'augmentation est distante et non reliée physiquement au système cible.

Système d'augmentation « embarqué » (figure 23) : Dans cette approche d'implémentation, les deux sous-systèmes physique et informationnel de  $\sum^{SA}$  sont reliés par une chaîne cinématique à  $\sum^C$ . Ces implémentations sont notés respectivement :  $\left(\sum_{inf}^{SA}\right)_{emb}$  et  $\left(\sum_{phy}^{SA}\right)_{emb}$ . Dans cette approche,  $\sum^{SA}$  est autonome et est relié à  $\sum^{S_A}$  par un lien informationnel.

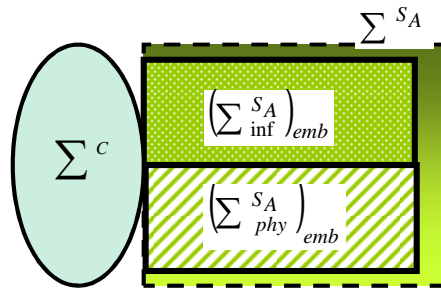


Figure 23. Implémentation « embarquée » du système d'augmentation

Système d'augmentation « distant » (figure 24): Dans cette approche d'implémentation, seuls le sous-système physique de  $\Sigma^{SA}$  (noté  $(\Sigma_{phy}^{SA})_{emb}$ ) et une partie du sous-système informationnel (noté  $(\Sigma_{inf}^{SA})_{emb}$ ) sont embarqués.

La partie restante du sous-système informationnel (noté  $(\Sigma_{inf}^{SA})_{dis}$ ) de  $\Sigma^{SA}$  se trouve à distance. Une synchronisation informationnelle (flèche en zigzag de la figure 24) est donc nécessaire entre les deux sous-systèmes  $(\Sigma_{inf}^{SA})_{emb}$  et  $(\Sigma_{inf}^{SA})_{dis}$ .

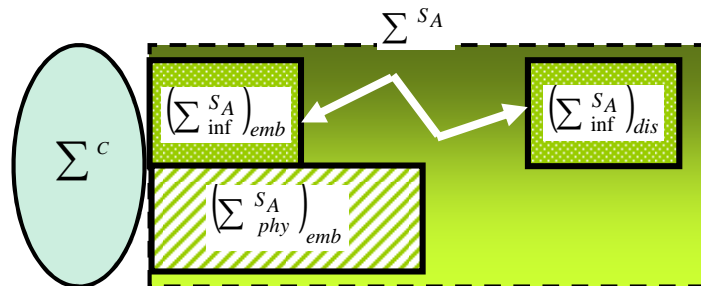


Figure 24. Implémentation « distante » du système d'augmentation

Un exemple typique d'une telle implémentation est un dispositif Rfid constitué d'une composante informationnelle (tag Rfid) intégrée à  $\Sigma^C$  et d'autres composantes informationnelles intégrées à un système de traitement distant.

## Conclusion

Au cours de ce second chapitre, nous avons introduit le concept de produit « actif » tout au long de son cycle de vie. Après avoir différencié ce concept des autres notions proposées dans la littérature, nous avons présenté ses principaux apports en matière d'amélioration de performances.

Un modèle générique, permettant de caractériser l'activité du produit selon plusieurs vues (fonctionnelle générale, évolutionniste et fonctionnelle / organique détaillée), a également été proposé.

Ce modèle générique sera utilisé dans le prochain chapitre pour construire un cadre d'analyse, qui permettra la caractérisation et le positionnement des différentes contributions au niveau international et national.

# Chapitre 3 : Analyse des contributions internationales et nationales

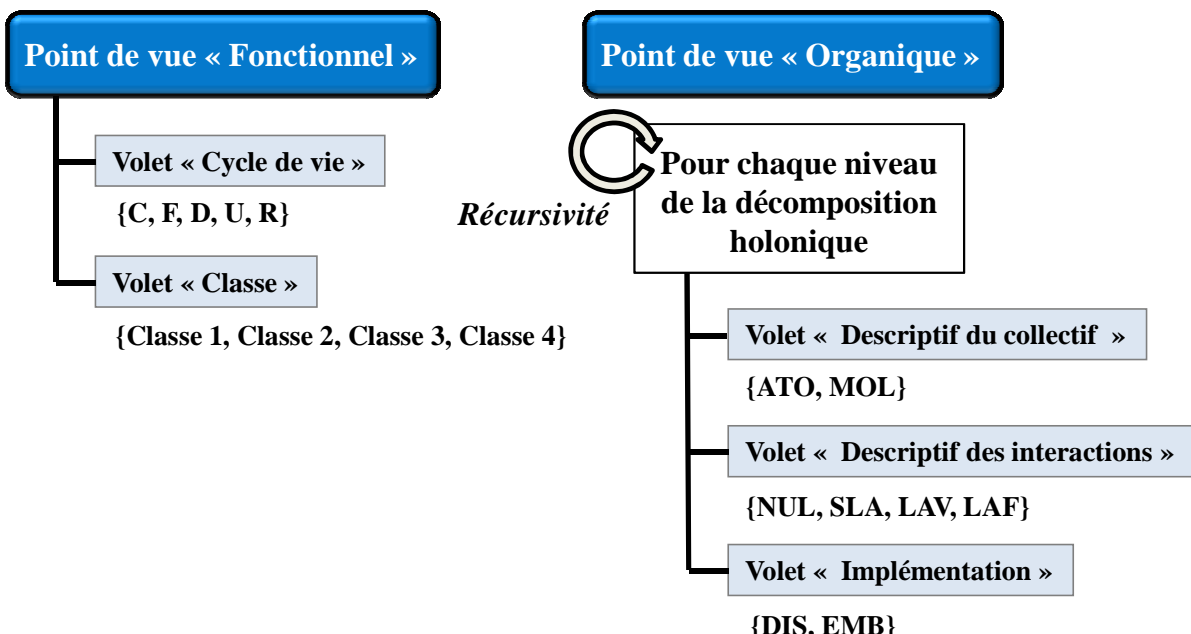
## Introduction

Comme nous l’avons mis en évidence dans le premier chapitre, la thématique de recherche « Produit intelligent / actif » se situe à la confluence de trois communautés de Recherche : la communauté Automatique / Productique, la communauté s’intéressant au PLM et la communauté Informatique via les travaux sur l’Internet Of Things. Cependant les travaux de la communauté informatique en intelligence ambiante ciblent principalement le produit dans la phase d’usage et plus particulièrement les aspects « interaction » avec l’utilisateur. L’aspect « cycle de vie », que nous considérons comme important pour obtenir une vue globale de l’activité associée au produit, n’est réellement abordé que par les deux premières communautés. Ce fait nous conduit à recentrer, dans ce chapitre, notre étude sur les travaux des deux premières communautés. Cette analyse des différentes contributions internationales et nationales vient compléter l’état de l’art sur la définition de « produit intelligent / actif » et les typologies présentés dans le premier chapitre.

Après avoir proposé un modèle du produit « actif » dans le chapitre précédent, ce modèle est repris à fin de construire un cadre d’analyse. Ce dernier est ensuite utilisé pour dresser un état des lieux des différents travaux de Recherche internationaux et nationaux. Les travaux de différents projets internationaux ainsi que le positionnement de plusieurs communautés scientifiques seront également précisés.

### I/ Proposition d’un cadre d’analyse de l’activité associée à un collectif de produits

Le cadre d’analyse que nous utiliserons dans la suite du document pour positionner les contributions nationales et internationales ainsi que nos travaux reprend les différents volets de la vue « fonctionnelle / organique détaillée » introduite dans le chapitre précédent. La figure 25 résume ce cadre d’analyse avec pour chaque volet, les différentes options possibles entre accolades.



<b>LEGENDE :</b>	<b>C :</b> Conception	<b>DIS :</b> Distante	<b>NUL :</b> Aucune relation
	<b>F :</b> Fabrication	<b>EMB :</b> Embarquée	<b>SLA :</b> Social Sans Lien d’Autorité
	<b>D :</b> Distribution	<b>ATO :</b> Atomique	<b>LAV :</b> Social avec Lien d’autorité Variable
	<b>U :</b> Usage	<b>MOL :</b> Moléculaire	<b>LAF :</b> Social avec Lien d’autorité Fixe
	<b>R :</b> Recyclage		

Figure 25. Structure du cadre d’analyse

Exemple : La figure 26 ci-après illustre l'application de ce cadre pour l'analyse de la fonction « diagnostic » d'un système complexe (projet FUI SURFER détaillé dans le chapitre 4). Chaque volet est complété. Le volet « Cycle de vie » fait apparaître la phase courante considérée et les phases impactées selon l'approche Closed-loop PLM.

Le point de vue organique s'appuyant sur une décomposition holonique, une description du collectif, des interactions et de l'implémentation est réalisée pour chaque niveau.

La situation d'interaction de l'exemple précédent sera décrite par la notation abrégée suivante, les autres phases impactées apparaissant en indice de la phase courante du cycle de vie :

[U<sub>CF</sub>, Classe 3, [MOL, NUL, EMB], [MOL, SLA, EMB], [ATO, SLA, EMB]].

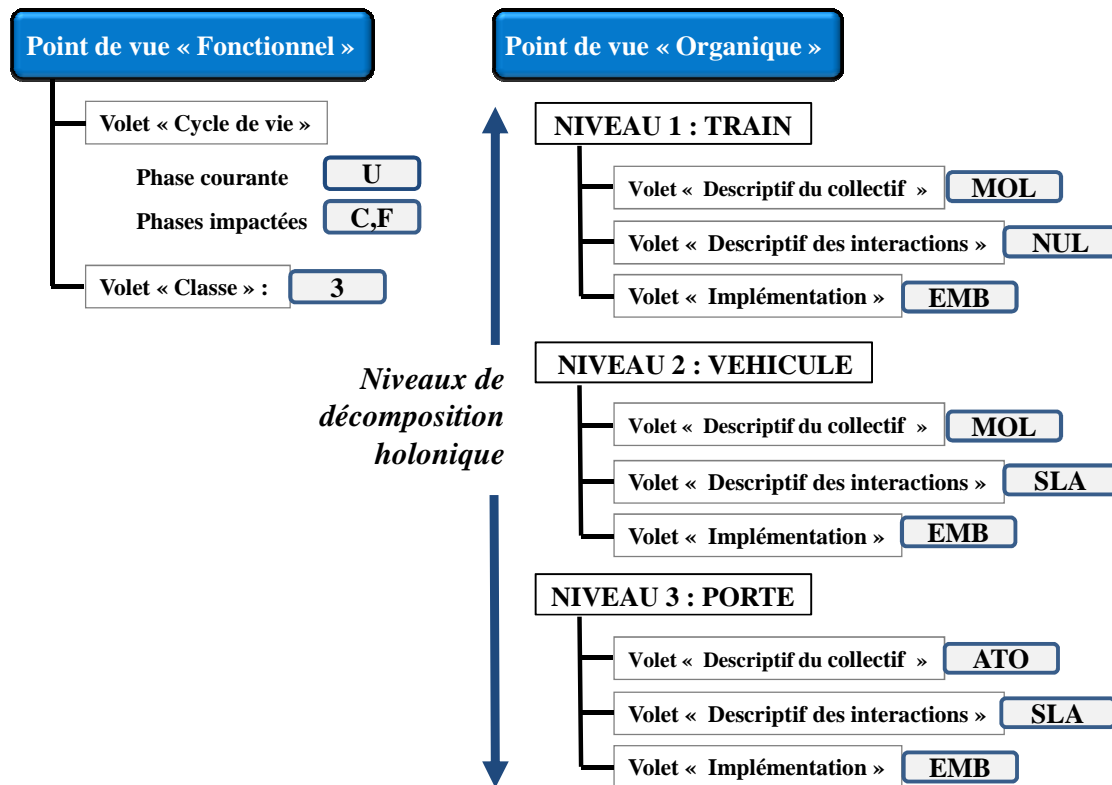


Figure 26. Exemple d'application de cadre d'analyse au projet SURFER

La partie suivante est dédiée au positionnement des différentes contributions internationales relevant de la communauté Productique et de la communauté s'intéressant au Closed-loop PLM. Chaque contribution est analysée au regard du cadre d'analyse précédent, permettant ainsi un positionnement relatif vis-à-vis des autres contributions.

## II/ Positionnement des contributions au niveau international

Cette partie est dédiée au positionnement des différentes contributions internationales sur le thème du produit « intelligent / actif ». Les travaux des différentes communautés s'intéressant au pilotage des systèmes de production, à la gestion des chaînes logistiques, au concept de Closed-loop PLM et aux problèmes d'interopérabilité, sont successivement abordés.

Nous n'entendons pas être exhaustif mais donner une vue d'ensemble des différents courants de recherche, illustrée par quelques travaux significatifs.

### II-1/ Communauté œuvrant dans le domaine du Pilotage des systèmes de production

Au sein des systèmes de pilotage hétéroarchique (Trentesaux, 2009), un rôle « actif » peut être associé au produit que ce soit pour des fonctions d'allocation de ressources au produit ou de routage au sein du système de production. Selon (Bousbia & Trentesaux, 2002), les architectures de pilotage hétéroarchiques sont principalement inspirées de trois types d'approches de modélisation :

- bioniques et bio-inspirées,
- multi-agents,
- holoniques.

## II-1-1/ Approches bio-inspirées et bioniques

Les systèmes de production bioniques ont été proposés par Okino (1993). Ce type d'approche exploite les propriétés des systèmes naturels et intègre les caractéristiques biologiques (par exemple, l'auto-organisation, l'évolution, l'apprentissage ou l'adaptation) dans la conception d'un système de production (Ueda, 2001). Par analogie avec les cellules qui forment un système vivant, les entités qui composent un système de production bionique sont autonomes et auto-organisées. Cette analogie conduit à définir des entités composées de cellules, d'enzymes et de gènes. Généralement, ce type d'architecture est une architecture de pilotage entièrement hétérarchique (sans aucune relation hiérarchique).

Dans ces approches, le produit est considéré comme une entité décisionnelle exhibant souvent un comportement réactif (remontée de gradient de champs de potentiels par exemple). Ces approches sont pour la plupart restées au stade de la simulation avec des situations envisagées de type [F, Classe 3 ou 4, [ATO, SLA, EMB]].

## II-1-2/ Approches multi-agents

Plusieurs études ont été menées pour représenter les entités d'un système de commande hétérarchique à l'aide du paradigme Multi-Agents (Mařík & Lazansky, 2007 ; Leitão, 2009). Un agent est défini comme une entité autonome (physique ou virtuelle), capable d'agir sur son environnement et de communiquer avec d'autres entités (Ferber, 1995). L'architecture de contrôle repose sur un réseau d'agents, qui en interagissant entre eux sont capables de produire un comportement collectif complexe cohérent par rapport aux objectifs fixés. Sont cités ci-après, quelques travaux représentatifs du domaine :

- (Parunak et al., 1998) ont proposé l'architecture AARIA (Autonomous Agents for Rock Island Arsenal) apte à prendre en compte les niveaux « ordonnancement » et exécutifs d'un système de production. Une approche de négociation, utilisant le principe de contrat, est utilisée pour répartir l'allocation Produits-Ressources.
- Maione & Naso (2003) ont proposé un système de contrôle où les produits et les ressources ont des capacités décisionnelles. Deux types d'agents « produits » et « ressources » communiquent entre eux et utilisent une approche multicritères pour réaliser l'allocation Produits-Ressources.
- Dans (Vrba et al., 2008), les auteurs mettent l'accent sur l'utilisation de la technologie Rfid associée à une architecture de pilotage à base d'agents. Dans l'architecture proposée, des agents « pièces » négocient avec les ressources de production pour assurer leur fabrication.
- Tehrani et al. (2010) ont utilisé une architecture à base d'agents pour la planification en temps réel d'un système flexible de production. Deux types d'agents sont considérés : les agents physiques, qui représentent les tâches à réaliser, les ressources et les procédés de fabrication et d'usinage; et les agents informationnels, qui régissent les protocoles de négociation et de prise de décision.

Dans ces travaux, validés pour la plupart uniquement en simulation, les agents représentatifs des « produits » prennent en charge le processus d'allocation mais n'interagissent pas entre eux. Les implémentations, réalisées de façon « distante », s'appuient généralement sur l'utilisation des technologies Rfid. Les situations qui en résultent sont de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].

Au niveau applicatif, un projet pilote de Rockwell Automation intitulé MAST (Manufacturing Agent Simulation Tool) (Vrba & Mařík, 2005) a permis le développement d'une plateforme de simulation et de commande à base d'agents et exploitant la technologie Rfid associée aux produits. Les outils développés dans MAST ont été utilisés avec succès pour piloter la cellule d'assemblage et de packaging de l'IFM à l'Université de Cambridge (Fletcher et al., 2003). L'implémentation « distante » de l'intelligence associée au produit amène à des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].

Une des rares applications industrielles de ces approches multi-agents est décrite dans (Bussmann & Schild, 2007). Les auteurs ont proposé un contrôle multi-agents d'une cellule de production chez Daimler Chrysler. Dans ce système de contrôle, le choix de la machine de fabrication est effectué par la pièce à usiner elle-même. Ce système de contrôle a pu être expérimenté et a permis d'améliorer la flexibilité du système de production. Là encore, l'allocation donne lieu à des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].

## II-1-3/ Approches holoniques

Les systèmes holoniques définis par Koestler (1967) considèrent un holon comme une entité considérée à la fois comme un « tout », constitué d'autres entités, et en tant que partie d'un ensemble, apte à coopérer avec d'autres holons. Dans le cadre de l'initiative internationale «Intelligent Manufacturing Systems» (<http://www.ims.org/>), le projet HMS (Holon Manufacturing Systems) a proposé d'appliquer le concept d'holararchie au pilotage des systèmes de production agiles.

Parmi les travaux les plus significatifs dans le domaine, nous pouvons citer :

- L'architecture PROSA (Product Resource Order Staff Architecture), définie dans (Van Brussel et al., 1998), est sans nul doute l'architecture la plus reconnue au sein de la communauté. Au niveau de la représentation du produit ou d'un lot de produits, cette architecture distingue le holon « Product », contenant les informations nécessaires pour assurer la fabrication d'un produit, et le holon « Order » ayant en charge la réalisation de l'ordre de fabrication. Ce dernier holon a un rôle décisionnel prépondérant dans le pilotage du système de production. Plusieurs cas d'étude applicatifs de cette architecture sont décrits dans (Van Belle et al., 2012). En accord avec (Herrera, 2011), dans la plupart des applications de PROSA, l'intelligence associée au produit est distante et mène à des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].  
Des travaux récents (Verstraete et al., 2007) proposent le développement d'un Holonic - Manufacturing Execution System (HMES) reposant sur l'architecture PROSA. Dans cette étude, les holons « order » utilisent la stigmergie via l'envoi d'agents « intention », assimilés à des fourmis exploratrices, pour découvrir les ressources disponibles et réserver la meilleure. En considérant que les entités dialoguent entre elles indirectement via l'environnement, l'activité d'allocation est de type [F, Classe 3, [ATO, SLA, DIS]].
- Leitão & Restivo (2006) ont proposé l'architecture ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture). Dédiée au pilotage d'ateliers de type « job-shop », cette architecture introduit les holons « task » et « operational » pour supporter respectivement le comportement des produits et des ressources. La particularité de cette architecture est de proposer une alternance entre un état stable « Stationary state », permettant une optimisation globale du système, et un état « Transient state » autorisant un pilotage plus réactif. De récents travaux (Leitão et al., 2012 ; Pach et al., 2012b) visent à tester des nouvelles approches à base de champs de potentiel au niveau du « Transient state ». Selon le niveau d'embarquement de l'intelligence et d'interaction, les situations envisagées peuvent varier du type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]] pour l'activité d'allocation (Leitão & Restivo, 2006) au type [F, Classe 4, [ATO, SLA, EMB]] pour le routage dans (Pach et al., 2012b).
- En coopération avec l'équipe TEMPO-PSI, l'équipe CIMR de l'Institut Polytechnique de Bucarest a proposé une architecture reposant sur le concept d'Entité Active Généralisée permettant de supporter un flux « actif » d'entités au sein d'un système (Borangiu et al., 2012). Ce modèle générique peut être utilisé en fabrication pour représenter un flux de produits « actifs » mais aussi dans un contexte du transport guidé pour représenter un flux de cyber-véhicules. Dans des activités de routage, les situations envisagées sont de type [F ou U, Classe 4, [ATO, SLA, EMB]].

La section suivante décrit les contributions de la communauté s'intéressant à la gestion des chaînes logistiques.

## II-2/ Communauté œuvrant dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques

En raison de la complexité et de l'ampleur des chaînes logistiques, une gestion centralisée éprouve des difficultés à faire face en temps réel aux perturbations (embouteillages du trafic, pannes d'unités de réfrigération...) (Holmström et al., 2009 ; Sánchez López et al., 2011b).

Dans (Wycisk et al. 2008 ; Holmström et al., 2009 ; Meyer et al., 2009), les auteurs mettent en évidence l'intérêt d'un changement de paradigme permettant de passer d'un contrôle centralisé à une gestion décentralisées des chaînes logistiques, rendues possibles par le développement de la Rfid, des techniques de géolocalisation GPS et des réseaux de capteurs.

La communauté s'intéressant aux problématiques de gestion de la chaîne logistique exploite déjà depuis de nombreuses années des technologies permettant d'associer de l'information au produit (codes-barres, tags Rfid passifs ou actifs). La technologie Rfid a été utilisée avec succès pour le suivi des produits, permettant d'obtenir des informations sur leur localisation et leur état physique. Les applications sont nombreuses : vérification du chargement d'un camion, re-routage des livraisons en transit, amélioration de la sécurité

(détection de vols ou de rupture de la chaîne du froid). Les références (Angeles, 2005 ; Sarac et al., 2010) fournissent une vue d'ensemble des différentes utilisations possibles lors des étapes successives d'une chaîne logistique. L'introduction de la technologie Rfid a notamment permis d'accroître l'efficacité et la rapidité des processus ainsi que d'améliorer la précision des informations. Dans (Meyer et al., 2009), les auteurs présentent les différents systèmes d'information et standards développés pour gérer ce flux d'informations Rfid. Le standard EPCIS (EPCglobal, 2005) s'impose mais rencontre encore certaines limitations mises en évidence dans (Främling et al., 2012).

Dans les applications classiques de la Rfid au sein de la chaîne logistique, le produit ne fait cependant que « porter » des informations et ne joue pas un rôle « actif » selon notre définition. Les contributions décrites ci-après augmentent le degré d'activité associé au produit en abordant majoritairement des applications de classe 2 ou 3.

Le livre blanc (Mitsugi et al., 2007) propose une intégration des capteurs dans une infrastructure EPCglobal et décrit les possibles applications de suivi de l'état physique du produit tout au long des opérations de la chaîne logistique. Les auteurs notent cependant que si les technologies, Rfid et WSN (réseau de capteurs sans fil) sont largement reconnues, leur intégration est encore à son balbutiement. Dans (Sánchez López et al., 2011a), l'accent est notamment mis sur le fait d'intégrer les capteurs au plus près des objets pour le suivi de produits périssables. En effet positionner un unique capteur de température dans un container pour suivre une cargaison n'est pas suffisant, la température pouvant varier fortement selon la position des produits. Des produits « actifs » pouvant s'échanger des informations sur leurs températures locales s'avèrent alors une solution intéressante.

Selon le type d'application et l'instrumentation associée aux produits, différentes situations d'interaction entre les produits « actifs » et le système de soutien logistique peuvent être distinguées :

- Dans (Sánchez López et al., 2001a), une application de suivi de produits périssables est détaillée. Une étiquette Rfid et un capteur de température intégrés au conditionnement du produit permettent de déclencher une alerte en cas de rupture de la chaîne du froid. L'implémentation étant faite de manière distante, cette application est de type [D, Classe 2, [ATO, NUL, DIS]].
- Dans (Patkai et al., 2007), des applications de suivi de produits, incluant des capacités de traitement embarquées au niveau du produit et autorisant les produits à interagir entre eux pour se partager des informations issues de capteurs, relèvent de situations de type [D, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]].
- Des applications d'entreposage de fûts chimiques sont décrites dans (Strohbach, et al., 2004 ; Dobre et Bajic, 2008). Les fûts sont munis de capacités de traitement et de communication embarquées permettant de prévenir des positionnements incompatibles au niveau sécurité. Les fûts sont vus comme un collectif de produits, dialoguant entre eux, aptes à remonter une alarme vers le système de gestion de l'entrepôt et donnent lieu à une situation de type [D, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]].
- Dans (Van Belle et al., 2011), les auteurs mettent en avant le caractère générique de l'architecture PROSA en appliquant les concepts de pilotage holonique dans le cadre d'applications de cross-docking. Dans le cadre de ces travaux encore au stade expérimental, les situations envisagées sont de type [D, Classe 3, [ATO, NUL, DIS ou EMB]].
- Dans (Hribernik et al., 2010), les auteurs décrivent l'application des concepts de l'IOT au domaine de la logistique. Ils décrivent une application de transport de produits périssables utilisant des agents associés aux différentes caisses de produits. Ces agents négocient les meilleures « trajectoires » au sein du système de transport et surveillent les conditions de transport du chargement. Les traitements concernant la surveillance du fret étant embarqués au sein du moyen de transport, les situations sont de type [D, Classe 3, [ATO, NUL, EMB]].
- Les travaux décrits dans (Wycisk et al. 2008) et (Hülsmann et al., 2008) considèrent les chaînes logistiques comme des systèmes complexes adaptatifs. Certaines applications envisagées exploitant les concepts d'auto-organisation, sont de classe 4.

La section suivante fait le point sur les contributions de la communauté œuvrant dans le cadre du Closed-loop PLM.

### **II-3/ Communauté œuvrant dans le domaine du Closed loop PLM**

A l'image du domaine de Recherche sur le produit « intelligent / actif », les travaux dans le domaine du Closed-loop PLM bien que récents sont en plein essor. Une vue d'ensemble des problématiques de recherche liées au domaine du Closed-loop PLM est dressée dans (Kiritsis et al., 2003 ; Jun et al., 2007 ; Kiritsis,



2011). Ils mettent notamment en évidence les flux d'informations possibles entre les différentes phases du cycle de vie et les différents avantages attendus. Plus récemment, le concept de Closed-loop PLM a été généralisé sous la dénomination de Closed-Loop Lifecycle Management (<http://cl2m.com/>).

Dans le même contexte, Cassina et al. (2009) ont proposé le concept de « Extended Product Life cycle Management » permettant une interaction plus étroite entre les entreprises et leurs clients. Ces derniers sont impliqués dans toutes les phases du cycle de vie de façon à « personnaliser » de plus en plus le produit. Cette approche prône l'introduction de nouvelles fonctionnalités qui améliorent l'utilisation du produit, telle que par exemple, la maintenance prédictive. Les travaux ont mis en avant le concept d'Avatar considéré comme une représentation virtuelle du produit et contenant toutes les informations et connaissances associées au produit physique. L'Avatar est toujours lié à un élément physique et permet une meilleure communication entre toutes les parties prenantes. Le paradigme SOA (Service Oriented Architecture) est utilisé pour supporter l'approche.

La communauté s'intéressant à cette thématique s'est structurée ces dernières années au travers du projet européen PROMISE (Product Lifecycle Management And Information Tracking Using Smart Embedded Systems) lancé en 2004 et achevé en 2008 ([www.promise.no](http://www.promise.no)). Dans le cadre d'une initiative IMS, le consortium associé au projet a réuni des partenaires de l'Union Européenne, suisses, japonais, américains et australiens. Les partenaires européens de ce projet étaient : les universités de Cambridge, d'Aalto, de Brème et de Groningue, l'EPFL, le Politechnico di Milano, les organismes CIMRU (Irlande) et le SINTEF (Norvège).

Ce projet propose une architecture informationnelle reposant sur trois principaux constituants : agent PLM, système de gestion PLM, et produits (voir figure 27).

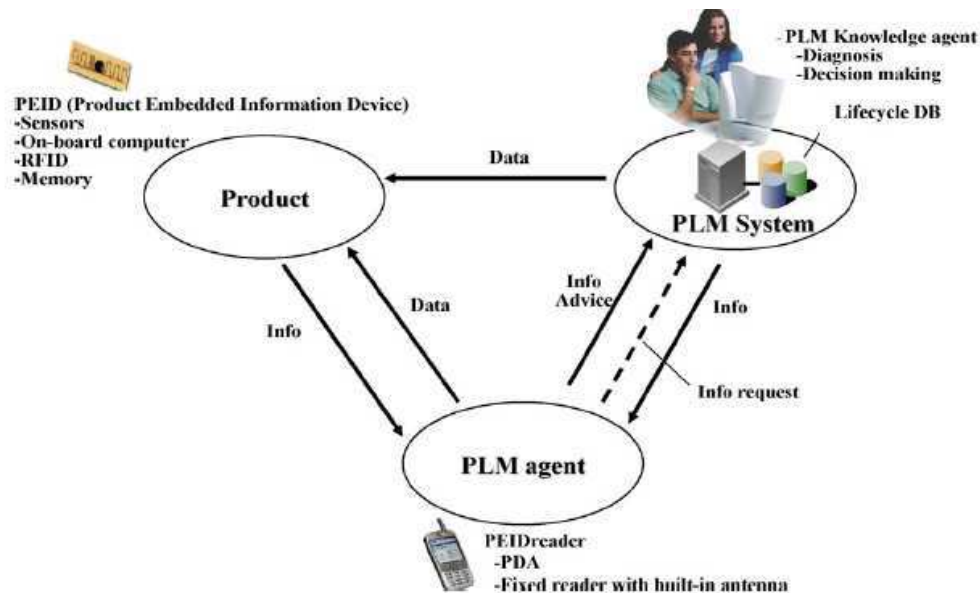


Figure 27. Interaction informationnelles proposées dans le projet PROMISE (extrait de Jun et al., 2007)

L'agent PLM se connecte à chaque produit avec une interface mobile (PDA ou ordinateur portable) et accède aux informations stockées dans un PEID (Product Embedded Information Device). Le PEID constitue le lien entre un produit réel et sa représentation électronique dans un système d'informations. L'agent PLM envoie les informations à un système de gestion PLM. Ce dernier fournit les informations et les connaissances recueillies par les agents PLM aux différents systèmes de soutien (sites de vente, de distribution ou de recyclage par exemple). Le modèle conceptuel du système PDKM (Product Data and Knowledge Management), consacré à la gestion des données et connaissances associées au produit, est décrit dans (Cassina et al., 2006 ; Cassina et al., 2009).

Selon le niveau d'intelligence associée au PEID, différentes classes d'applications ont pu être considérées (Kiritsis & Moseng, 2008), au travers de plusieurs démonstrateurs :

- Dans (Parlikad & McFarlane, 2007), les auteurs décrivent l'utilisation de la technologie Rfid dans la phase EOL pour le recyclage de produits (pièces de moteurs d'automobiles). Ils montrent comment les informations obtenues sur les produits dans les phases antérieures du cycle de vie permettent d'améliorer le processus décisionnel associé au recyclage des produits. Les situations envisagées

- sont de type [R<sub>CFU</sub>, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]], le produit étant simplement « porteur » d'informations.
- Dans (Corcelle et al., 2007), les auteurs appliquent une démarche analogue pour le suivi d'engins de chantier. Ils proposent plusieurs architectures informatiques entre systèmes de soutien pour recueillir et échanger les informations relatives aux produits. Les situations sont aussi de type [R<sub>CFU</sub>, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]].
  - Dans le démonstrateur n°5 (Kiritsis & Moseng, 2008), les auteurs effectuent également le suivi d'un engin de chantier en embarquant un PC portable relié à des capteurs sur les parties sensibles de l'engin. Le produit peut alors envoyer des alarmes vers un système de maintenance distant amenant à des situations de type [U<sub>CR</sub>, Classe 2, [ATO, NUL, EMB]].
  - Dans le démonstrateur n°6 (Kiritsis & Moseng, 2008), le suivi d'une machine-outil en phase d'usage est mis en place à des fins de maintenance conditionnelle. Un PEID muni de capteurs permet de remonter des informations sur l'état courant de la machine et conduit à une situation de type [U<sub>CR</sub>, Classe 2 ou 3, [ATO, NUL, EMB]].
  - Dans (Främling et al., 2011) et (Cassina et al., 2007), les auteurs décrivent le démonstrateur réalisé en partenariat avec la société Indesit pour la maintenance prédictive de réfrigérateurs. Un PEID, recueillant des informations via des capteurs installés sur les composantes clefs du produit, est inclus dans le système de commande du réfrigérateur. Il transmet des informations de diagnostic vers un système de maintenance distant, via un adaptateur spécifique par courant porteur agissant comme un proxy. Vu le niveau d'interaction du PEID avec le système de soutien, cette application est de type [U<sub>CFR</sub>, Classe 3, [ATO, NUL, EMB]]. Les informations peuvent être utilisées à la fois en amont vers les phases de conception et de fabrication mais également en aval pour la phase de recyclage.

Dans la majorité des travaux évoqués précédemment, les possibles interactions entre produits « actifs » ne sont pas prises en compte. Dans (Sánchez López et al., 2011a), les auteurs proposent cependant une interaction entre plusieurs composants « actifs » d'une machine à laver à des fins de diagnostic. Le châssis et le tambour sont équipés de capteurs et sont capables d'envoyer des alarmes via un réseau sans-fil à un autre produit « actif » (le moteur) hiérarchiquement supérieur et muni de capacités décisionnelles. Selon notre typologie, cette application est de type [U<sub>CFR</sub>, Classe 3, [MOL, NUL, EMB] pour le moteur, [ATO, NUL, EMB] pour le châssis et le tambour].

Les travaux précédents se heurtent à de nombreuses difficultés liées à l'hétérogénéité des différents systèmes de soutien. Les travaux de la communauté, s'attachant à traiter ces problèmes d'interopérabilité, sont résumés dans la prochaine section.

## **II-4/ Communauté œuvrant dans le domaine de l'interopérabilité**

Comme nous avons pu le noter dans le chapitre 1, de nombreux problèmes d'interopérabilité entre systèmes existent que ce soit au sein d'une même phase ou entre phases du cycle de vie d'un produit « actif ». Dans ce contexte, il est nécessaire de gérer les informations et connaissances associées au produit et de s'assurer que ces informations puissent être exploitées par les différents systèmes de soutien sans perte de sémantique.

Dans le cadre du projet PROMISE, des travaux ont été menés sur la capitalisation des informations et connaissances associées au produit « actif ». Le système PDKM (Product Data and Knowledge Management), consacré à la gestion des données et connaissances associées au produit, est décrit dans (Cassina et al., 2006 ; Cassina et al., 2009). Le modèle sémantique associé au produit et utilisé dans le système PDKM (PROMISE, 2008b) est décrit dans (Kiritsis, 2011). L'auteur y présente également les divers standards capables de supporter les échanges d'informations : EPCglobal architecture, DIALOG system, WWAI et OGC SWE.

Dans ce contexte, (Tursi et al., 2009) définissent une ontologie « produit », formalisant l'ensemble des données techniques et des connaissances associées au produit. Cette ontologie permet de rendre le produit « interopérable » vis-à-vis des différentes applications et de minimiser la perte de sémantique.

Après ce tour d'horizon des travaux de la communauté internationale, la partie suivante est dédiée au positionnement des différentes contributions nationales.

### III/ Positionnement des contributions au niveau national

Cette partie est dédiée au positionnement des différentes contributions nationales sur le thème du produit « actif / intelligent ». Le cadre d'analyse introduit dans la première partie sera utilisé pour différencier les contributions. Dans notre analyse, nous nous concentrerons sur la communauté Productique, tout en étant conscient que nombre de travaux existent également dans la communauté Informatique française (Mitton & Simplot-Ryl, 2010 ; Teixeira et al., 2011 ; Kubicki et al., 2011 ; AIC, 2011). Ces derniers ciblent principalement le produit dans la phase d'usage et plus particulièrement les aspects « interaction » avec l'utilisateur. L'aspect « cycle de vie » n'est également pas abordé.

La communauté française s'intéressant à cette thématique s'est structurée ces dernières années dans le cadre du groupe de travail IMS2 (Intelligent Manufacturing & Services Systems) du GDR Macs. Ce groupe de travail est la prolongation naturelle du projet exploratoire SCP (Système Contrôlé par le Produit) que j'ai co-animé avec E. Bajic de juin 2008 à fin 2009.

Dans notre tour de France des laboratoires, nous distinguerons les équipes pour lesquelles le concept « produit actif / intelligent » représente une thématique clef (voir même un élément de structuration), de celles pour qui l'utilisation du concept est plus marginale. La figure 28 ci-après résume le positionnement de ces équipes selon différents domaines applicatifs.

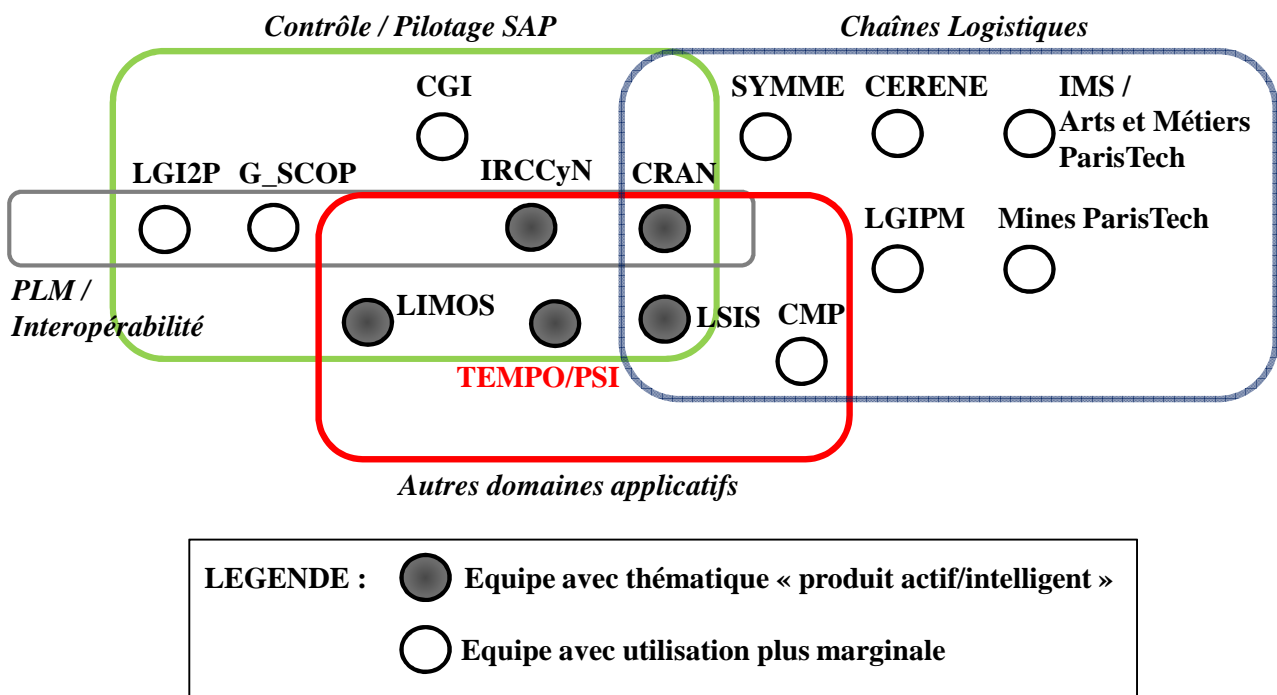


Figure 28. Positionnement des différentes contributions nationales

#### III-1/ Les équipes développant une thématique « Produit actif / intelligent »

**CRAN :** En France, le CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) est sans conteste le chef de file des laboratoires œuvrant dans le domaine du produit « actif / intelligent ». L'équipe SYMPA (Systèmes de Production Ambiants) s'est structurée autour du thème fédérateur du SCP en trois équipes :

- Système Produit qui vise l'étude du produit en vue de le rendre actif avec d'autres produits et son environnement,
- Systèmes Inter-opérants ciblant les problématiques d'interopérabilité produit-produit et/ou produit / système,
- Systèmes en Réseaux s'intéressant aux problématiques de communications entre entités d'un SCP.

Tout un ensemble de travaux a permis d'affiner le concept SCP (Morel et al., 2003 ; Morel et al., 2007 ; Gouyon, 2004 ; Pannequin, 2007 ; Gouyon & David, 2008 ; El Haouzi, 2008). Ce concept a également été validé au travers d'un large spectre d'applications :

- Dans un contexte de production manufacturière en juste-à-temps (Thomas et al., 2008), les entités «actives» Kanban sont de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].
- Dans une application d'entreposage de fûts chimiques (Dobre & Bajic, 2008), les produits sont instrumentés et s'échangent des informations de compatibilité. Les situations envisagées sont de type [D, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]].
- Dans (Pannequin & Thomas, 2012), les auteurs utilisent le concept de stigmergie pour supporter l'interaction entre le produit et son environnement. Les acteurs intervenant dans une cellule de production déposent des informations (phéromones) au niveau du produit. Une implémentation utilisant la technologie Rfid a permis d'aborder des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL ou SLA, DIS]].
- Dans un contexte PLM plus global, des travaux récents (Kubler et al., 2011) visent à étudier le niveau d'embarquement des informations associées à un produit. Les situations d'interaction envisagées sont de type [F<sub>DUR</sub> ou U, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]] pour les plus basiques (Rfid noyée dans la matière) et de type [F<sub>DUR</sub> ou U, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]] (matière « active » communicante avec capacités de traitements). Il est également important de noter que l'aspect holonique (produit « actif » composé de composants « actifs ») a également été abordé au travers de travaux récents sur l'agrégation d'informations au niveau du produit (Derigent, 2012). Le type de situation traitée dans ces derniers travaux est de type [F<sub>DUR</sub>, Classe 1, [MOL, NUL, DIS], [ATO, NUL, DIS]].

Le CRAN voit également dans le produit « actif » un élément de solution aux nombreux problèmes d'interopérabilité apparaissant tout au long du cycle de vie (Terzi et al., 2007). Ces travaux aboutissent au développement d'ontologies « produit » vues comme vecteurs d'interopérabilité vis-à-vis des différentes applications logicielles (Tursi et al., 2009 ; Panetto et al., 2012).

**IRCCyN** : L'équipe ACSED de l'IRCCyN (Institut de Recherches en Communications et Cybernétique de Nantes) s'est intéressée au concept SCP pour le pilotage des systèmes automatisés de production (Blanc, 2006 ; Cardin, 2007 ; Cardin et al., 2009). Les points forts de ces travaux sont d'utiliser des outils de simulation on-line ainsi que la notion d'observateur pour mettre en œuvre un pilotage proactif (Castagna et al., 2008 ; Cardin & Castagna, 2009). La simulation, en permettant de « prédire » l'évolution du comportement des entités dans le SAP, apporte un élément d'information intéressant pour la prise de décision.

L'apport des concepts holoniques a été mis en évidence dans le cadre de la thèse de (Blanc, 2006) pour une ligne de fabrication de pare-brises. Le concept SCP a également été appliqué au pilotage d'une ligne de traitement de surface chez Airbus (Chové, 2010). Selon notre classification, les approches utilisées sont principalement de type [Classe 3, [ATO, NUL, DIS]], un tag Rfid étant associé à chaque palette supportant le produit.

Une nouvelle instrumentation des palettes utilisées pour le transport des produits au sein de l'AIP de Nantes vise à évoluer vers plus d'embarquement de l'intelligence et d'interaction entre produits. Les situations d'interaction envisagées seraient alors de type [F, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]].

**LSIS** : Au sein du LSIS (Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes) de Marseille, les travaux sur le concept de produit « actif » constituent une suite naturelle des travaux antérieurs sur le pilotage hétérarchique (Kieffer & Pujo, 2002 ; Broissin, 1999). Le concept d'activité associée au produit avait été initialement introduit dans (Brun-Picard & Baboli, 1995 ; Brun-Picard, 2000).

A l'heure actuelle, plusieurs travaux de Recherche s'intéressent aux systèmes holoniques et auto-organisés dans lesquels des capacités décisionnelles sont associées aux produits.

- Un modèle d'architecture holonique PROSIS (Product, Resource, Order, Simulation Isoarchic Structure) a été proposé (Pujo et al., 2009). Ce modèle repose principalement sur le concept d'isoarchie, dans lequel aucune dimension hiérarchique n'est présente dans la prise de décision. Les implémentations actuelles de PROSIS utilisent des technologies Rfid et amènent à des situations où l'intelligence est distante (type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]] ou [F, Classe 3, [ATO, SLA, DIS]]). Principalement utilisée dans un contexte manufacturier (Ounnar & Pujo, 2012), l'approche proposée a également été appliquée dans d'autres phases du cycle de vie (distribution, usage) notamment pour les chaînes logistiques (Ounnar & Pujo, 2005). Une application récente (Louati et al., 2012) vise le suivi de « produits » un peu particuliers (détenus dans un complexe pénitencier).
- Des travaux réalisés en coopération avec l'IRCCyN se sont intéressés à l'application des concepts holoniques (Blanc et al., 2008) avec des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]]. L'apport

des réseaux de Petri pour supporter les dialogues entre holons a également été étudié dans (Demongodin & Hennet, 2008).

**LIMOS** : Le LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes) de Clermont-Ferrand mène depuis de nombreuses années une activité de recherche sur les structures de pilotage des systèmes de production (Kouiss & Najid, 2004). Des travaux sur le pilotage centré sur le produit, utilisant les technologies Rfid, ont été menés dans les domaines manufacturiers et hospitaliers :

- La problématique de reconfiguration des systèmes de production est abordée en donnant un rôle décisionnel au produit (Derriche & Kouiss, 2011).
- Dans le cadre des travaux (Huet et al., 2010 ; Huet, 2011), le paradigme SCP est également utilisé pour améliorer la sécurité et la traçabilité du circuit du médicament en milieu hospitalier.

Pour les deux applications citées, les implémentations sont distantes et donnent lieu à des situations d'interaction de type [F ou D, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].

Des travaux plus théoriques (Darmoul, 2010) sur les mécanismes d'interaction entre entités (concept de systèmes immunitaires artificiels) pourraient également être utilisés pour l'élaboration de collectifs auto-organisés (classe 4).

### **III-2/ Autres équipes nationales œuvrant plus ponctuellement sur le produit « actif / intelligent »**

Cette liste regroupe les laboratoires qui utilisent les concepts associés au produit « actif » dans le cadre de leurs travaux mais qui n'en font pas une thématique forte ou un axe structurant. Nous regroupons également dans cette seconde catégorie, les équipes œuvrant sur des systèmes de classe 1 et utilisant la Rfid à des fins de traçabilité.

Comme pour l'analyse des contributions internationales, nous passons successivement en revue les communautés s'intéressant au pilotage des systèmes manufacturiers et des chaînes logistiques, et aux problématiques relatives au PLM et à l'interopérabilité.

#### III-2-1/ Domaine du pilotage des systèmes manufacturiers

Laboratoire G SCOP (Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble) : Dans le domaine du contrôle qualité (Bettayeb et al., 2011), certains travaux s'orientent vers le concept de « Product driven quality control ». Directement inspiré du concept SCP, le produit décide lui-même de se faire « contrôler » à partir d'informations recueillies dans son environnement. Les situations d'interaction envisagées pour ce type d'application sont de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, EMB]] même si pour le moment les développements restent au stade de la simulation.

Centre de Génie Industriel (CGI) de l'Ecole des mines d'Albi-Carmaux : Les travaux portent sur le couplage de la simulation en ligne avec un outil de type MES afin de piloter en temps réel un système de production (Mirdamadi, 2009). L'utilisation de la simulation en-ligne, comme dans les travaux de l'IRCCyN, permet au processus décisionnel de pilotage d'envisager les futures évolutions du système. Appliqués sur une cellule réelle avec des produits équipés d'étiquettes Rfid (Fontanili & Van Oudenhove, 2008), ces travaux conduisent à des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].

Laboratoire LGI2P (Génie Informatique et Ingénierie de Production) de l'école des Mines d'Alès : L'équipe ISOE (Intéropérabilité des systèmes) a participé au projet européen PABADIS PROMISE (2008), visant le développement de systèmes de contrôle-commande distribués, flexibles, et autonomes pour les futurs systèmes de production flexibles. Le couplage des technologies « agent » et Rfid a permis d'associer des capacités décisionnelles aux produits et d'étudier des situations de type [F, Classe 3, [ATO, NUL, DIS]].

#### III-2-2/ Domaine du pilotage des chaînes logistiques

Laboratoire CMP (Centre Micro Electronique de Provence) à l'ENSM de St-Etienne : Un thème développé au sein du département SFL (Sciences de la Fabrication et Logistique) porte plus particulièrement sur l'impact des solutions communicantes dans les chaînes logistiques (Sarac et al., 2010). Dans le contexte hospitalier de production chimiothérapique, (Housseman et al., 2010) a mis l'accent sur l'apport de la Rfid pour la traçabilité et l'amélioration des processus associés. Une application récente a également porté sur l'amélioration des processus de maintenance d'hélicoptères (Jimenez et al., 2011). Selon notre classification, ces applications sont de type : [D, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]].

Laboratoire IMS (Intégration du Matériau au Système) de Bordeaux : En collaboration avec Arts et Métiers ParisTech, le laboratoire IMS s'intéresse au concept SCP via le projet ANR PRODIGE (Routage de

PRODuits intelliGEnts). Les travaux menés (Malhéné & Deschamps, 2010 ; Brahim-Djelloul et al., 2012) envisagent plusieurs niveaux d'intelligence associés aux produits :

- Au niveau du suivi des produits, les situations envisagées sont de type [D, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]] (produits avec simple étiquette Rfid) ou [D, Classe 2, [ATO, SLA, EMB]] (produits pouvant déclencher une alerte suite à une rupture de la chaîne du froid par exemple).
- Au niveau de la flotte de transporteurs, une reconfiguration des itinéraires peut se traduire par des situations de type [D, Classe 4, [ATO, SLA, EMB]].

Laboratoire Mines ParisTech : Le laboratoire s'intéresse aux applications des concepts de produits « actifs » dans le cadre du développement de l'Internet Physique (Ballot et al., 2010 ; Ballot et al., 2012). Les applications envisagées concernent le routage de produits dans les hubs logistiques. Encore au stade de simulations, les situations sont de type [D, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]] et correspondent à un collectif de containers en interaction.

Laboratoire CERENE (Centre d'Etude et de Recherche en économiE et gestioN logistiquE) du Havre : Dans (Bendriess et al., 2007), un meta-modèle holonique pour la gestion de la traçabilité dans la chaîne logistique est proposé. La notion de produit intelligent est utilisée à des fins de traçabilité (Bendriess et al., 2008).

Laboratoire LGIPM à Metz : Dans (Tamayo et al., 2009), les auteurs s'intéressent au problème de rappel des produits lors d'une crise sanitaire. La maîtrise de la traçabilité des produits devient alors un enjeu crucial. Là encore, l'application reposant sur l'utilisation de la Rfid, est de type : [D, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]].

Laboratoire SYMME (SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique) à Annecy : Dans le cadre de travaux sur la modélisation et la simulation de chaînes logistiques pour les PME (Tounsi et al., 2012), les auteurs proposent que le produit joue un rôle actif de déclencheur pour les acteurs de la chaîne. Le type de situation d'interaction envisagée est de type [F ou D, Classe 2, [ATO, NUL, DIS]].

### III-2-3/ Domaine du PLM (Product Lifecycle Management)

Comme on a pu le voir précédemment pour les contributions internationales, la communauté de chercheurs œuvrant dans le domaine du PLM s'intéresse aux retombées possibles de la notion de produit « actif ». En France, parmi les principaux laboratoires travaillant sur la thématique du PLM, nous pouvons citer l'IRCCyN (Bernard, 2008), le G-SCOP (Shahzad et al., 2012), le LGIPM (Lemaignan et al., 2006), et le laboratoire Roberval (Donati et al., 2010).

Cette communauté s'est structurée au sein du groupe de travail IS3C (Ingénierie des systèmes de conception et conduite du cycle de vie produit) du GDR Macs.

### III-2-4/ Domaine de l'Interopérabilité

La communauté nationale s'intéressant aux problèmes d'interopérabilité est regroupée au sein du groupe de travail Easy-DIM (Ingénierie d'Entreprise et de Système d'Information Dirigée par les Modèles) du GDR Macs. Outre les travaux du CRAN (Panetto et al., 2012) évoqués précédemment et s'inscrivant dans une approche « centrée produit », parmi les laboratoires les plus en pointe sur cette thématique, nous pouvons citer : le LGI2P (Chapurlat, 2008), l'IMS (Chen et al., 2008), l'Ecole des mines de St-Etienne (Boucher, 2007) et l'ENSAM Paris (Paviot et al., 2011).

Après cette présentation des différentes contributions nationales, nous nous intéressons dans la section suivante aux apports des projets internationaux.

## IV/ Les travaux des projets internationaux

Le rapport (CERP-IOT, 2010) fournit une synthèse des différents projets lancés au niveau mondial dans le domaine de l'IOT. Nous présentons ci-après quelques faits marquants au niveau international et détaillons quelques programmes européens visant des applications en Productique.

Aux USA, le U.S. National Intelligence Council classe l'IOT et les travaux sur les produits « intelligents / actifs » comme l'une des six technologies de rupture pour les prochaines années (NIC, 2008). A notre connaissance, bien que de nombreux travaux de recherche soient menés au sein des laboratoires universitaires ou des compagnies (IBM (<http://www-03.ibm.com/innovation/us/thesmartercity/>), Hewlett-Packard, Microsoft...), il n'existe pas de grand programme gouvernemental sur ce thème.

La Chine au niveau de chacune de ses provinces lance des programmes de recherche sur l'IOT. Un projet de 73 millions de dollars a notamment accompagné la création d'un important campus dédié à l'IOT, le « Sensing China Center » dans la ville de Wuxi (province du Jiangsu) en 2009.

Via les actions du METI (Ministry of Economy, Trade and Industry), le Japon s'implique également dans le développement de l'IOT. Un accord de coopération avec l'Union Européenne sur ce thème a d'ailleurs été signé en 2009.

Au niveau européen, l'IOT constitue un des thèmes phares des derniers appels à projets FP6 et FP7. De nombreux projets, regroupés au sein du volet ICT (Information and Communication Technologies : <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/>), intègrent certains aspects relevant de notre thématique dans des domaines applicatifs variés (entreprises manufacturières, logistique, grande distribution, domaine de l'énergie, transport). Ces projets se sont regroupés en « cluster » afin d'échanger, confronter et harmoniser les recherches et développements conduits, notamment en matière de normalisation. Les projets relevant du volet ICT sont listés en annexe IV.

Parmi l'ensemble des projets FP6 et FP7, les projets suivants sont plus particulièrement pertinents pour notre champ d'études :

- Un consortium européen AMI-4-INDUSTRY a fédéré depuis 2006 deux projets européens complémentaires AMI-4-SME (<http://ami4sme.org/>) et INAmI (<http://www.uninova.pt/inami/>), en relation avec les projets internationaux IMS réunissant des partenaires australiens, américains, coréens et japonais. Ces projets s'intéressent à l'introduction des techniques de l'intelligence ambiante dans les entreprises de façon à améliorer de façon significative la flexibilité et la reconfiguration des moyens de production.
  - Le projet PROMISE (Product Lifecycle Management And Information Tracking Using Smart Embedded Systems), déjà détaillé dans la section II-3, se focalise sur l'étude du cycle de vie d'un produit « actif ». De manière assez similaire, le projet SMARTPRODUCT (<http://www.smartproducts-project.eu/>) s'intéresse aux caractéristiques pro-actives des produits « intelligents / actifs » et à la gestion des connaissances associées au produit.
  - Les travaux du projet PABADIS-PROMISE du 6<sup>ème</sup> PCRD (PABADIS PROMISE, 2008) ont proposé une nouvelle architecture de pilotage à base d'intelligence distribuée, le développement de modules pour une nouvelle génération d'ERP, ainsi qu'une nouvelle ontologie de systèmes de production. Les objectifs visaient une reconfiguration dynamique des systèmes dans un mode de fonctionnement « plug-and-participate » et une coopération inter-entreprises tout au long de la chaîne logistique.
  - Le projet DYNAMITE (<http://dynamite.vtt.fi/>) a permis le déploiement d'approches d'e-maintenance et de maintenance conditionnelle dans lesquelles l'équipement surveillé est capable d'émettre un diagnostic.
  - Dans le même contexte manufacturier, le projet GRACE (<http://grace-project.org/>), a pour objectif le développement d'une approche distribuée à base d'agents pour le pilotage de la production et la gestion du contrôle-qualité. Le projet vise également une meilleure interopérabilité avec le MES.
  - Dans le domaine de la logistique, les projets e-FREIGHT ([www.efreightproject.eu/](http://www.efreightproject.eu/)) et EURIDICE ([www.euridice-project.eu/](http://www.euridice-project.eu/)) visent à améliorer les opérations de logistique via l'introduction de produits « intelligents / actifs ». L'accent est mis sur la traçabilité et la localisation en temps réel du fret. Différentes classes d'activités sont considérées au niveau du fret allant d'une simple émission d'alerte en cas de rupture de chaîne du froid par exemple jusqu'à la gestion de processus plus complexes de re-routage.
- D'autres projets comme INTEGRITY ([www.integrity-supplychain.eu/](http://www.integrity-supplychain.eu/)) et ADVANCE ([www.advance-logistics.eu/](http://www.advance-logistics.eu/)) se focalisent sur le développement de systèmes capables de collecter une quantité importante de données sur le fret transporté à des fins de sécurité, d'administration des droits douaniers ou de planification.

Au niveau mondial, dans le cadre du consortium IMS (Intelligent Manufacturing Systems) ([www.ims.org](http://www.ims.org)), outre les collaborations avec les projets européens PROMISE et AMI-4-INDUSTRY précédemment cités, d'autres projets ont été développés :

- Les projets HMS (Holonc Manufacturing Systems) et NGMS (Next Generation Manufacturing Systems) ont permis de structurer la communauté de chercheurs œuvrant dans le domaine du pilotage distribué et holonique.
- Le projet M4SM (Maintenance for Sustainable Manufacturing) vise l'étude de l'apport des TIC au niveau de la maintenance et le développement de nouvelles approches en maintenance conditionnelle et prédictive.
- Le projet UES (Ubiquitous Oriented Embedded Systems For Globally Distributed Factories For Manufacturing Enterprises) a visé le développement du concept « Machine to Machine » (M2M) au sein de l'entreprise manufacturière en proposant une architecture intégrant produits, process, opérateurs et en étudiant l'intérêt du concept M2M pour la maintenance, la gestion des flux, la mise en œuvre du MES...

La communauté s'intéressant aux applications des techniques Rfid dans un contexte global de l'IOT s'est structurée au sein du réseau « Auto-ID Labs » (<http://www.autoidlabs.org/>). Ce dernier regroupe les laboratoires de sept universités œuvrant dans le domaine de la « Rfid en réseau » et prônant le développement du standard EPCglobal. Le réseau anime également des SIG (Special Interest Groups) associant partenaires universitaires et industriels sur une thématique bien précise.

La section suivante est dédiée à une brève présentation des communautés scientifiques relevant de la thématique produit « intelligent / actif ».

## V/ Les communautés scientifiques

Au niveau international et au niveau de la communauté Productique, plusieurs organismes et groupes de recherche internationaux tels que l'IMS (<http://www.ims.org/>), l'IEEE (<http://www.ieee.org/>) et l'IFAC (<http://www.ifac.org/>) s'intéressent aux problématiques associées au produit « intelligent / actif », souvent au travers d'activités plus générales (IOT, pilotage des systèmes de production ou des chaînes logistiques) :

- Au niveau du consortium international IMS, le rapport prospectif IMS2020 (IMS, 2010) définit une feuille de route et intègre les contraintes de développement durable en orientant les travaux vers le développement de systèmes de production durables et économes en énergie.
- Au niveau de l'IEEE, la thématique qui nous intéresse s'inscrit en partie dans les travaux des comités techniques IES-TC on industrial agents (<http://tcia.ieee-ies.org/>) et IEEE TC on Distributed Intelligent Systems ([http://www.ieeesmc.org/technicalcommittess/tc\\_dis.html](http://www.ieeesmc.org/technicalcommittess/tc_dis.html)). Un rapport récent (IEEE-TTM, 2011), issu d'un symposium réunissant scientifiques et industriels, a mis en évidence l'IOT parmi les nouvelles voies de Recherche à développer par l'IEEE.
- Les travaux des comités techniques 5.1 (Manufacturing Plant Control) et 5.3 (Enterprise Integration and Networking) de l'IFAC (<http://tc.ifac-control.org/5/>) sont à considérer. L'IFAC met également l'accent sur le développement de la thématique « produit intelligent / actif » au travers de sessions dans les conférences IMS, INCOM ou de workshop tel que Sohoma.

Le CIRP (<http://www.cirp.net/>), de par ses actions dans le domaine du PLM, s'implique dans le développement du « closed-loop PLM ». Cette thématique est notamment traitée dans le cadre des récentes éditions de la conférence LCE (Life Cycle Engineering) organisées par le CIRP.

La communauté internationale de chercheurs s'intéressant aux approches multi-agents ou holoniques de pilotage se regroupe également autour de plusieurs conférences internationales phares telles que Holomas, Sohoma-INCOM ou IEEE IECON.

Au niveau national, le GDR Macs soutient la communauté française œuvrant sur cette thématique. Le projet exploratoire SCP (Système Contrôlé par le Produit), co-animé par E. Bajic et moi-même de 2007 à 2008, a permis de catalyser les efforts de plusieurs équipes des laboratoires CRAN, IRCCyN, LSIS, LIMOS et TEMPO/PSI. A l'issue de ce projet, le groupe de travail IMS2 (Intelligent Manufacturing Systems and Services) a continué d'œuvrer à la structuration de la communauté nationale s'intéressant au produit « intelligent / actif ».



## **Conclusion**

Nous avons dans ce chapitre proposé un cadre d'analyse reprenant le modèle générique de produit « actif » introduit dans le chapitre précédent. Ce cadre d'analyse a permis de positionner les différentes contributions (internationales et nationales) dans le domaine du produit « actif / intelligent ».

Au niveau international, les équipes travaillant dans le domaine du produit « intelligent / actif » en Productique s'intéressent principalement au pilotage des systèmes de production et à la gestion des chaînes logistiques. Les thématiques du « closed-loop PLM » et de l'interopérabilité sont également abordées activement par certaines équipes. Ces différentes communautés de chercheurs se structurent au sein des grands organismes tels que l'IMS, l'IEEE, l'IFAC et le CIRP mais également dans le cadre de plusieurs projets européens, tel que PROMISE.

Au niveau national, comme on peut le constater à l'issue de ce positionnement, la majorité des contributions citées relève du pilotage des systèmes de production ou des chaînes logistiques, qui constitue une thématique forte au sein de la communauté STP. Cependant, seules quelques équipes s'inscrivent pleinement dans une approche de type SCP. Un travail important reste à réaliser pour diffuser plus largement les concepts novateurs proposés dans ce type d'approche au sein de la communauté française. Dans ce contexte, les activités de diffusion du groupe de travail IMS2 du GDR Macs s'avèrent capitales.

## **Chapitre 4 : Contributions et résultats de Recherche**

### **Introduction**

Dans ce chapitre, nous appliquons le modèle générique présenté dans le chapitre 2 aux différentes thématiques que nous avons abordées dans nos travaux. Nous caractérisons ces derniers en appliquant le cadre d'analyse introduit dans le chapitre précédent.

Nous distinguons quatre thématiques de Recherche recouvrant différents champs applicatifs :

- La première concerne la reconfiguration des Systèmes Automatisés de Production (SAP) et se situe en tout début de carrière. Dans ces premiers travaux, le flux de produits était considéré comme entièrement passif.
- La seconde, concernant également la phase de fabrication, met en évidence les travaux réalisés dans le cadre d'une approche SCP. Les interactions entre produits « actifs » sont plus particulièrement abordées.
- Dans la troisième thématique, nous abordons l'étude d'un système augmenté plus complexe, comportant plusieurs niveaux de systèmes augmentés, dans le domaine du diagnostic de véhicules ferroviaires.
- La dernière thématique s'intéresse plus particulièrement à l'application du concept d'augmentation en phase d'usage dans un contexte de circulation urbaine.

### **I/ Thématique n°1 : Reconfiguration des systèmes automatisés de production / Premiers pas vers le concept d'activité associée au produit**

Les travaux relevant de cette première thématique ont été menés en début de carrière (1990-1997) au sein de l'équipe LAMIH-SP sous la direction de R. Soënen.

#### **I-1/ Contexte et problématique**

L'étude du cycle de vie des systèmes automatisés de production, nous a permis d'identifier une problématique de l'exploitation et en particulier de mettre à jour le manque de modèle de modes d'exploitation prenant en compte tous les éléments constituant un SAP quelle que soit sa complexité (Parayre et al., 1991a).

La reconfiguration d'un système automatisé de production consiste en une modification de son comportement dynamique et/ou de son mode d'exploitation afin qu'il maintienne la performance demandée. La reconfiguration peut être demandée en cas de mise en marche totale ou d'arrêt total du système, d'existence d'une défaillance dans le SAP pouvant affecter la sécurité des personnes et du matériel, de changement de la production (Rojas Ramirez et al., 1995). Le concept de reconfiguration peut être résumé comme suit : "Étant donnée l'état actuel  $E_a$  d'un système automatisé de production, et suite à un ordre de reconfiguration du flux de pièces ou à l'occurrence d'une défaillance, quelles sont les procédures (manuelles et / ou automatiques) à appliquer et quels sont les états intermédiaires par lesquels il faut faire passer le système pour le positionner dans un état voulu (ou objectif)  $E_o$  ?".

#### **I-2/ Travaux réalisés**

Les travaux ont été structurés selon deux axes directeurs :

- La formalisation des modes de fonctionnement d'un SAP,
- Le développement d'outils d'aide à l'exploitant.

##### **I-2-1/ Formalisation des modes de fonctionnement d'un SAP**

Réalisés en partie en collaboration avec Renault Automation dans le cadre du projet KARMEN (action Serics n°90 2 3021), nos travaux ont permis l'élaboration du MESAP (Modèle d'Exploitation des Systèmes Automatisés de Production). Ce modèle distingue un aspect flux de pièces circulant dans le SAP, un niveau Composant regroupant tous les constituants matériels et logiciels de base du SAP et plusieurs niveaux Application qui décrivent tous les logiciels spécifiques au fonctionnement du SAP (Parayre et al., 1991b). Les niveaux « Composant » et « Application » sont eux-mêmes décomposés en Unités Fonctionnelles (UF),

décrivant le comportement des modes de marche (famille, passage d'un mode à un autre...). La figure 29 ci-après donne un aperçu de cette approche hiérarchique des modes de fonctionnement d'un SAP. La formalisation du MESAP est obtenue par la définition des classes d'objets nécessaires à la modélisation, selon un formalisme s'appuyant sur la méthode de conception orientée objet HOOD (Parayre et al., 1992a ; Parayre et al., 1992b). Cette méthode de description permet de représenter les différentes entités au sein d'un SAP ainsi que les liaisons existant entre elles.

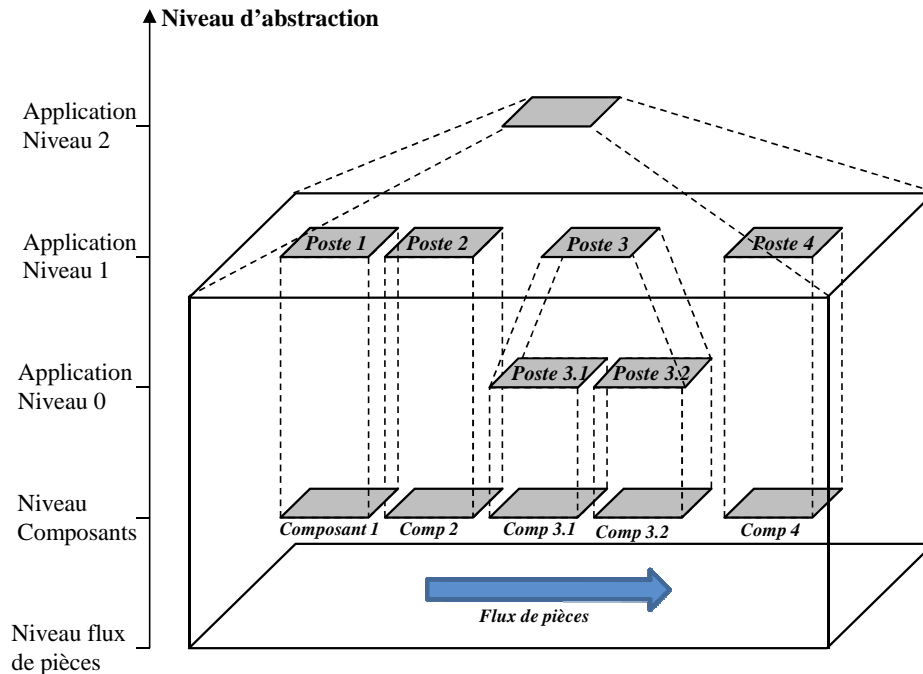


Figure 29 : Exemple de modélisation de cellule utilisant le MESAP

### I-2-2/ Développement d'outils d'aide à l'exploitant

Le MESAP ne fournit pas de solution explicite et immédiate pour la reconfiguration des modes d'exploitation d'un SAP. L'objectif de ce second axe a donc consisté à compléter le MESAP par la proposition d'une méthodologie permettant une aide à la reconfiguration des SAP. Comme évoqué dans la problématique, la reconfiguration d'un SAP consiste en une modification de son comportement dynamique et / ou de son mode d'exploitation. L'ensemble des modifications réalisées suit un protocole bien défini qui constitue un scénario de reconfiguration. Chaque scénario est caractérisé par :

- la reconfiguration des modes d'exploitation : concerne la reconfiguration des modes d'exploitations des entités matérielles et logicielles du système de production (ou les Unités fonctionnelles définies dans le MESAP) (Mabrouk et al., 1996a),
- la reconfiguration des niveaux commande : concerne la reconfiguration des niveaux applications du MESAP (Mabrouk et al., 1993).

### I-3/ Résultats obtenus et limitations mises en évidence

Ces travaux ont donné suite à la rédaction de trois thèses (Parayre, 1992 ; Rojas Ramirez, 1996 ; Mabrouk, 1996) et à plusieurs publications proposant une méthodologie et des outils d'aide à l'exploitation des systèmes automatisés de production.

La validation de la méthodologie proposée par le MESAP a pu être réalisée par l'utilisation d'outils de Génie automatique tel que K-SYS (Minaud et al., 1994 ; Minaud et al., 1995).

Des simulations utilisant le système H-Expert ont également permis de valider les outils d'aide à l'exploitant pour une cellule robotisée comportant deux ressources d'usinage et un robot de chargement / déchargement (Mabrouk et al., 1996b).

Dans l'approche proposée, l'ensemble des traitements était réalisé de manière centralisée et distante et le flux de produits était considéré comme « passif ». A l'époque, les développements technologiques en infotronique et en communication ne permettaient pas d'envisager une instrumentation du produit. Selon notre cadre d'analyse, les situations étudiées étaient de type [F, Classe 1, [ATO, NUL, DIS]].

La mise en œuvre centralisée de la reconfiguration se heurtait cependant à plusieurs limitations, telle que la difficulté de déterminer l'état exact du système et de prendre en compte certaines contraintes (gestion d'états instables). Dans le cas d'un système un peu compliqué, nous étions également confrontés à une explosion combinatoire des états du collectif d'entités à prendre en compte. Face à ce constat, nous avons jugé nécessaire d'aborder le problème sous l'angle d'une reconfiguration plus implicite, et de passer d'une résolution centralisée à une résolution plus distribuée. Ce changement de paradigme nous a amenés à nous intéresser aux systèmes décisionnels distribués. Le flux de produits jouant un rôle important dans le MESAP, la notion d'activité décisionnelle associée au produit est alors apparue comme une piste intéressante à explorer.

Je propose dans mes perspectives de « revisiter » cette problématique de reconfiguration à la lueur des nouvelles approches « embarquées » développées dans le cadre des systèmes manufacturiers.

## II/ Thématique n°2 : Apport du concept d'augmentation pour les systèmes contrôlés par le produit en phase de fabrication

Cette deuxième thématique s'inscrit dans la suite logique des travaux menés depuis de nombreuses années sur les méthodes de pilotage des SAP au sein de l'équipe PSI. Après les premières études sur l'hétéarchie initiées dans (Tahon et al., 1988a ; Tahon et al., 1988b), le concept a été approfondi dans le cadre de nombreux travaux décrits dans (Trentesaux, 2002). Cependant dans l'ensemble des travaux précédents, seules les ressources étaient considérées comme des entités décisionnelles. Nous avons proposé d'aborder le pilotage selon un autre point de vue en considérant que le flux de produits pouvait également jouer un rôle « actif » dans le processus décisionnel.

### II-1/ Contexte et problématique

Les travaux ci-après ont été en partie réalisés dans le cadre du projet exploratoire SCP (Système Contrôlé par le Produit) du GDR Macs que j'ai co-animé avec E. Bajic du Cran. L'objectif de cette thématique était de valider le concept d'augmentation au travers de l'étude de fonctions importantes en matière de pilotage, telles que l'allocation ressource/produits et le routage au sein d'un SAP. Nous avons également attaché beaucoup d'importance à implémenter l'approche sur un système réel et à valider le concept autrement que par des simulations. En effet, en accord avec (Leitão, 2009) et (Trentesaux, 2009), nous considérons qu'un des freins à l'essaimage de ces approches dans le monde industriel est dû au manque d'implémentations sur site réel.

### II-2/ Application du concept d'augmentation dans le domaine manufacturier

Comme indiqué dans la table 1 ci-après, plusieurs fonctions ont été considérées.

Table 1. Description des fonctions étudiées en phase de fabrication

Fonctions	Description	Type	Opérationnel	Augmentation
f1	Réaliser une tâche spécifique au produit	Primaire	non	non
f2	Alerter l'utilisateur d'une défaillance	Secondaire interne	non	non
f3	Gérer l'allocation de ressources de production	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)
f4	Gérer le routage vers les ressources	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)
f5	Assurer la traçabilité en production	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)

- Les deux premières fonctions, f1 et f2, sont des fonctions internes respectivement primaire et secondaire. Par exemple, dans le cas d'un moteur, f1 et f2 peuvent être respectivement responsables de la tâche de propulsion et de la tâche d'alerter l'utilisateur en cas de défaillance. Elles ne sont pas considérées comme opérationnelles (grisées sur la figure 30) tant que le produit n'est pas arrivé à l'étape ultime de son processus de fabrication.
- Trois autres fonctions externes {f3, f4, f5} sont respectivement responsables de l'affectation des ressources, du routage des produits vers les ressources et de la traçabilité associée.

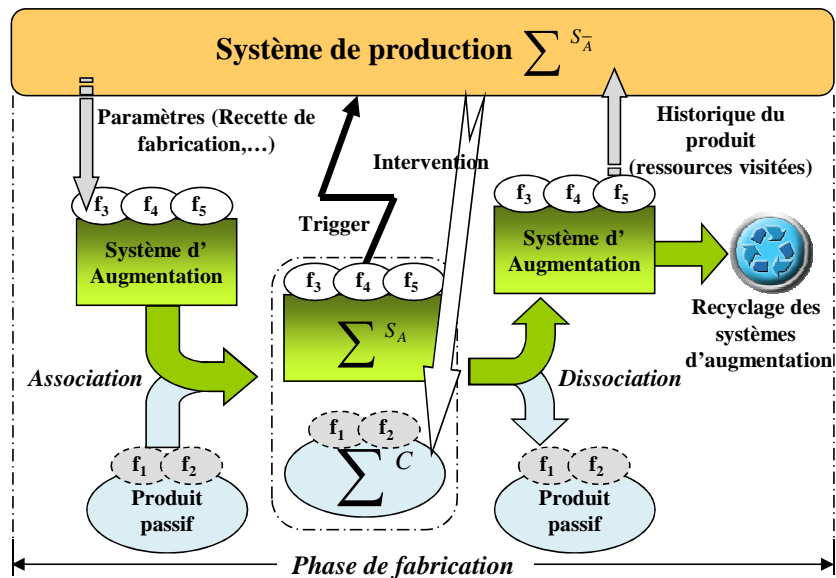


Figure 30. Système d'augmentation dans le contexte manufacturier

Contrairement aux approches classiques de pilotage dans lesquelles les fonctions secondaires sont totalement prises en charge par le système de fabrication  $\Sigma S_A^-$ , ces fonctions sont prises en charge dans notre approche par le système d'augmentation  $\Sigma S_A$  (voir figure 30). Le système d'augmentation est associé au produit « passif »  $\Sigma C$  au début de la phase de fabrication, afin de le transformer en un produit « actif ». Ce dernier est considéré comme un consommateur, avec une liste de services (transformation, transport, stockage) à obtenir auprès des ressources dans le système de fabrication. Dans le cadre de nos travaux, nous avons considérés qu'une telle liste peut être fournie par un système de planification de type ERP. Le système d'augmentation  $\Sigma S_A$  est alors configuré avec les données nécessaires (par exemple, la gamme de fabrication). Lorsque le produit est en phase finale de fabrication, il est dissocié du système d'augmentation. Ce dernier peut alors être recyclé et utilisé pour d'autres produits. Les données enregistrées par la fonction f5 (par exemple, la liste des ressources visitées, les temps de routage, les temps de traitement des ressources) sont envoyés au système de fabrication  $\Sigma S_A^-$ .

La section suivante décrit l'instrumentation utilisée pour supporter notre démarche.

### II-3/ Instrumentation utilisée pour les expérimentations

Des expérimentations réelles ont été effectuées au sein de la cellule flexible de production valencienne du pôle AIP-PRIMECA Nord-Pas de Calais et une instrumentation adéquate du produit et de son environnement a dû être réalisée.

Afin de pouvoir supporter différents mécanismes d'interaction, le système d'augmentation doit être suffisamment ouvert et flexible. Les approches habituelles utilisent des agents, situés sur un système informatique « distant », afin de gérer l'activité associée au produit (McFarlane et al., 2002). La synchronisation entre l'agent distant et le produit réel est généralement réalisée au moyen d'une étiquette Rfid. Cette solution de mise en œuvre « distante » conduit à des solutions moins coûteuses, mais présente un certain nombre de limites :

- Le système central « distant » qui gère les produits actifs doit être capable d'absorber un nombre croissant d'entités (problème d'augmentation d'échelle).
- L'élément central et les liens informationnels vers les produits sont vulnérables à l'occurrence de défaillance, avec un risque majeur de perte des informations de synchronisation.

Pour éviter ces limitations, nous nous sommes orientés vers une solution embarquée pour mettre en œuvre le système d'augmentation. Deux types d'équipements ont été principalement utilisés :

- Instrumentation du produit : Les capacités décisionnelles associées au système d'augmentation ont été fournies par l'intermédiaire d'un eeePC embarqué (avec moyens de communication infrarouge

IrDA). Cet eeePc n'a pas été physiquement lié au produit, mais à la plaque qui supporte le produit pendant le processus de fabrication (voir figure 31). Cet équipement fournit la puissance de traitement nécessaire, et rend possible l'élaboration d'interfaces graphiques permettant le suivi du processus de fabrication. Bien évidemment l'instrumentation actuelle doit être vue comme un premier prototype, utilisée pour valider notre concept d'augmentation. Des solutions plus intégrées seront envisagées dans le cadre de la réalisation d'un « support de pièces » intelligent.

- **Instrumentation de l'infrastructure** : Chaque nœud de routage (c'est-à-dire l'endroit où le produit actif prend sa décision) et chaque ressource ont été équipés d'un contrôleur Wago 750-841. Une interface intégrée Ethernet a permis les interactions de nœud à nœud. Cependant, le produit ne pouvant utiliser directement la technologie Ethernet, il doit être connecté au réseau via une communication IrDA à chaque nœud de routage.



Figure 31. Implémentation d'un produit « actif »

**Remarque** : De plus amples détails sur cette instrumentation sont disponibles dans (Berger et al., 2010). De récents développements (Pach et al., 2012a) ont également permis aux produits « actifs » de communiquer directement en Wifi. Cette amélioration autorise l'implémentation de nouveaux mécanismes tels que des champs répulsifs entre produits (afin d'éviter que plusieurs produits concurrents ne se dirigent vers la même ressource).

#### II-4/ Travaux réalisés

Les expérimentations ont permis d'évaluer différents mécanismes d'interaction entre produits « actifs » afin de supporter les deux fonctions, f3 et f4. Les systèmes étudiés (produits en phase de fabrication) étaient de type ATO, non décomposables.

- Dans la première mise en œuvre (Sallez et al., 2009a), le produit gérait son avancement dans la gamme opératoire et sollicitait le système de soutien qui supportait le processus décisionnel d'allocation. Le produit assurait son routage dans la cellule en utilisant un mécanisme de stigmergie permettant l'échange indirect d'informations entre produits (via l'environnement). Pour le routage, le système de soutien n'était donc pas sollicité.

Vis-à-vis de notre cadre d'analyse, ces fonctions sont répertoriées comme suit :

f3 (allocation) : [F, Classe 2, [ATO, NUL, EMB]]

f4 (routage) : [F, Classe 4, [ATO, SLA, EMB]]

- Dans (Sallez et al., 2010b), le processus d'attribution et le processus de routage ont été respectivement pris en charge par un protocole contract-net traditionnel (Smith, 1980) et un algorithme de Dijkstra embarqué (Dijkstra, 1959), déterminant le chemin optimal en temps de parcours vers la ressource choisie. Les temps de parcours mesurés par chaque produit étaient réutilisés pour mettre à jour le graphe utilisé par l'algorithme de Dijkstra.

Vis-à-vis de notre cadre d'analyse, ces fonctions sont répertoriées comme suit :

f3 (allocation) : [F, Classe 3, [ATO, NUL, EMB]]

f4 (routage) : [F, Classe 4, [ATO, SLA, EMB]] (les produits s'auto-suffisent en utilisant un algorithme de Dijkstra avec mise à jour dynamique des temps de routage)

- Dans (Zbib et al., 2012), les deux fonctions exploitent le même mécanisme d'interaction, basé sur les champs potentiels. Ces fonctions sont de classe 3 car elles exploitent les champs de potentiel émis par les ressources faisant partie du système de soutien.

Vis-à-vis de notre cadre d'analyse, ces fonctions sont répertoriées comme suit :

f3 (allocation) : [F, Classe 3, [ATO, NUL, EMB]]

f4 (routage) : [F, Classe 3, [ATO, SLA, EMB]] (échange des temps de routage)

D'autres travaux (Adam et al., 2011) ont permis de mettre en place des relations d'autorité variable entre produits actifs. La notion de rôle a été utilisée pour supporter un mécanisme de répartition dynamique des services à réaliser entre plusieurs produits. Un produit « actif », incapable d'obtenir sa liste de services dans le temps alloué suite à une défaillance, peut déléguer une partie de sa tâche à un autre produit. Ce type de mécanisme permet d'instiller plus de flexibilité au sein du processus de production. La délégation se fait par appel d'offre entre produits « actifs » et un lien de maître-esclave s'instaure entre le produit ayant lancé le processus de délégation et celui sélectionné. Vis-à-vis de notre cadre d'analyse, cette fonction est de type [F, Classe 4, [ATO, LAV, EMB]].

## II-5/ Résultats obtenus

Au cours des expérimentations, plusieurs scénarios ont mis en évidence les différentes capacités de notre approche à s'adapter aux perturbations (maintenance curative des ressources, ralentissements ou blocages du système de transport, introduction d'ordres de fabrication urgents et / ou annulation, re-fabrication de produits après avoir échoué à un contrôle de qualité). Les principaux avantages sont les suivants:

- (1) Réactivité et robustesse : La prise locale de décisions (sans aucun contrôle centralisé) rend le système plus réactif et plus robuste face aux perturbations. Pour la fonction d'allocation f3, la capacité à gérer les ressources pour faire face à des perturbations (pannes, opérations de maintenance...) a été démontrée dans (Sallez et al., 2010b ; Zbib et al., 2012).

La figure 32 suivante illustre la modification de trajectoire d'un produit « actif » en cas d'indisponibilité d'une ressource (dans notre exemple, le robot #1). Dans le cas d'une allocation statique, le produit aurait été bloqué par l'indisponibilité de la ressource. Le produit « actif » gérant dynamiquement l'allocation des ressources, il choisit de se diriger vers le robot2 et s'adapte ainsi à la perturbation.

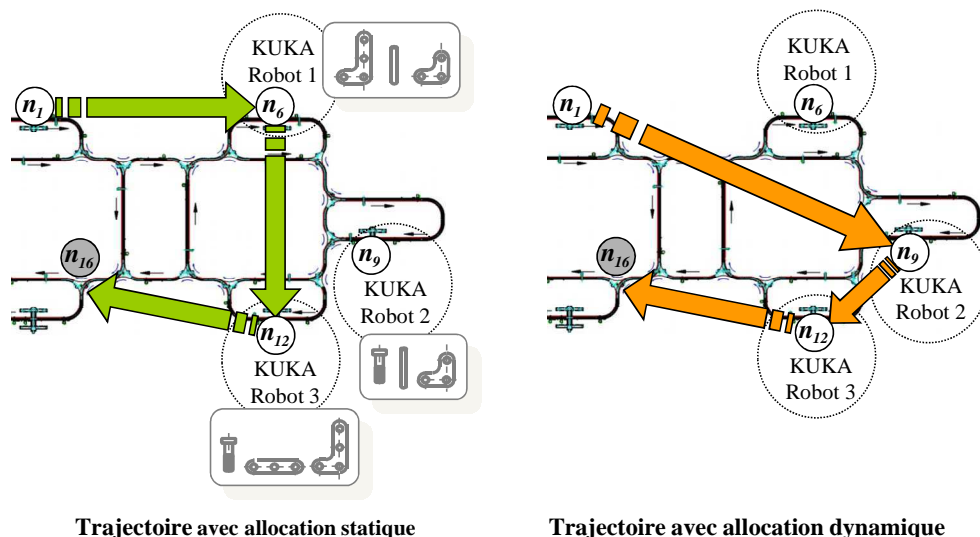


Figure 32. Changement de trajectoire en cas d'indisponibilité d'une ressource

- (2) Efficacité du routage : L'efficacité de la fonction de routage f4 a été également prouvée dans la (Sallez et al., 2010b ; Zbib, 2010). Contrairement aux produits passifs, qui prennent toujours le même chemin, le produit « actif » est capable de s'adapter à la perturbation et de trouver une trajectoire alternative efficace. Le dialogue entre les produits actifs permet un routage dynamique améliorant la réactivité du système face à des perturbations de routage.

L'approche utilisant le protocole Contract-Net (pour l'allocation) couplé avec un algorithme Dijkstra (pour le routage) a été comparée à celle exploitant les champs de potentiels. Pour notre cas d'étude spécifique, les expériences menées dans (Zbib et al., 2012) ont montré que les champs potentiels permettent une réduction d'environ 10% de la durée totale de production.

D'autres expériences (Pach et al., 2012b) ont montré que les performances de l'approche « champs de potentiels » s'écartaient d'environ 15% des performances optimales obtenues par une approche de type MILP. La table 2 ci-après résume les résultats obtenus lors de ces expérimentations.

Table 2. Comparaison des résultats obtenus par l'approche MILP et par l'approche « champs de potentiels »

Instances	MILP		Champs de potentiel	
	Cmax (sec)	Temps execution (sec)	Cmax (sec)	Ecart
4 jobs	329	3.64	371	12.77%
8 jobs	576	18277	662	14.93%
12 jobs	709*	53433	757*	6.77%

\* solution relaxée (pas de limitation de job, pas de règle FIFO)

Afin de conforter nos résultats, des comparaisons plus poussées avec d'autres approches de pilotage devront être menées. A cet effet, de façon à pouvoir évaluer les approches, notre équipe en collaboration avec le professeur P. Leitão de l'Université de Bragança a proposé un benchmark utilisant la cellule de production de l'AIP Nord-Pas de Calais à Valenciennes (Trentesaux et al., 2013).

Une partie importante de mes perspectives de Recherche est consacrée à la continuation de ces travaux et notamment à l'étude de systèmes de production auto-organisés.

### III / Thématique n°3 : Apport du concept d'augmentation en phase d'usage pour des applications de diagnostic de systèmes complexes

Cette thématique a été abordée plus récemment au niveau de nos travaux de Recherche. Elle nous a permis d'étudier un système « actif » en phase d'usage et de valider la décomposition holonique d'un produit augmenté, introduite dans notre cadre d'analyse. Contrairement aux thématiques précédentes dans lesquelles le produit était considéré comme atomique, l'activité associée au produit résulte ici d'un ensemble d'activités récursives.

#### III-1/ Contexte et problématique

L'une des voies les plus prometteuses pour l'utilisation de produits intelligents concerne la maintenance prédictive de systèmes complexes en phase d'usage (Meyer et al., 2009; Främling et al., 2011). Appliqués dans le cadre du transport ferroviaire, nos travaux visent l'amélioration de la disponibilité des matériels roulants. Ce critère de performance est un facteur majeur de compétitivité pour les exploitants, telle que la SNCF. Dans ce contexte, le projet FUI SURFER (SURveillance active FERroviaire), lancé en juin 2010, a pour objectif d'étudier, développer et mettre au point en situation réelle les fonctions suivantes :

- Surveillance, diagnostic de pannes et diagnostic prédictif embarqué,
- Fiabilisation du matériel roulant par une aide à la maintenance prédictive,
- Optimisation dynamique des plans de maintenance tenant compte de l'état des équipements surveillés sur l'ensemble d'une flotte.

Ce projet est piloté par la société Bombardier Transport et compte comme partenaires l'équipe TEMPO/PSI, l'IFFSTAR et deux PME valenciennoises (Prosynt et Hiolle Industries). La problématique principale est de passer d'une approche de surveillance centralisée à une approche de surveillance «active» décentralisée, reposant sur l'utilisation d'un collectif de systèmes d'augmentation. Les travaux donnent lieu à l'encadrement de deux thèses. L'une porte spécifiquement sur l'étude des architectures et des méthodes de diagnostic. L'autre est plus dédiée à l'étude comparative d'architectures de diagnostic (granularité de l'augmentation) d'un point de vue sûreté de fonctionnement.



### III-2/ Application du concept d'augmentation en phase d'usage pour le diagnostic de systèmes complexes

Contrairement à la forme traditionnelle de maintenance, dans laquelle les fonctions secondaires sont totalement prises en charge par le système de maintenance, l'approche proposée vise un traitement des données (par exemple, les variables mesurées) et un diagnostic au plus proche de l'équipement considéré.

Notre approche repose sur un certain nombre d'hypothèses:

- Un système complexe mobile est supposé être décomposable, à travers sa structure hiérarchique, en un ensemble de sous-systèmes interconnectés composés de parties physiques et informationnelles (par exemple: l'accès voyageurs, la climatisation...).
- Chaque sous-système est supposé disposer de son propre contexte, qui peut être soit physique (par exemple, température, vibrations) ou informationnel (par exemple, mode de fonctionnement, temps d'utilisation du système). Ce contexte est pris en compte à chaque niveau de la structure hiérarchique.
- Conformément à la structure hiérarchique du système complexe, le diagnostic est effectué en utilisant des structures de diagnostic décentralisées récursives.
- La précision du diagnostic est étroitement liée à la qualité des observations réalisées sur le système, de sorte que le diagnostic doit être exécuté au plus près possible de chaque sous-système.

La table 3 ci-après résume les fonctions envisagées pour une application de surveillance / diagnostic d'un système complexe.

Table 3. Description des fonctions étudiées dans le cadre du diagnostic

Fonctions	Description	Type	Opérationnel	Augmentation
f1	Réaliser une tâche spécifique au produit	Primaire	oui	non
f2	Enregistrer les défaillances dans un historique	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)
f3	Réaliser un diagnostic des défaillances	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)

- La fonction primaire f1 est relative à la tâche à accomplir et dépend du système complexe étudié (par exemple: ouverture/fermeture des portes permettant l'accès des passagers dans un véhicule de transport ferroviaire).
- Deux fonctions externes secondaires {f2, f3} sont respectivement responsables de l'historisation des défauts et du diagnostic avancé des défaillances.

### III-3/ Travaux réalisés

Nos travaux ont principalement porté sur deux thèmes :

- la définition d'une architecture permettant de supporter des structures de diagnostic récursives,
- la méthode utilisée pour réaliser le diagnostic.

#### III-3-1/ Architecture associée à la fonction diagnostic

Comme proposé dans le modèle présenté dans le chapitre 2, un modèle d'architecture holonique est utilisé pour supporter les structures de diagnostic récursives associées à la fonction f3. Comme le montre la figure 33, un système  $S_i$  est décomposé en une cascade de sous-systèmes  $S_{ij}$ . A chaque niveau de la décomposition, un système  $S_i$  plongé dans son contexte  $C_i$  est diagnostiqué au moyen d'une méthode de diagnostic  $f_i$ . Un holon  $H_i$  est alors associé à chaque triplet  $(S_i, C_i, f_i)$ .

#### III-3-2/ Méthode utilisée pour le diagnostic

Le principe de l'approche de diagnostic utilisée est illustré par la figure 34. Deux cas peuvent être distingués lorsque le holon  $H_i$  exécute la méthode  $f_i$  de diagnostic de pannes, en raison de l'architecture holonique utilisée:

- Le holon utilise un système de surveillance non-intrusif des signaux échangés entre l'équipement et son contrôleur (bloc 1). Les signaux observés sont comparés à ceux générés par une exécution en temps réel d'un modèle comportemental de l'équipement surveillé. En cas de discordance (sortie du bloc 2 notée  $e_i$ ), une phase de diagnostic est déclenchée (bloc 3).  $D_i$  est le résultat du diagnostic consistant en un ensemble de discordances accompagné d'une liste de composants suspects.
- Le holon reçoit les diagnostics des autres holons de niveau  $i-1$  ( $D_{i-1}$ ).

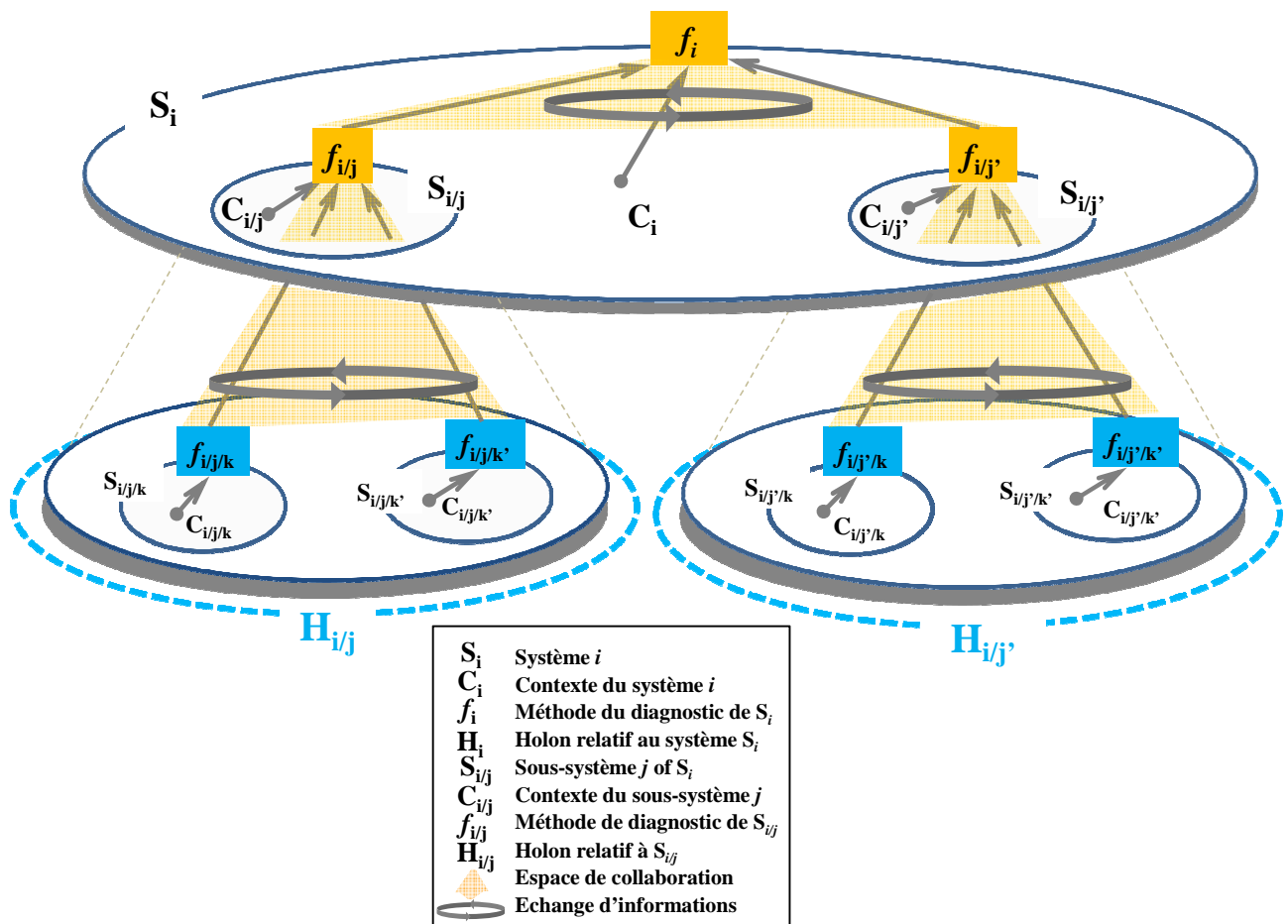


Figure 33. Structure supportant l'approche réursive de diagnostic

Le processus d'analyse du contexte (bloc 4 de la figure 34) est l'un des aspects novateurs de notre proposition. En cas d'apparition de  $\epsilon_i$  ou  $Di^*$ , le holon analyse le contexte du système et via les échanges avec les autres holons de même niveau, élabore un contexte enrichi, utile pour affiner les résultats du diagnostic. Si le contexte enrichi explique  $Di^*$  ou  $\epsilon_i$ , le diagnostic résultant au niveau  $i$  ( $Di$ ) est inhibé pour éviter une fausse alarme. Si le contexte enrichi au niveau du système  $i$  ne fournit pas d'explication plausible, les résultats du diagnostic sont envoyés au niveau  $i + 1$ .

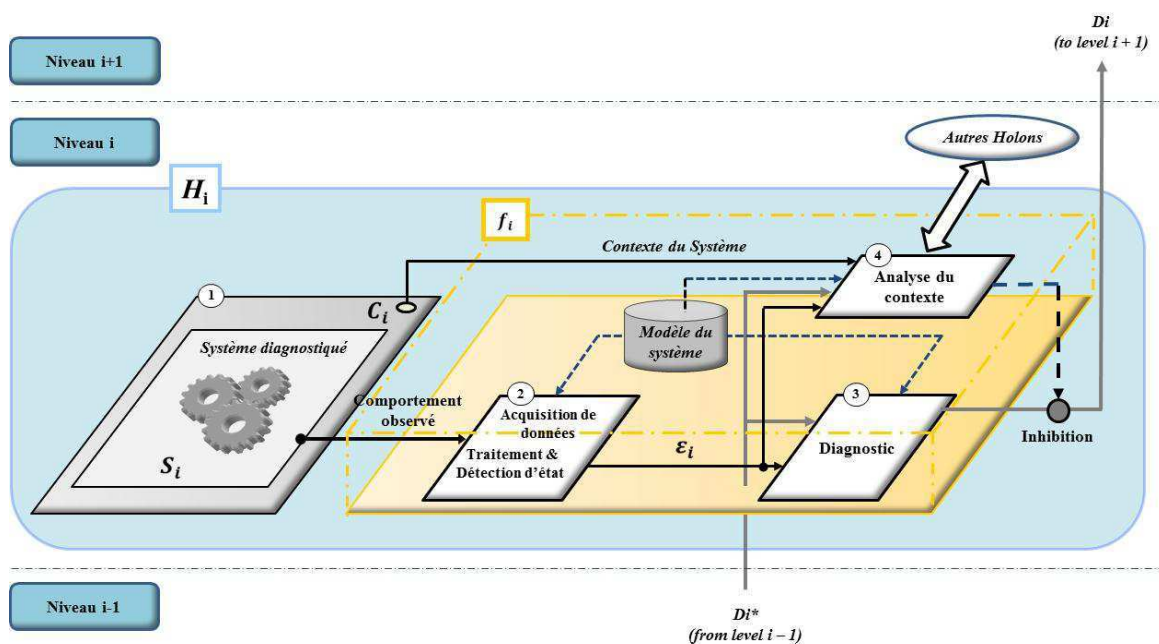


Figure 34. Approche de diagnostic utilisée

Positionnement vis-à-vis de notre cadre d'analyse : Le collectif de systèmes d'augmentation réalisant la fonction de diagnostic est décrit de la façon suivante : [U, Classe 3, [MOL, NUL, EMB], [MOL, SLA, EMB], [ATO, SLA, EMB]] (dans le cas où 3 niveaux sont considérés : train, véhicule et porte).

### III-4/ Résultats obtenus

Une plateforme baptisée PEMAS (Plateforme Expérimentale Multi-Agents SURFER) a été développée pour valider le concept de surveillance active proposé. Construite à l'aide de l'outil de développement multi-agents Jade, elle nous a permis de :

- tester les différentes configurations correspondant aux différentes architectures d'augmentation (mapping des fonctions de surveillance et le diagnostic sur les différents systèmes matériels),
- valider les algorithmes des holons, qui supportent les différentes couches du diagnostic récursif,
- évaluer la pertinence et la fiabilité des diagnostics obtenus à partir de la coopération de plusieurs holons.

Une implémentation partielle a également été réalisée dans des trains en exploitation réelle. Des systèmes embarqués enregistrent les signaux de train en permanence ainsi que des informations sur le contexte d'exploitation. Ces informations sont consignées dans des journaux et transmises vers le centre de maintenance au sol. Un algorithme, utilisant une approche par modèle mais n'exploitant pas une structure récursive de diagnostic, élabore ensuite la liste des composants suspects.

La table 4 compare les performances de trois approches. La première correspond au système classique ORBITA utilisé chez Bombardier Transport (Orbita, 2006) exploitant uniquement des signaux d'alarmes. La deuxième et la troisième correspondent à des analyses des journaux transmis au sol, effectuées respectivement sans et avec l'assistance d'un algorithme de diagnostic

Table 4. Analyse de temps et taux de réussite pour les différentes approches utilisées au sol

Approche utilisée	Temps d'analyse	Taux de réussite
Approche classique Orbita	1 heure à plus de 6 heures	80 %
Analyse humaine des journaux	4 à 6 heures	95 %
Analyse avec algorithme de diagnostic	30 minutes à 1 heure	95 %

Bien que notre approche ne soit pas entièrement implémentée (non prise en compte des différents niveaux de contexte et des échanges inter-holons), les premiers résultats s'avèrent très prometteurs. Les principaux résultats de ces travaux sont disponibles dans (Sallez et al., 2011 ; Le Mortellec et al., 2012 ; Le Mortellec et al., 2013).

La poursuite de ces travaux vise principalement la prise en compte de la maintenance prédictive. De manière complémentaire au diagnostic de défaillances déjà réalisé, une analyse approfondie de la dérive de certains signaux sera réalisée. Ces travaux seront poursuivis à l'avenir par un collègue récemment recruté dans l'équipe PSI et ne rentrent donc pas directement dans mes perspectives de Recherche.

## IV/ Thématique n°4 : Apport du concept d'augmentation en phase d'usage pour des applications de routage en milieu urbain

Cette thématique regroupe des travaux réalisés pour une part lors d'un projet PPF avec des partenaires régionaux et d'autre part dans le cadre d'une cotutelle de thèse avec l'Université Américaine du Caire. Ils nous ont permis de tester la généricité du concept d'augmentation dans un cadre applicatif différent de celui des systèmes de production et dans une autre phase du cycle de vie d'un produit. Ils nous ont également permis d'étudier des collectifs de classe 4 et de proposer une approche de pilotage de tels collectifs.

### IV-1/ Contexte général et problématique

Au niveau international, de nombreux projets ont vu le jour pour développer des approches permettant de fluidifier le trafic routier (Fremont, 2006; Froetscher & Boehm, 2006) et de promouvoir de nouveaux moyens de transport à base de cyber-véhicules (Parent & Gallais, 2002), (Cybermove, 2004). La figure 35 ci-après illustre les deux types de cyber-véhicules considérés : PRT (Personal Rapid Transit) (Buchanan et al., 2005) et Cybercars (Parent & De La Fortelle, 2005).



Personal Rapid Transit



Cybercar

Figure 35. Exemples de cyber-véhicules

Que ce soit dans le cadre de véhicules classiques avec conducteur ou de cyber-véhicules, des systèmes d'aide à la navigation (intégrant des informations de trafic) doivent être développés pour permettre de réorganiser dynamiquement les itinéraires en cas de perturbation. L'aide à la navigation nécessite la prise en compte des trois fonctions suivantes :

- mesure du trafic et détection des perturbations,
- agrégation des données de trafic de façon à élaborer un état du trafic,
- diffusion des informations de trafic.

Plusieurs approches, centralisée, semi-distribuée ou totalement distribuée sont envisageables selon la répartition de ces fonctions entre les véhicules et le centre de gestion du trafic, vu comme un système de soutien. La troisième approche (totalement distribuée) repose sur la prise en charge des trois fonctions au sein du véhicule. Chaque véhicule est un capteur et/ou un consommateur de données de trafic. L'information est échangée directement entre les véhicules via des communications sans-fil. L'infrastructure ne jouant plus aucun rôle, une telle approche peut être qualifiée d'auto-organisée. Les travaux réalisés au sein de l'équipe PSI se sont focalisés sur ce type d'approche.

#### IV-2/ Application du concept d'augmentation pour l'aide à la navigation

Le véhicule (automatisé ou non) est vu comme un système cible en phase d'usage et le système d'augmentation prend en charge les fonctions d'aide à la navigation. La table 5 ci-après reprend les trois fonctions secondaires (f2, f3, f4) évoquées dans la problématique.

Table 5. Description des fonctions étudiées pour l'aide à la navigation

Fonctions	Description	Type	Opérationnel	Augmentation
f1	Assurer le déplacement	Primaire	oui	non
f2	Mesurer les conditions locales de trafic	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)
f3	Construire un état du trafic (Agrégation)	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)
f4	Diffuser l'état du trafic	Secondaire externe	oui	oui (embarqué)

Positionnement dans la cadre d'analyse : Vis-à-vis de notre cadre d'analyse, les fonctions d'aide à la navigation sont de type

f2 et f4 : [U, Classe 4, [ATO, SLA, EMB]]

f3 : [U, Classe 4, [ATO, NUL, EMB]]

Le véhicule est considéré comme atomique au regard de la fonction d'aide à la navigation. Ne souhaitant pas dépendre d'une infrastructure de pilotage extérieure, les traitements sont embarqués. Les fonctions sont de classe 4 car elles ne nécessitent aucune information du système de gestion de trafic (vu comme le système de soutien).

#### IV-3/ Travaux réalisés

Les travaux réalisés ont abordés tant les aspects conceptuels que les aspects technologiques de l'aide à la navigation et de la communication inter-véhiculaire.

#### IV-3-1/ Approche de coopération inter-véhiculaire

Dans le cadre du projet PPF « Cœur de Ville - Véhicules intelligents en environnement urbain » (2006-2010) mené en collaboration avec les laboratoires LAGIS de Lille et LGI2A de l'Université d'Artois, nous nous sommes principalement intéressés aux problèmes de routage au sein d'une flotte de cyber-véhicules. Nos travaux ont porté sur la modélisation et la gestion des modes dégradés du réseau soumis à des perturbations d'origine variée :

- défaillance technique au niveau des ressources (panne de cyber-véhicule, problème de communication...),
- perturbations au niveau du réseau (travaux sur voie de circulation, voie bloquée suite à un accident...).

Un modèle holonique a été proposé pour représenter l'activité associée au flux de cyber-véhicules (Raileanu, 2011). Dans le cadre de ces travaux, nous avons également proposé une approche de pilotage pour un collectif d'entités auto-organisées. Nommée « Open Control », cette approche distingue un contrôle explicite (direct) des entités et un contrôle implicite (indirect via l'environnement) des entités. Les caractéristiques principales de l'approche « Open control » sont disponibles dans (Sallez et al., 2009b ; Berger et al., 2011).

#### IV-3-2/ Travaux sur les supports de communication

Ce deuxième volet des travaux s'est effectué dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe SEAD de l'Université Américaine du Caire, dirigée par le professeur H. Amer. L'objectif de ces travaux, très appliqués, était d'évaluer les différents protocoles de communication, susceptibles d'être utilisés pour supporter les communications entre les véhicules et l'infrastructure routière (type I2V).

Dans le cadre de la thèse de R. Daoud (Daoud, 2008), une analyse des protocoles de routage en WiFi et Wimax a été effectuée (avec les protocoles MIPv4 et MIPv6). Un modèle de distribution des points d'accès selon un maillage hexagonal a également été proposé à fin d'optimiser la couverture de la transmission par le réseau sans fil.

#### IV-4/ Résultats obtenus

Ne disposant pas d'un réseau réel de cyber-véhicules, les expérimentations ont été réalisées sur la cellule flexible de l'AIP à Valenciennes avec l'instrumentation décrite à la section II-3. A échelle réduite, un ensemble de shuttles est représentatif d'une flotte de PRTs. Différentes approches de navigation, exploitant des mécanismes de stigmergie ou des tables de routage et un algorithme Dijkstra embarqués, ont été testées. Elles ont mis en évidence la réactivité de la flotte de PRTs face à des perturbations. Les figures 36 et 37 ci-après illustrent la reconfiguration d'itinéraire réalisée en cas de perturbations sur un tronçon du réseau.

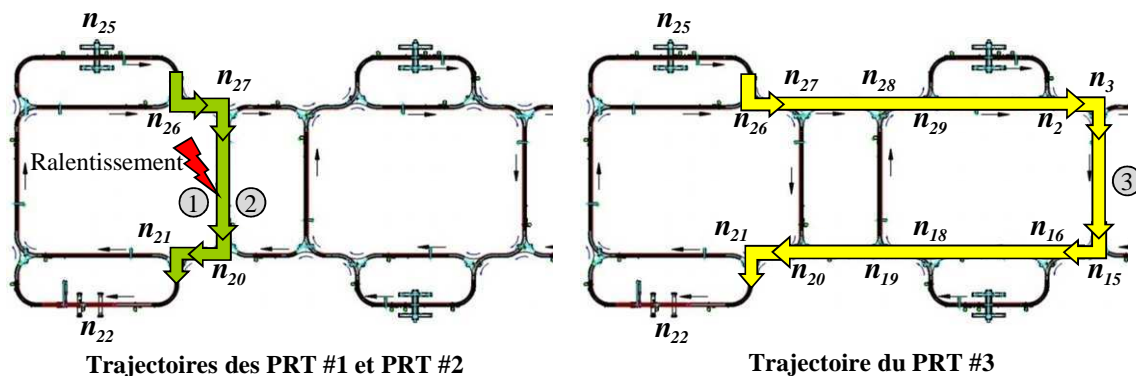


Figure 36. Reconfiguration d'itinéraire de PRT en présence de perturbation

La figure 37 montre l'évolution des temps de parcours de trois PRTs partant du nœud n<sub>25</sub> et devant atteindre le nœud n<sub>22</sub>. Le premier ne rencontre pas de difficulté alors que le second est fortement affecté par un ralentissement sur le tronçon [n<sub>27</sub>, n<sub>20</sub>]. Il en avertit les autres PRTs permettant ainsi au troisième PRT de prendre un chemin alternatif.

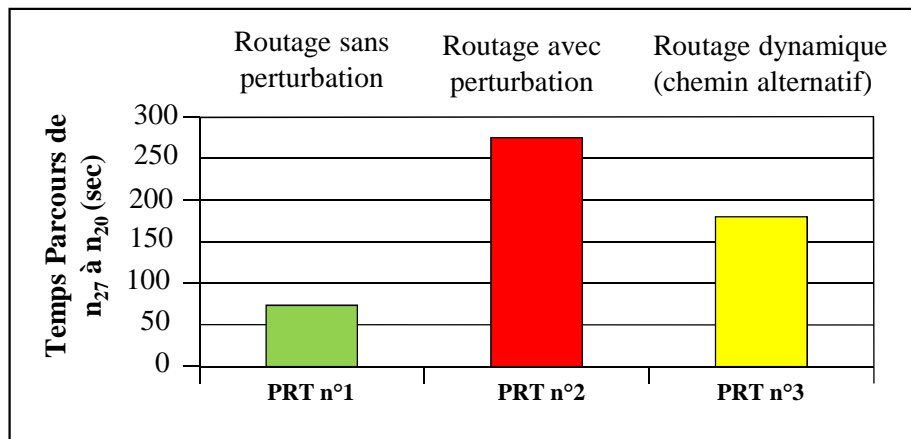


Figure 37. Evolution des temps de déplacement des PRTs

L'approche de pilotage « Open control » a également été validée : le comportement de la flotte de PRTs a été « influencé » par modification des phéromones ou des tables de routage, placées dans l'environnement. Les principaux résultats de ces travaux sont disponibles dans (Berger et al., 2011).

En coopération avec les laboratoires partenaires du projet PPF « Cœur de Ville - Véhicules intelligents en environnement urbain » (Berger et al., 2009), des simulations ont également permis d'aborder la reconfiguration d'un réseau de transport multimodal, associant bus et cyber-véhicules. L'efficacité de l'instauration d'une noria de cyber-véhicules en cas de panne d'un bus a été mise en évidence dans (Melki et al., 2010).

En ce qui concerne les protocoles de communication inter-véhiculaires, de nombreuses expérimentations ont été menées. Une analyse détaillée de la phase de hand-over a été conduite et s'est traduite par la détermination du nombre de paquets de données perdus en tenant compte de plusieurs paramètres (vitesse du véhicule, temps de transmission inter-paquets, type de protocole IP utilisé et défaillance d'un point d'accès). Ces études ont été menées, par l'intermédiaire de l'outil de simulation OpNet, et également via des expérimentations réelles sur le terrain. Elles ont prouvé qu'il était possible de remplacer l'architecture à base de WiMax, qui ne tolère pas la mobilité, pour une architecture WiFi la permettant.

Les principaux résultats de ces travaux sont disponibles dans (Daoud et al., 2006 ; Daoud et al., 2007).

## Conclusion

Au terme de la présentation de nos travaux, nous avons pu évaluer les apports du concept de produit « actif » et d'augmentation associé dans le cadre de différents contextes applicatifs. Ces derniers s'inscrivent également dans différentes phases du cycle de vie (fabrication, usage). L'ensemble des travaux a également été positionné en utilisant le cadre d'analyse introduit dans le chapitre précédent.

Nos travaux ont également permis par leur généricité de proposer une restructuration des travaux de l'ensemble de l'équipe PSI. Nous nous orientons actuellement sur une réorganisation des thématiques de Recherche que cela soit en conception ou en pilotage / exploitation des systèmes complexes autour du concept fédérateur de produit « actif ». Les différents domaines applicatifs couramment explorés par l'équipe PSI (systèmes de production, systèmes de transport, systèmes hospitaliers) sont tous potentiellement concernés par les concepts proposés. Ce même travail de restructuration d'équipe autour du concept de produit « intelligent / actif » a déjà été opéré dans d'autres laboratoires, tel que le CRAN.



## Chapitre 5 : Perspectives de Recherche

### Introduction

Ce dernier chapitre est consacré aux thématiques de recherche sur lesquelles je compte travailler dans les prochaines années. Ces thématiques constituent un prolongement naturel de mes activités menées dans le cadre du produit « actif » et de l'intelligence distribuée.

Comme illustré par la figure 38, les travaux se dérouleront sur plusieurs horizons temporels. Ils s'articuleront autour d'une thématique principale (thématique n°1) portant sur l'intelligence distribuée et les concepts d'auto-organisation au sein des systèmes complexes. Cette thématique servira de fil conducteur à nos travaux et fournira les éléments théoriques exploitables par les autres thématiques. Ces dernières, plus appliquées, s'intéresseront au développement de méthodologies et d'outils dans le cadre :

- de la phase de conception des produits, avec la notion de maquette « active » (thématique n°3),
- de la phase de distribution, dans le contexte de l'Internet Physique pour la logistique (thématique n°4),
- de la phase de fabrication, via l'étude de systèmes d'aide à la décision intégrant une coopération Hommes-Produits « actifs » (thématique n°5).

Une vision plus transversale aux différents cycles de vie sera également abordée au travers de la thématique n°2, consacré à l'apport du concept de produit « actif » pour le closed-loop PLM.

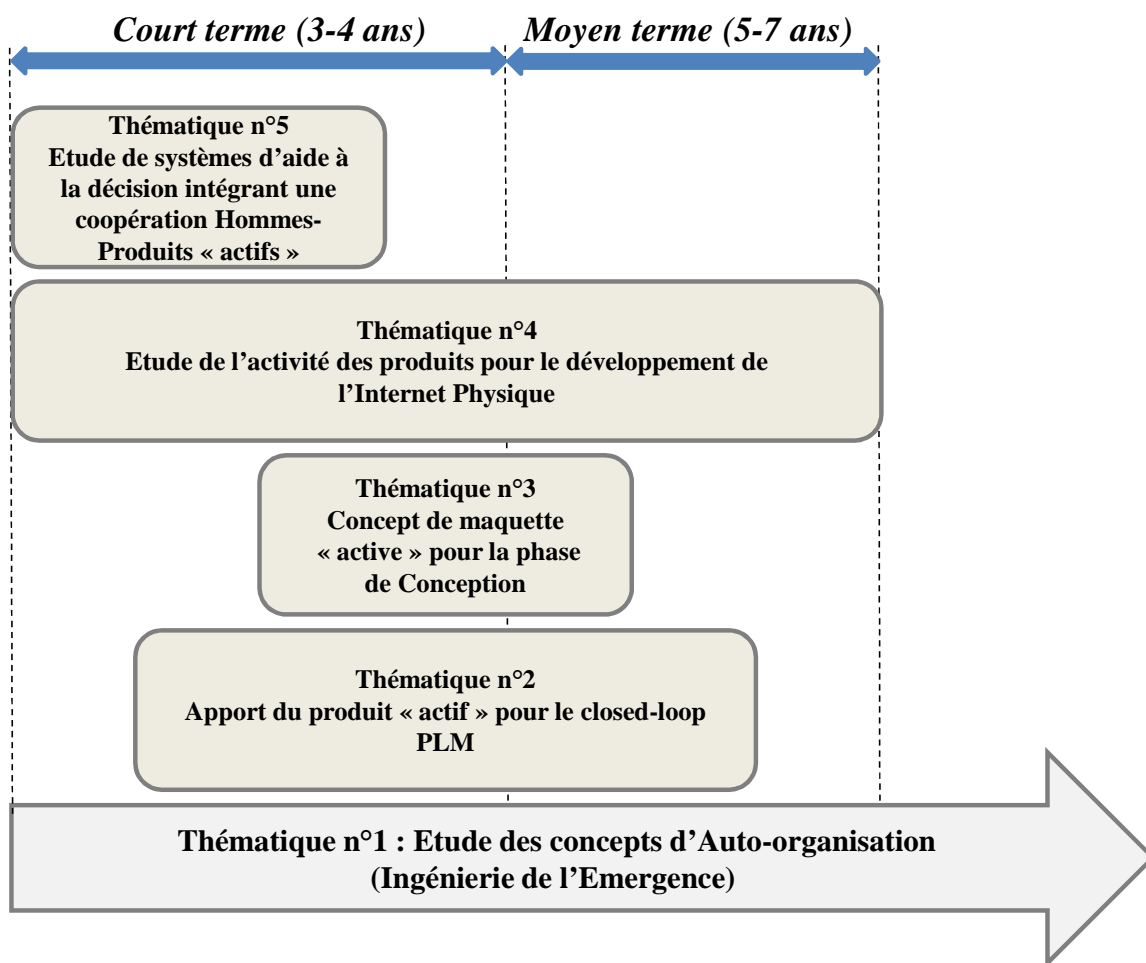


Figure 38. Positionnement des différentes thématiques de Recherche envisagées



## **I/ Thématique n°1 : Etude des concepts d'auto-organisation**

Cette thématique s'inscrit dans la continuation des travaux entrepris par l'équipe PSI dans le domaine du pilotage de systèmes complexes. Elle vise également à fournir un ensemble de modèles et de concepts exploitables par les autres thématiques plus appliquées.

### **I-1/ Contexte / Problématique**

La thématique envisagée adressera certaines problématiques soulevées par le rapport du comité des experts « Automatique » (Abou-Kandil et al. 2006) et les récents documents prospectifs du GDR Macs (Grabot, 2011 ; Lamnabhi-Lagarrigue, 2011). Ces rapports mettent en avant l'intérêt d'apporter des solutions au problème de la collaboration au sein d'un collectif formé d'entités indépendantes œuvrant à l'atteinte d'un objectif commun. Le rapport prospectif STP (Grabot, 2011) met notamment l'accent dans le domaine de la production sur la nécessité de « *passer d'une production « descendante » à une production « remontante », il s'agit ici de passer de techniques d'organisation centralisée à des techniques d'auto-synchronisation d'éléments autonomes au moyen des techniques d'intelligence distribuée* ».

La problématique principale est d'assurer une performance globale du système complexe (systèmes flexible de production, chaîne logistique, système de transport) alors que chaque entité prend des décisions individuelles. Ces dernières assurent à l'entité une grande adaptabilité et une bonne robustesse face aux perturbations (internes et / ou externes au système). Cependant ces performances individuelles peuvent être en contradiction avec le niveau de performance globale désiré. En effet, les entités ont une visibilité spatiale et / ou temporelle réduite, d'où découle un comportement dit « myopique » du système (Zambrano Rey et al., 2011). Il s'avère donc nécessaire d'envisager des approches de pilotage permettant d'atteindre une performance globale satisfaisante tout en laissant une certaine autonomie aux entités.

### **I-2/ Directions de recherche proposées**

Les voies de recherche proposées ci-après s'appuieront sur le concept d'Open-Control appliqué au pilotage de systèmes complexes (Sallez et al., 2009b). Ce concept propose de coupler un pilotage explicite des entités avec un pilotage plus implicite (via leur environnement). Elles exploiteront et prolongeront aussi les résultats de Recherche menés actuellement au sein de l'équipe PSI sur la maîtrise de la myopie (Zambrano Rey et al., 2012 ; Pach et al., 2012a).

Il s'agit donc de compléter ces travaux par une approche d'ingénierie de l'Emergence associée aux systèmes auto-organisés. Dans le cadre de cette problématique, nous proposerons notamment :

- l'étude et la modélisation des phénomènes d'émergence généralement associés à l'auto-organisation des entités,
- l'étude de nouveaux mécanismes bio-inspirés (champs répulsifs, hormones...) permettant de supporter les interactions entre entités,
- l'exploration de la théorie des automates cellulaires (Wolfram, 2002) et l'étude de son applicabilité à nos cas d'étude.

Les champs applicatifs de cette thématique sont nombreux : systèmes flexibles de production, nano-usines utilisant les nanotechnologies, réseaux de transports intelligents, hubs multimodaux en logistique, systèmes hospitaliers...

Nous appliquerons également les concepts mis en exergue dans cette thématique pour l'étude de la reconfiguration des systèmes de production. Comme explicité dans le chapitre précédent, nous avons mené des travaux sur la reconfiguration des SAP en début de carrière. L'approche centralisée utilisée à l'époque comportait nombre de limitations principalement liées à la difficulté de disposer d'un état réel du SAP et à l'explosion combinatoire de cas à considérer liée au nombre d'entités. Une approche plus distribuée du problème exploitant des entités ayant un niveau d'autonomie plus important nous permettra de revisiter cette problématique.

Cette thématique nous permettra également de renforcer notre coopération avec le professeur P. Leitão de l'Université de Bragança (Leitão et al., 2012).

## **II/ Thématique n°2 : Etude de l'apport du concept de produit « actif » pour le closed-loop PLM**

Cette thématique prend ses racines des constatations faites dans le premier chapitre sur les problèmes des approches classiques en Product Lifecycle Management.

### **II-1/ Contexte / Problématique**

Les approches PLM classiques se heurtent à de nombreuses difficultés (Jun et al., 2007) :

- manque de visibilité du produit après la phase de fabrication (Shin, 2009),
- visibilité limitée des informations relatives au produit lors de la phase d'exploitation (par exemple, la méconnaissance du contexte d'utilisation),
- problèmes d'interopérabilité entre les différents systèmes d'informations traversés (Tursi et al. 2009).

Dans ce contexte, la thématique proposée vise à analyser l'apport de produits et composants « actifs/intelligents » pour réaliser un retour d'expérience efficient de la phase d'exploitation vers les phases amont de conception et de fabrication. La finalité recherchée porte sur l'optimisation des paramètres de sûreté en conception, l'optimisation des processus de fabrication basés sur ces retours d'expérience. Elle s'inscrit clairement dans la philosophie du closed-loop PLM, introduite par le projet PROMISE (PROduct lifecycle Management and Information tracking using Smart Embedded systems) (Cassina et al., 2009 ; Kiritsis, 2011). Comme expliqué dans (Jun et al., 2007), le closed-loop PLM, contrairement aux approches PLM traditionnelles, vise une diffusion plus rapide des informations entre les différentes phases du cycle de vie, via un ensemble de boucles d'informations amont ou aval. Dans le cas de la phase d'exploitation, une boucle d'informations aval permet d'améliorer la phase de démantèlement par une meilleure connaissance des conditions d'utilisation du produit. Des boucles d'informations amont permettent de remonter les problèmes rencontrés avec le produit de façon à améliorer les performances des phases de conception et de fabrication.

Les principaux verrous scientifiques liés à une utilisation efficace du retour d'expérience pour identifier les points à améliorer lors des phases de conception et de fabrication sont :

- La maîtrise de la traçabilité du produit tout au long de son cycle de vie : Afin d'identifier précisément le ou les processus à améliorer, il est indispensable de disposer d'une traçabilité du produit (et de ses composants) lors des phases de conception, de fabrication et d'exploitation. Cette traçabilité doit être « calibrée » de façon à maîtriser les coûts de suivi des produits et à se concentrer sur les informations réellement pertinentes. Il est notamment nécessaire de maîtriser la granularité d'intelligence à associer au produit et aux composants.
- La maîtrise des informations et des connaissances associées au produit au cours de son cycle de vie : Le diagnostic des processus susceptibles d'être améliorés nécessite également de disposer d'une modélisation fine des différents processus traversés par le produit ainsi que des interactions entre processus. Cette modélisation devra être « centrée Produit » de façon à disposer d'une cartographie de la succession des processus (choix en conception, opérations de transformation ou d'assemblage en fabrication) et de maîtriser les informations et connaissances associées au produit.

Des verrous technologiques liés au déploiement de l'intelligence associée au produit devront également être levés, tels que l'hétérogénéité des systèmes d'informations traversés (problèmes d'interopérabilité).

### **II-2/ Directions de recherche proposées**

Contrairement aux approches PLM classiques où le produit est vu comme une entité « passive » manipulée par les différents processus successifs, nous nous proposons d'étudier une approche dans laquelle le produit revêt un rôle « actif ». L'introduction d'intelligence au niveau du produit doit permettre :

- de capitaliser les informations nécessaires à sa traçabilité au sein des différents processus traversés,
- d'assurer un autodiagnostic précis et robuste de son état en phase d'exploitation,
- de faciliter l'interopérabilité entre systèmes d'informations via une vision « centrée Produit ».

Dans le cadre de cette thématique, nous exploiterons les apports en matière de surveillance du projet FUI SURFER (SURveillance active FERroviaire) en cours de réalisation et piloté par la société Bombardier Transport. Dans le projet SURFER, la surveillance et le diagnostic de défaillances (curatif et prédictif) sont

réalisés à l'aide de systèmes « intelligents » associés aux équipements. Les diagnostics émis par SURFER en phase d'exploitation seront exploités pour réaliser le retour d'expérience. Ce dernier s'appuiera également sur une traçabilité du produit et de ses composants au travers des processus de conception, de fabrication et d'exploitation. Les NTIC, notamment les technologies Rfid joueront un rôle prépondérant dans cette traçabilité.

De façon à mieux maîtriser les informations associées au produit, des ontologies centrées sur le Produit pourront également être proposées (Paviot et al., 2011).

La méthodologie proposée, illustrée par la figure 39, repose sur la maîtrise d'un ensemble d'étapes :

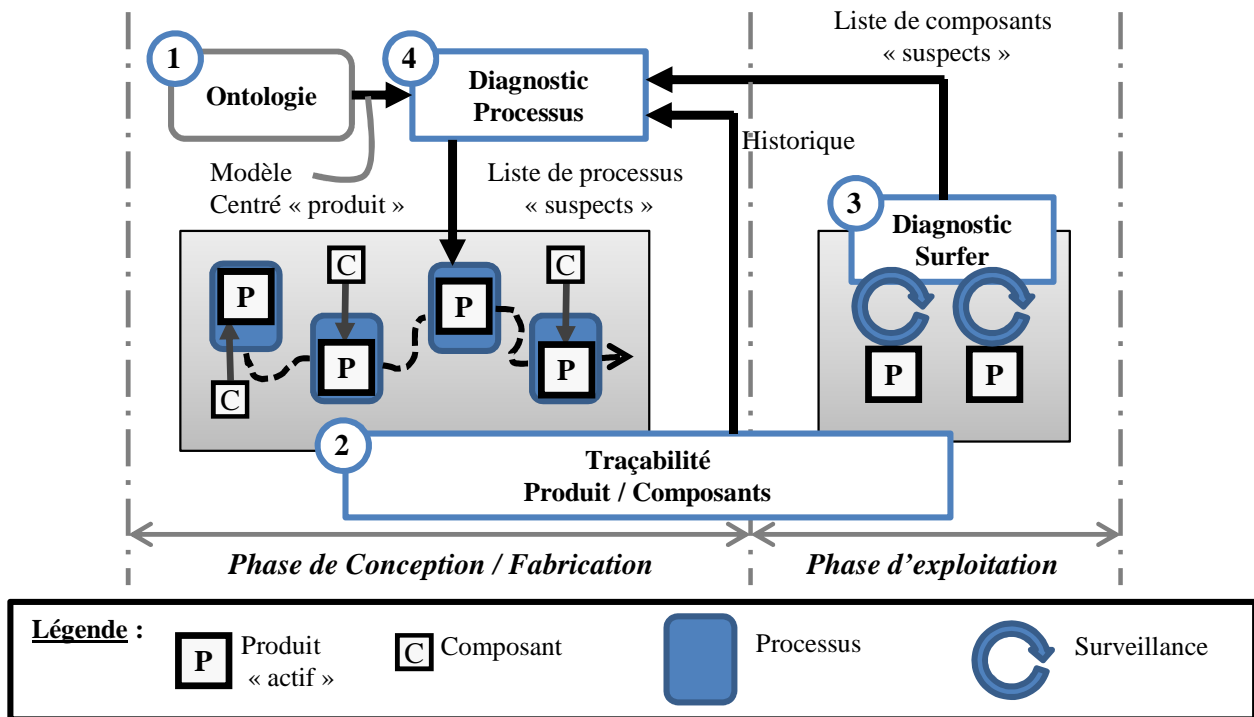


Figure 39. Descriptif de l'approche proposée

**Étape 1 :** Un modèle orienté produit à base ontologique est établi à partir d'une analyse fine des processus intervenant tout au long du cycle de vie du produit.

**Étape 2 :** Un avatar dans le monde « informationnel » est associé au produit, de manière embarquée ou distante. Le produit « actif / intelligent » enregistre les caractéristiques des différents processus traversés (par exemple : unités de montage visitées, temps de montage associés, caractéristiques de l'environnement (température ou pression) lors d'opérations de stockage ou de distribution).

**Étape 3 :** En phase d'exploitation, le produit « actif » est capable de mener à bien des diagnostics curatifs et prédictifs (projet SURFER). Un diagnostic précis et robuste permet d'incriminer tel ou tel sous-système ou composant.

**Étape 4 :** A partir de la liste des composants « suspects », de l'historique associé au produit et composants, et de l'ontologie Produit, un « diagnostic Processus » permet d'identifier les étapes de conception ou de fabrication sources des problèmes rencontrés en exploitation.

Cette thématique sera abordée dans le cadre d'une coopération avec les équipes du professeur S. Lamouri de l'Ensam Paris et du professeur K. Främpling de l'Université d'Aalto (Finlande). Elle donnera lieu à un dépôt de projet dans le cadre d'un appel d'offres du réseau CARNOT-Arts.

### **III/ Thématique n°3 : Etude du concept de maquette « active » en phase de conception**

L'objectif de cette thématique est d'étendre et de valider les concepts d'activité et d'augmentation à la phase de conception d'un produit.

#### **III-1/ Contexte / Problématique**

Lors de la conception de produits complexes, les entreprises sont de plus en plus confrontées à un accroissement des gammes de produits lié à la mass-customization ainsi qu'à un partage croissant d'informations et de composants au sein d'un même groupe ou entre partenaires. La durée de vie des produits se raccourcissant sans cesse oblige les concepteurs à accélérer les processus de développement tout en maîtrisant les coûts associés.

Dans ce contexte et selon un point de vue processus, l'objectif de la phase de conception technique est de produire une maquette digitale cohérente respectant les spécifications exigées et satisfaisant un ensemble de contraintes de manière optimale. La conception de produits complexes fait également de plus en plus appel à des outils numériques de simulation (en résistance des matériaux, en thermique, en acoustique...). Les composants modélisés sont testés en simulation pour valider les solutions retenues. Le processus de conception s'apparente souvent à une boucle alternant étapes de conception et étapes de simulation.

Pour faire face aux contraintes précédemment citées, la maîtrise du planning de conception (séquençage des différentes études, réservations des ressources adéquates) se révèle capitale. Laissée à la charge des concepteurs, de multiples retards peuvent survenir et affecter l'avancement de la maquette.

Les principaux objectifs scientifiques associés à cette thématique sont :

- le développement de nouvelles approches de conception permettant de soulager les concepteurs en prenant en charge la gestion des phases d'avancement de la maquette,
- la maîtrise de la traçabilité de la maquette tout au long de sa phase de conception : il convient d'historiser l'ensemble des événements relatifs à l'avancement de la maquette (opérations réalisées, type d'intervenants...),
- la maîtrise des problèmes d'interopérabilité pouvant survenir entre les différents processus intervenant en conception.

#### **III-2/ Directions de recherche proposées**

Nous proposons d'étendre le concept d'activité à la phase de conception de façon à ce que la maquette digitale prenne une part active dans la gestion de son planning de réalisation. Des travaux préliminaires (Malherbe et al., 2007), menés au sein de l'équipe PSI dans le cadre d'un DRT avec la société Audi, ont permis de mettre en évidence l'intérêt d'une telle approche. Dans cette étude, un composant logiciel était associé à la maquette digitale. Il pouvait solliciter l'analyse d'un expert et réserver les ressources de simulation adéquates dès que toutes les composantes impliquées dans l'étape de conception courante avaient atteint un niveau de maturité suffisant.

Les travaux envisagés visent la généralisation de cette approche pour le suivi d'un ensemble de maquettes devant se partager un nombre restreint de ressources de simulation ou d'expertise. Les avantages attendus de l'introduction du concept d'augmentation en phase de conception est de raccourcir la durée globale du processus de développement du produit, tout en assurant une parfaite traçabilité.

Cette thématique sera bien sur reliée à la thématique n°2 car elle concerne l'une des phases impliquées dans l'approche closed-loop PLM. Elle bénéficiera également des apports théoriques de la thématique n°1. Elle constituera l'occasion pour l'équipe PSI de relancer une dynamique dans le domaine de la Conception et fera l'objet d'une collaboration avec le professeur D. Deneux, qui maîtrise les aspects de conception.

## **IV/ Thématique n°4 : Etude de l'apport des produits « actifs » pour le développement de l'Internet Physique**

Cette thématique est issue de discussions avec les professeurs B. Montreuil et E. Ballot, rencontrés lors de conférences de la communauté. Outre les concepts innovants associés à l'Internet Physique, j'y vois une application très intéressante pour les produits « actifs ».

### **IV-1/ Contexte / Problématique**

La logistique de distribution associée aux objets physiques pose actuellement de nombreux problèmes tant économiques, qu'écologiques et sociétaux. De récentes études (Montreuil, 2012) ont soulevé un ensemble de « symptômes de non-durabilité » au niveau des chaînes logistiques. Les faits suivants se placent parmi les plus marquants :

- remplissage partiel des véhicules de transport et des conteneurs au point d'expédition,
- retour des véhicules ou des containers très souvent partiellement ou totalement vides à leur point de départ,
- prolifération de centres de distribution due au fait que chaque entreprise construit son propre réseau de distribution,
- grande consommation d'énergie et importante génération de gaz à effets de serre dues aux activités de la chaîne logistique,
- non adéquation de la logistique intra-urbaine,
- problèmes d'interopérabilité entre les différents acteurs de la chaîne logistique.

Dans ce contexte, le projet Internet Physique (<http://physicalinternetinitiative.org/>), initié par B. Montreuil (CIRRELT-Université Laval) et E. Ballot (Ecole des Mines de Paris), vise à améliorer l'efficacité et la « durabilité » de la chaîne logistique (Ballot et al., 2010). Il se décompose en trois objectifs :

- économique pour la rendre plus rentable;
- environnemental afin de réduire l'impact énergétique associé aux transports des marchandises,
- sociétal afin d'améliorer la qualité de vie des différents acteurs (en fabrication, en logistique et en transport).

Le projet Internet Physique propose un changement de paradigme s'inspirant de l'Internet digital. Selon la définition introduite par B. Montreuil sur le site (<http://physicalinternetinitiative.org/>) : « *L'Internet Physique est un système logistique global ouvert habilitant de façon efficace et durable la réalisation, le déploiement et la livraison des biens physiques à travers des réseaux d'approvisionnement interconnectés en exploitant un ensemble standard de protocoles collaboratifs, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligentes* ».

Ce nouveau paradigme implique notamment la refonte et la mutualisation des réseaux de logistique existants, l'adoption de containers adéquats (appelés PI-containers) ainsi qu'une automatisation poussée des nœuds / hubs intermodaux.

### **IV-2/ Directions de recherche proposées**

La notion de produit « actif » peut être un concept particulièrement adapté pour accompagner le développement de l'Internet Physique. Plusieurs thèmes porteurs sont susceptibles d'en découler :

#### **IV-2-1/ Etude et mise en œuvre de containers « actifs »**

Au niveau du transport et de l'entreposage de marchandises, l'Internet Physique exploite le principe de composition / décomposition d'un ensemble de PI-containers de différentes dimensions. De nombreuses fonctions secondaires peuvent être associées au transport et à l'entreposage de ces PI-containers :

- traçabilité,
- contrôle de l'intégrité de la marchandise (Vol, respect de la chaîne du froid, par exemple),
- contrôle du respect des règles de sécurité (vérification de la « compatibilité » des containers en cas de transport de matières dangereuses, par exemple).

Un PI-Container étant constitué d'autres PI-Containers, l'étude des différentes fonctions pourrait être abordée selon un point de vue holonique. Les fonctions secondaires supportées résulteraient des activités et des interactions des holons associés aux différents niveaux de PI-Containers.

L'implémentation des différents systèmes d'augmentation associés au PI-Containers devra également offrir le « juste » équipement de façon à offrir une solution viable économiquement. Comme illustré à la figure 40, le niveau de granularité des systèmes d'augmentation et le type de technologie utilisée devront par conséquent être particulièrement analysés.

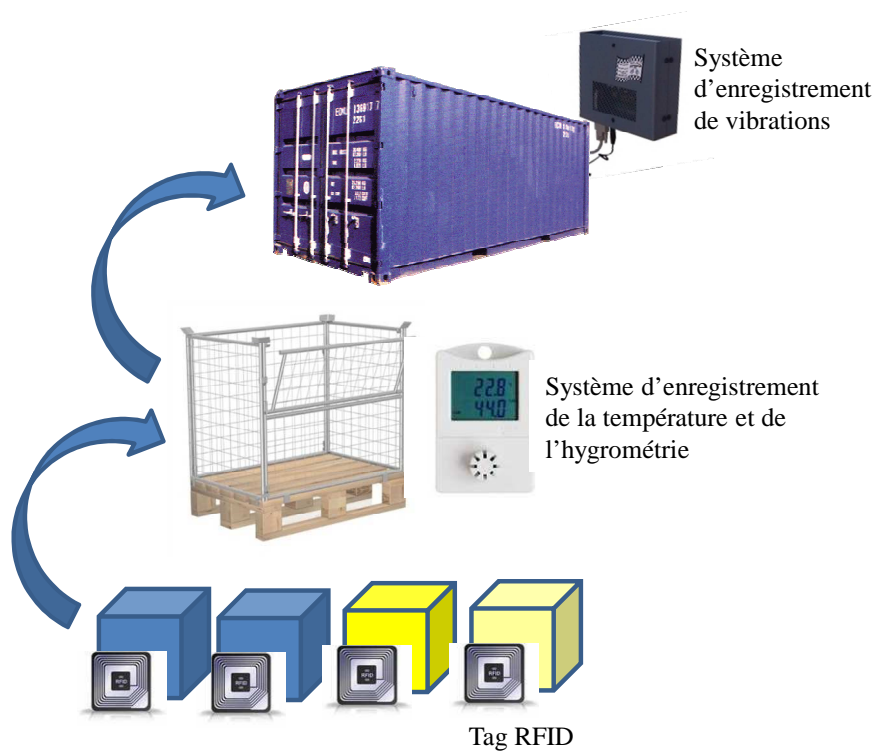


Figure 40. Implémentation des systèmes d'augmentation en distribution

#### IV-2-2/ Gestion de la logistique au sein des hubs

La viabilité de l'Internet Physique repose en grande partie sur la rapidité de traitement (composition / décomposition) des trames de PI-containers au sein des hubs intermodaux. Les différentes opérations de routage et d'entreposage des PI-containers feront appel à un niveau d'automatisation important. Le concept de routage « distribué », déjà appliqué dans le cas de routage de produits au sein d'un SAP ou de guidage de véhicules en milieu urbain, pourrait s'avérer une piste de Recherche intéressante. Par exemple, tout PI-Container équipé d'un système d'augmentation pourrait interagir avec son environnement de façon à détecter et trouver des solutions alternatives à des problèmes de blocage tel qu'un tronçon de convoyeur en panne. Ces études de routage et d'entreposage pourraient exploiter des mécanismes bio-inspirés (champs de potentiel, phéromones...) et s'inscriraient dans le contexte applicatif des travaux plus théoriques sur les concepts d'auto-organisation et d'émergence menés dans la thématique n°1.

Cette thématique fera l'objet, au niveau des concepts, d'une collaboration internationale avec les équipes à l'origine du concept d'Internet Physique : Ecoles des Mines de Paris (équipe du professeur E. Ballot) et CIRRELT-Université Laval (équipe du professeur B. Montreuil). Une coopération avec l'ESITH (Ecole Supérieure des Industries du Textile et de l'Habillement) de Casablanca (équipe du professeur A. Jamali) est également envisagée au niveau applicatif dans le cadre du nouveau port de Tanger.

## **V/ Thématique n°5 : Etude d'un système d'aide à la décision intégrant une coopération Hommes-Produits « actifs »**

Cette dernière thématique se veut la concrétisation du concept d'Hyper-Vision proposé dans (Berger et al., 2010). Dans un contexte de production manufacturière, ce concept consistait à associer aux produits « actifs » des informations pouvant être « visualisées » en temps-réel et de façon contextuelle par les différents acteurs de la production. Elle correspond également au souhait de nous attaquer au verrou V6 identifié dans le chapitre 1. Cette thématique s'est enrichie de discussions avec des collègues du LAMIH travaillant sur les interactions Homme-Machine.

### **V-1/ Contexte / Problématique**

Comme on a pu le voir précédemment, les architectures de pilotage distribué des systèmes de production offrent des structures où les entités autonomes participent de manière égalitaire aux processus de décision. Au contraire, les structures sociales au sein des entreprises continuent d'être essentiellement hiérarchiques, avec des gestionnaires de production et des opérateurs ayant des droits différents et gérant des informations différentes. De plus, dans un contexte de mass-customisation, le point de vue du client pèse de plus en plus dans les prises de décision en ajoutant de nouvelles contraintes.

L'intégration des différents points de vue (clients, opérateurs, gestionnaires de production ou de maintenance) au sein des architectures de pilotage distribuées est un défi intéressant. Il s'agit en effet de concilier des points de vues différents et parfois contradictoires. Les opérateurs ont une vue « temps réel » du système de production et leurs décisions ont une portée à court terme, permettant de faire face à des perturbations locales. Les gestionnaires, au contraire, ont une vision plus large et ne sont donc préoccupés que par l'efficacité à long terme du système de production.

### **V-2/ Directions de recherche proposées**

Le cadre holonique pourrait être utilisé pour supporter des structures de pilotage semi-hétérarchiques aptes à prendre en compte les multiples critères et les différents rôles sociaux associés au sein du système de production. L'approche holonique visera à équilibrer les informations issues du système, les points de vue des différents gestionnaires et l'expertise des opérateurs. Toutes les décisions seraient organisées autour du produit « actif », considéré comme le dénominateur commun entre les différents points de vue : celui du client, ceux des gestionnaires, ceux des opérateurs, etc. L'approche holonique permettrait de définir un cadre conceptuel innovant composé d'holons « humains » et d'holons « techniques » (entités autonomes et coopératives : Holons Produit, Holons Ressources, Holons Stocks, etc), conduisant à une synergie des différents points de vue.

Les holons « humains » pourraient alors interagir avec les holons « techniques » de façon à faciliter les prises de décisions complexes. Les techniques de reconnaissance des formes, d'apprentissage et d'optimisation collaborative sont quelques-unes des solutions qui pourraient être utilisées pour mettre en œuvre ces structures sociotechniques.

Cette thématique s'inscrit dans le cadre du projet PUF (Partner University Fund) « Joint research lab on Risk Management in Life Critical Systems » accepté en juin 2012. Ce projet de coopération franco-américain réunit plusieurs équipes : l'équipe SHM du LAMIH, l'équipe TEMPO-PSI et l'équipe du professeur G. Boy du FIT (Florida Institute of Technology) de Melbourne.

## **Conclusion**

Nous avons au travers de ce chapitre proposé cinq thématiques de Recherche que nous souhaitons développer à plus ou moins long terme. Ces thématiques s'articulent autour du concept d'auto-organisation qui s'avère fondamental pour le développement de systèmes intelligents dans de nombreux domaines applicatifs (systèmes de production, chaînes logistiques, systèmes de transport, systèmes hospitaliers, bâtiments intelligents...).

## *Conclusion générale*

Les travaux sur la thématique de produit « intelligent / actif » sont encore relativement récents. Comme nous avons essayé de le mettre en évidence dans ce mémoire, de nombreux verrous scientifiques restent à résoudre dont la proposition d'une définition claire du concept de produit « intelligent / actif » et de modèles adéquats aptes à supporter l'activité associée au produit.

Dans ce contexte, nos travaux ont permis d'explicitier la notion d'activité associée à un produit tout au long de son cycle de vie. A cet effet, nous avons mis en évidence l'apport de cette activité associée au produit en matière d'amélioration de performances tant pour le produit que pour les différents systèmes de soutien traversés. Selon une approche de type Closed-loop PLM, l'enrichissement de la qualité des flux d'informations entre les différentes phases du cycle de vie, a également été souligné.

Afin de supporter ce concept d'activité, un modèle générique a été proposé. Le paradigme holonique nous a notamment permis de caractériser l'activité d'un produit « actif » constitué lui-même de sous-systèmes « actifs ». L'aspect interactionnel au sein d'un collectif de produits « actifs » a également été pris en compte au niveau du modèle.

Nous avons également mis l'accent sur des implémentations réelles des concepts, que ce soit dans un contexte de fabrication flexible via la cellule valenciennoise du pôle AIP-Priméca Nord-Pas de Calais ou dans un contexte de maintenance prédictive via le projet industriel FUI SURFER. Nous sommes convaincus que la démonstration de la pertinence des concepts proposés et leur essaimage dans le monde industriel passent par le développement de tels démonstrateurs. Dans ce cadre, notre choix d'une implémentation « embarquée » de l'activité, nous démarque de la plupart des travaux réalisés au sein de la communauté française et constitue une réelle spécificité.

Au niveau international, comme nous avons pu le noter dans l'état de l'art, la thématique « produit intelligent / actif » se situe à l'intersection de trois communautés de Recherche (communauté Productique, communauté s'intéressant aux problématiques du Product Lifecycle Management et communauté Informatique). Chacune des communautés selon sa sensibilité a fait évoluer la thématique du produit « intelligent / actif ». La communauté Productique, s'intéressant au pilotage distribué des systèmes de production, structurée via les initiatives IMS et HMS, a fait avancer les réflexions sur le concept SCP (Système Contrôlé par le Produit). La communauté œuvrant dans le domaine du Closed-loop PLM s'est intéressée à l'utilisation des informations glanées par le produit pour améliorer l'amélioration des flux d'informations entre les différentes étapes du cycle vie. Via les travaux sur l'Internet of Things et l'intelligence ambiante, la communauté Informatique participe également au développement du concept d'intelligence associée au produit. De nombreux projets internationaux et européens permettent de dynamiser ces différentes communautés.

Au niveau national, si nombre d'équipes s'intéressent à l'utilisation des technologies Rfid à des fins de traçabilité, seul un nombre restreint d'équipes mènent explicitement une activité dans le domaine du produit « intelligent / actif ». Ces dernières équipes issues des laboratoires CRAN, IRCCyN, LIMOS, et LSIS menaient déjà depuis de nombreuses années une activité de recherche dans le domaine du pilotage distribué. Cette philosophie de « distribution » des entités décisionnelles les a logiquement amenés à s'intéresser au concept SCP. Le projet exploratoire SCP a permis de catalyser les efforts de ces équipes et de créer une communauté, regroupée au sein du groupe de travail IMS2 (Intelligent Manufacturing Systems and Services) du GDR Macs.

Une diffusion plus large des concepts proposés par cette communauté reste à réaliser au sein de la communauté française. Le groupe de travail IMS2 s'y emploie via l'organisation de numéros spéciaux dans les journaux internationaux (Computers In Industry, Engineering Applications of Artificial Intelligence) ou de sessions dans les congrès de la communauté Productique tels qu'IESM, INCOM ou MOSIM. Un effort supplémentaire de diffusion reste cependant à mener en direction de la communauté informatique (Systèmes multi-agents, intelligence ambiante, recherche opérationnelle), de la communauté mécanique s'intéressant aux problématiques de PLM et de la communauté robotique de façon à opérer une fertilisation croisée des travaux.



Plusieurs rapports prospectifs en productique pointent la thématique « produit intelligent / actif » comme un sujet d'étude clef pour les prochaines décennies. De nombreux travaux de recherche devront encore être menés pour que cette thématique atteigne un bon niveau de maturité car les résultats actuels souffrent encore de certaines faiblesses, concernant notamment la garantie de performances et la viabilité industrielle. Il est en effet indispensable d'apporter des solutions aux problèmes de myopie à fin de garantir la bonne performance des systèmes à base de produits « intelligents / actifs ». Le déploiement dans le monde industriel doit aussi être accompagné par le développement de méthodologies prenant notamment en compte les difficultés d'interopérabilité entre systèmes.

Relever ces défis ainsi que l'ouverture vers de nouveaux champs applicatifs constituent les objectifs de mes futurs travaux de recherche.

## Références

- (Abou-Kandil et al. 2006) H. Abou-Kandil, M. Alamir, J-L. Boimond, M. De Mathelin, D. Henrion, S. Niculescu, L. Pronzato, J-P. Richard, O. Roux, D. Sauter, Synthèse du rapport du Comité des Experts « Automatique » du CNRS, avril 2006.
- (Adam et al., 2011) E. Adam, T. Berger, Y. Sallez, D. Trentesaux, Role-based manufacturing control in a Holonic Multiagent System, *International Journal of Production Research*, vol. 49, n°5, pp. 1455-1468, 2011.
- (Angeles, 2005) R. Angeles, Rfid technologies: Supply-chain applications and implementation issues, *Information Systems Management*, vol. 22, n°1, pp. 51-65, 2005.
- (AIC, 2011) Association des Instituts Carnot, *Smart Networked Objects & Internet of Things*, white paper, january 2011.
- (Aitenbichler et al., 2007) E. Aitenbichler, F. Lyardet, G. Austaller, J. Kangasharju, M. Mühlhäuser, Engineering intuitive and self-explanatory smart products, 22<sup>nd</sup> Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2007), pp. 1632-1637, 2007.
- (Atzori et al., 2010) L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, vol. 54, pp. 2787-2805, 2010.
- (Bajic, 2004) E. Bajic, Ambient networking for intelligent objects management, mobility and services, Séminaire Institut For Manufacturing, IFM Cambridge University, U.K., April 2, 2004.
- (Ballot et al., 2010) E. Ballot, R. Glardon, B. Montreuil, Rapport OpenFret – Contribution à la conceptualisation et à la réalisation d’un hub rail-route de l’Internet Physique, Groupe opérationnel 4 du Predit, avril 2010.
- (Ballot et al., 2012) E. Ballot, B. Montreuil, F. Fontane, Contribution of swarm intelligence to the Physical Internet: toward an open framework and decentralized decisions system to operate logistics networks, In: Borangiu, Thomas, Trentesaux (Ed.), *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control*, studies in computational intelligence, 402, Springer, 279-292, 2012.
- (Baptiste et al., 2007) P. Baptiste, A. Bernard, J-P. Bourrieres, P. Lopez, G. Morel, H. Pierreval, M-C. Portmann, Comité d’Experts Productique du GDR Macs – Prospective de recherche, 15 janvier 2007.
- (Bayart et al., 2005) M. Bayart, B. Conrard, A. Chovin, M. Robert, *Capteurs et actionneurs intelligents*, GT 18-4 CIAME SEE, Eds. Techniques de l’Ingénieur, Dossier S7520, 14 pages, mars 2005.
- (Beigl et al., 2001) M. Beigl, H.W. Gellersen, A. Schmidt, Media Cups: Experience with design and use of computer augmented everyday objects, *Computer Networks, Special issue on Pervasive Computing*, vol. 35, n°4, pp. 401-409, 2001.
- (Bendriss et al., 2007) S. Bendriss, A. Benabdelhafid, J. Boukachour, D. Boudebous, Meta-modèle de référence holonique pour la gestion de la traçabilité du produit dans la chaîne logistique, 5<sup>ème</sup> colloque International de Conception et Production Intégrées, CPI’2007, Rabat, Maroc, Octobre 2007.
- (Bendriss et al., 2008) S. Bendriss, A. Benabdelhafid, J. Boukachour, D. Boudebous, Traceability Information System for Freight Transportation Chain, 12<sup>th</sup> World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, WMSCI’2008, Orlando, Florida, U.S.A., June-July 2008.
- (Berger et al., 2009) T. Berger, Y. Sallez, C. Tahon, S. Raileanu, C. Kolski, R. Mandiau, D. Tabary, S. Hammadi, A. Melki, D. Jolly, Cœur de Ville – Véhicules intelligents en environnement urbain, Projet PPF, rapport final LAMIH-TEMPO, Valenciennes, juillet 2009.
- (Berger et al., 2010) T. Berger, Y. Sallez, B. Valli, A. Gibaud, D. Trentesaux. Semi-herarchical allocation and routing processes in FMS control: a stigmergic approach, *Journal of intelligent & Robotic systems*, vol. 58, n°1, pp. 17-45, 2010.

- (Berger et al., 2011) T. Berger, Y. Sallez, S. Raileanu, C. Tahon, D. Trentesaux, T. Borangiu, Personal Rapid Transit in an Open Control framework, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 61, pp. 300-312, 2011.
- (Bernard, 2008) A. Bernard. *Methods & tools for effective knowledge life cycle management*, New York: Springer-Verlag, ISBN: 3540784306, 2008.
- (Bettayeb et al., 2011) B. Bettayeb, S. Bassetto, P. Vialletelle, M. Tollenaere, Quality and exposure control in semiconductor manufacturing Part I -Modeling, *International Journal of Production Research*, Accepted 10/2011, DOI 10.1080/00207543.2011.630042.
- (Blanc, 2006) P. Blanc. Pilotage par approche holonique d'un système de production de vitres de sécurité feuilletées, Mémoire de Doctorat, Université de Nantes, décembre 2006.
- (Blanc et al., 2008) P. Blanc, I. Demongodin, P. Castagna, A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, n°3, pp. 315-330, 2008.
- (Bleecker, 2006) J. Bleecker, A Manifesto for Networked Objects — Cohabiting with Pigeons, Arphids and Aibos in the Internet of Things (Why Things Matter), Blog, 2006.
- (Borangiu et al., 2012) T. Borangiu, S. Raileanu, O. Stocklosa, C. Tahon, T. Berger, D. Trentesaux, Service oriented control framework for a system characterized by a guided flow of entities, In Borangiu, Thomas, Trentesaux (Ed.), *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control*, studies in computational intelligence, 402, Springer, pp. 21-34, 2012.
- (Boucher, 2007) X. Boucher, Vers un pilotage agile de l'évolution des systèmes de production, Mémoire de HDR, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, novembre 2007.
- (Bousbia & Trentesaux, 2002) S. Bousbia, D Trentesaux, Self-Organization in Distributed Manufacturing Control: state-of-the-art and future trends, IEEE International conference on Systems, Man & Cybernetics, Hammamet, Tunisia, 6-9 octobre 2002.
- (Brahim-Djelloul et al., 2012) S. Brahim-Djelloul, D. Estampe, S. Lamouri, Cadre de modélisation pour le pilotage dynamique du transport routier à l'aide de technologie Rfid, 9<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation - MOSIM'12, Bordeaux, France, 06-08 juin 2012.
- (Broissin, 1999) N. Broissin, Contribution à l'amélioration de la réactivité des systèmes de production automatisés et flexibles grâce à un pilotage basé sur une génération de tâches décentralisée, Mémoire de Doctorat, Université d'Aix-Marseille III, 1999.
- (Brun-Picard & Baboli, 1995) D. Brun-Picard, H. Baboli, Self-scheduling for Flexible Manufacturing Systems : a product-oriented approach, In: Proceedings from the 13<sup>th</sup> International Conference on Production Research, Jerusalem, Israel, 1995.
- (Brun Picard et al., 1997) D. Brun-Picard, H. Bouvet, H. Baboli, Z. Binder Z, The product as an active element of distributed production control, IFAC-IFIP-IMACS Conference on control of industrial systems, CIS'97, vol. 3, pp.359-365, Belfort, France, 1997.
- (Brun-Picard, 2000) D. Brun-Picard, Pilotage réactif par le Produit, Journées du Groupement Pour la Recherche en Productique, ESIA, Annecy, France, 2000.
- (Bussmann & Schild, 2007) S. Bussmann, K. Schild, Self-organization in manufacturing operations, *Communications of the ACM*, vol. 50, n°12, pp. 74-79, 2007.
- (Buchanan et al., 2005) M. Buchanan, J.E. Anderson, G. Tegnér, L. Fabian, J. Schweizer, Emerging Personal Rapid Transit Technologies – Introduction, State-of-the-Art, Applications, In: Proceedings of the 2005 AATS conference, Bologna, Italy, 7-8 Nov, 2005.
- (Cardin, 2007) O. Cardin, Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production - Application à un système flexible de production, Mémoire de Doctorat, Université de Nantes, octobre 2007.
- (Cardin et al., 2009) O. Cardin, P. Castagna, E. Chové, Utilisation d'un observateur pour le pilotage des systèmes contrôlés par le produit, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 43, n°4-5, pp. 463-486, 2009.

- (Cardin & Castagna, 2009) O. Cardin, P. Castagna, Using online simulation in Holonic Manufacturing Systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 22, n°7, pp. 1025-1033, 2009.
- (Cassina et al., 2006) J. Cassina, M. Tomasella, M. Marquard, A. Metin, A. Matta, M. Taisch, Development of the semantic object model for a PDKM System, ICE International Conference, Milan, Italy, July 2006.
- (Cassina et al., 2007) J. Cassina, M. Tomasella, A. Matta, M. Taisch, G. Felicetti, Closed-loop PLM of Household Appliances: An Industrial Approach, In: IFIP Advances in Production Management Systems, 246, eds. Olhager, J., Persson, F., (Boston: Springer), pp. 153-160, 2007.
- (Cassina et al., 2009) J. Cassina, A. Cannata, M. Taisch. Development of an Extended Product Lifecycle Management through Service Oriented Architecture. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> CIRP Industrial Product-Service Systems (IPS2) Conference, Cranfield University, pp. 118-124, 1-2 April 2009.
- (Castagna et al., 2008) P. Castagna, A. Thomas, P. Blanc, O. Cardin, R. Pannequin, H. El Haouzi, T. Klein, *La simulation pour la gestion des chaînes logistiques*, Dans : Caroline Thierry, André Thomas, Gérard Bel, Hermes science - Lavoisier, pp.261-296, 2008.
- (Cauffriez, 2005) L. Cauffriez, Méthodes et modèles pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement de systèmes automatisés complexes : application à l'exploitation de lignes de production. Application à la conception de systèmes intelligents distribués, Mémoire de HDR, Université de Valenciennes, septembre 2005.
- (Cea Ramirez et al., 2004) A. Cea Ramirez, E. Bajic, P. De Matteis, Une approche de modélisation des interactions produits - processus par les objets communicants, 5<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation MOSIM'04, Nantes, France, 1-3 septembre 2004.
- (Cea Ramirez, 2006) A. Cea Ramirez, Contribution à la Modélisation et à la Gestion des Interactions Produit-Processus dans la Chaîne Logistique par l'Approche Produits Communicants, Mémoire de Doctorat, Université de Nancy, France, 18 Juillet 2006.
- (CERP-IOT, 2010) CERP-IOT (Cluster of European Research Projects on the Internet of Things), *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*, Edited by H. Sundmaeker, P. Guillemin, P. Friess and S. Woelfflé, March 2010.
- (Chapurlat, 2008) V. Chapurlat, Vérification et validation de modèles de systèmes complexes : application à la Modélisation d'Entreprise, Mémoire de HDR, Ecole Doctorale I2S (Information, Structures et Systèmes), Université Montpellier II des Sciences et Techniques du Languedoc (U.S.T.L.), mars 2007.
- (Chaxel, 1995) F. Chaxel, Contribution à la gestion et à la conduite des systèmes manufacturiers par les objets nomades de production, Mémoire de Doctorat, Spécialité Production Automatisée, Université Henri Poincaré-Nancy I, 1995.
- (Chen et al., 2008) D. Chen, G. Doumeingts, F. Vernadat, Architectures for Enterprise Integration and Interoperability: Past, Present and Future, *Computers in Industry*, vol. 59, n°7, pp. 647-659, 2008.
- (Chové, 2010) E. Chové, Contribution à l'ordonnancement réactif des installations de traitement de surface - Application industrielle, Mémoire de Doctorat, Université de Nantes, octobre 2010.
- (CIAME, 1987) Ciame-Afcet. *Les capteurs intelligents : Réflexions des utilisateurs*, Livre blanc CIAME, 1987.
- (Cook et al., 2009) D.J. Cook, J.C. Augusto, V.R. Jakkula, Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 5, pp. 277-298, 2009.
- (Corcelle et al., 2007) C. Corcelle, K. Främling, L. Rabe, J. Anke, J. Petrow, Assessment of item-specific information management approaches in the area of heavy load vehicles. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Product Lifecycle Management, Stezzano, Italy, 11-13 July 2007.
- (Cybermove, 2004) Cybernetic Transport Systems for the Cities of Tomorrow, D6.3 - Final evaluation report, december 2004, <http://www.cybermove.org>
- (Daoud et al., 2006) R.M. Daoud, H.H.Amer, H.M. Elsayed, M. El-Soudani, Y. Sallez, Wireless Vehicle Communication for Traffic Control in Urban Areas. 32<sup>nd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON, Paris, France, November 2006.

- (Daoud et al., 2007) R.M. Daoud, M.A. El Dakoury, Y. Sallez, Burst Communication for Traffic Control in Light Urban Areas, International Workshop on Logistics and Transportation 2007, IEEE LT, Sousse, Tunisia, November 2007.
- (Daoud, 2008) R.M. Daoud, Wireless and wired Ethernet for Intelligent Transportation Systems, Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes, décembre 2008.
- (Darmoul, 2010) S. Darmoul, Etude de la contribution des systèmes immunitaires artificiels au pilotage de systèmes de production en environnement perturbé, Mémoire de Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, avril 2010.
- (Da Silveira et al., 2001) G. Da Silveira, D. Borenstein, S. Fogliatto Flávio, Mass customization: literature review and research directions, *International Journal of Production Economics*, vol. 72, pp. 1-13, 2001.
- (Dassisti et al., 2006) M. Dassisti, H. Panetto, A. Tursi, Product-Driven Enterprise Interoperability for Manufacturing Systems Integration, In: Proceedings of the BPM2006 Business Process Management Workshops, 2<sup>nd</sup> ENEI Works, Vienna, Austria, 2006.
- (Demongodin & Hennet, 2008) I. Demongodin, J-C. Hennet, A Petri net model of distributed control in a holonic Manufacturing Execution System, 17<sup>th</sup> IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 2008.
- (Derigent, 2012) W. Derigent, Aggregation of product information for composite intelligent products, 9<sup>th</sup> International Conference of Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'12, Bordeaux, France, June 6-8, 2012.
- (Derriche & Kouiss, 2011) O. Derriche, K. Kouiss, Apport des outils de conception et de validation de parties commande pour le développement de systèmes manufacturiers reconfigurables, 12<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA, Le Mont Dore, 29 Mars-1er avril 2011.
- (Dijkstra, 1959) E.W. Dijkstra, A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- (Dobre & Bajic, 2008) D. Dobre, E. Bajic, Active product modeling for chemical security management based on smart object concept, 7<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes MOSIM'08, Paris, 31 mars- 2 avril 2008.
- (Donati et al., 2010) Donati T., Bricogne M., Eynard B., PLM platform: integrated support of enterprise digital chain for collaborative product development, 7<sup>th</sup> IFIP International Conference on Product Lifecycle Management - PLM'10, Bremen, Germany, July 12-14, 2010.
- (Doran et al., 1997) J. Doran, S. Franklin, N. Jennings, T. Norman, On cooperation in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, vol.12, pp. 309-314, 1997.
- (Dudek et al., 1996) G. Dudek, M. Jenkin, E. Miliot, D. Wilkes, A taxonomy for multi-agent robotics, *Autonomous Robots*, vol. 3, n°4, pp. 375-397, 1996.
- (El Haouzi, 2008) H. El Haouzi, Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps: Application à l'entreprise TRANE, Mémoire de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, novembre 2008.
- (EPCglobal, 2005) EPC Information Services (EPCIS) Specification, Accessed 21 September 2011: [http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/epcis/epcis\\_1\\_0\\_1-standard-20070921.pdf](http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/epcis/epcis_1_0_1-standard-20070921.pdf)
- (Farinelli et al., 2004) A. Farinelli, L. Iocchi, D. Nardi, Multi-robot systems: A classification focused on coordination, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics B*, vol. 34, n°5, pp. 2015-2028, 2004.
- (Ferber, 1995) J. Ferber, *Les systèmes multi- agents – vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, ISBN 2- 7296- 0572- X, 1995.
- (FING, 2006) FING, *Machine to Machine*, White paper co-dirigé par la FING, Syntec Informatique et France Télécom, Paris, 2006.
- (Fiske, 1992) A.P. Fiske, The four elementary forms of sociality: Framework for a unified theory of social relations, *Psychological Review*, vol. 99, n° 4, pp. 689-723, 1992.

- (Fletcher et al., 2003) M. Fletcher, D. McFarlane, A. Lucas, J. Brusey, D. Jarvis, The Cambridge Packing Cell - A Holonic Enterprise Demonstrator, 3<sup>rd</sup> International / Central and Eastern European conference on Multi-Agent Systems, Prague, Czech Republic, 2003.
- (Fontanili & Van Oudenhove, 2008) F. Fontanili, T. Van Oudenhove, An Experimental Platform for e-Manufacturing and Advanced Control, 17<sup>th</sup> IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- (Främling et al., 2011) K. Främling, J. Loukkola, J. Nyman, A. Kaustell, Intelligent Products in Real-Life Applications, In: Benyoucef L., Trentesaux D., Artiba A., Rezg N. (Ed.), International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11), I4E2, Metz, pp. 1444-1453, May 2011.
- (Främling et al., 2012) K. Främling, V. Hinkka, S. Parmar, J. Tätilä, Assessment of Standards for Inter-organizational Tracking Information Exchange in the Supply Chain, In: Borangiu T., Dolgui A. (Ed.), 14<sup>th</sup> IFAC symposium on Information & Control problems in Manufacturing (INCOM), IFAC, Bucharest, Romania, May 2012.
- (Fremont, 2006) G. Fremont, Systèmes Coopératifs pour la Sécurité - Le Projet européen SAFESPOT, 3<sup>ème</sup> Congrès ITS, Saint-Brieuc-Côtes d'Armor, France, 2006.
- (Froetscher & Boehm, 2006) A. Froetscher, M. Boehm, Coopers -Co-operative Systems for Intelligent Road Safety, ITS World Conference, London, 2006.
- (Gouyon, 2004) D. Gouyon, Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse, Mémoire de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, décembre 2004.
- (Gouyon & David, 2008) D. Gouyon, M. David, Implantation d'un contrôle par le produit à l'aide de réseaux de capteurs sans fil, 7<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes MOSIM'08, Paris, 31 mars- 2 avril 2008.
- (Grabot, 2011) B. Grabot, Perspectives STP (Sciences et Techniques de la Production de biens et de services) - Synthèse de « roadmaps » existantes, novembre 2011.
- (Herrera, 2011) C. Herrera, Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées, Mémoire de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, juin 2011.
- (Holmström et al., 2009) J. Holmström, R. Kajosaari, K. Främling, E. Langius, Roadmap to tracking based business and intelligent products, *Computers in Industry*, vol. 60, n°3, pp. 229-233, 2009.
- (Housseman et al., 2010) S. Housseman, N. Absi, R. Collomp, D. Feillet, Utilisation de l'auto-identification pour la génération d'ordonnements intégrant une approche de gestion des compétences : Cas de la production de chimiothérapies, 5<sup>ème</sup> édition de la conférence GISEH'10, pp.1-8, 2010.
- (Hribernik et al., 2010) K.A. Hribernik, T. Warden, K.D. Thoben, O. Herzog, An internet of things for transport logistics - an approach to connecting the information and material flows in autonomous cooperating logistic processes, In: Proceedings of the 12th International Modern Information Technology in the Innovation Processes of industrial enterprises, pp. 54-67, Aalborg, Denmark, August 2010.
- (Huet et al., 2010) J-C. Huet, J-L. Paris, M. Gourgand, K. Kouiss, Modèle de connaissance générique du circuit du médicament dans un hôpital, 8<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation MOSIM'10, Hammamet, Tunisie, 10-12 mai 2010.
- (Huet, 2011) J-C. Huet, Proposition d'une méthodologie de réingénierie pour le contrôle par le produit de systèmes manufacturiers : Application au circuit du médicament d'un hôpital, Mémoire de Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, janvier 2011.
- (Hülsmann et al., 2008) M. Hülsmann, B. Scholz-Reiter, L. Austerschulte, C. Wycisk, C. De Beer, Autonomous Cooperation – A Way to Cope with Critical Incidents in International Supply Networks (ISN) An Analysis of Complex Adaptive Logistic Systems (CALS) and their Robustness, 24th EGOS Colloquium, Upsetting Organizations, web-publication, 2008.
- (IEEE-TTM, 2011) The IEEE Technology Time Machine, report of the IEEE meeting « Technology Time Machine », Symposium on Technologies beyond 2020, Hong-Kong, June 2011.

- (Iera, 2011) A. Iera, The Social Internet of Things: from objects that communicate to objects that socialize in the Internet, In: Proceedings of 50<sup>th</sup> FITCE International Congress, Palermo, Italy, August 31- Sept. 1 2011.
- (IMS, 2010) IMS2020: Roadmap on Sustainable Manufacturing, Energy Efficient Manufacturing and Key Technologies, february 2010, <http://www.ims2020.net/>
- (ITU, 2005) International Telecommunication Union. *The Internet of Things*, ITU Internet Report, 2005, [www.itu.int/internetofthings/](http://www.itu.int/internetofthings/)
- (Jimenez et al., 2011) C. Jimenez, S. Dauzère-Pérès, C. Feuillebois, E. Pauly, Simulation of aircraft maintenance improvement using Rfid systems, In: Benyoucef L., Trentesaux D., Artiba A., Rezg N. (Ed.), International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11), I4E2, Metz, 2011.
- (Jun et al., 2007) H.B. Jun, D. Kiritsis, P. Xirouchakis, Research issues on closed-loop PLM, *Computers in Industry*, vol. 58, n° 8-9, pp. 855-868, 2007.
- (Kärkkäinen et al., 2003) M. Kärkkäinen, J. Holmström, K. Främling, K. Artto, Intelligent products—a step towards a more effective project delivery chain, *Computers in Industry*, vol. 50, pp.141-151, 2003.
- (Kawsar et al., 2008) F. Kawsar, F. Lyardet, N. Nakajima, Three Challenges for Future Smart Object Systems, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Smart Products: Building Block of Ambient Intelligence (AmI-Block'08), in conjunction with AmI 2008, the 2008 European Conference of Ambient Intelligence, Nurnberg, Germany, november 2008.
- (Kawsar, 2009) F. Kawsar, A document based framework for user centric Smart Object Systems, PhD in Computer Science, Waseda University, Japan, february 2009.
- (Kieffer & Pujo, 2002) J-P. Kieffer, P. Pujo, *Méthodes du pilotage des systèmes de production*, Hermès Science Europe Ltd, Paris, 2002.
- (Kintzig et al., 2002) C. Kintzig, G. Poulain, G. Privat, P. Favennec, *Objets Communicants*, Collection Scientifique et technique des télécommunications, Ed. Hermes Science, Paris, 2002.
- (Kintzig et al., 2003) C. Kintzig, G. Poulain, G. Privat, P. Favennec, *Communicating with smart objects: Developing technology for usable pervasive computing systems*, Kogan Page Science. 2003.
- (Kiritsis et al., 2003) D. Kiritsis, A. Bufardi, P. Xirouchakis, Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 17, pp. 189-202, 2003.
- (Kiritsis & Moseng, 2008) D. Kiritsis, B. Moseng, Product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems, Final report-Demonstrations, PROMISE FP6-507100, EU, sept. 2008.
- (Kiritsis, 2011) D. Kiritsis, Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the internet of things, *Computer-Aided Design*, vol. 43, n°5, pp. 479-501, 2011.
- (Koestler, 1967) A. Koestler, *The Ghost in the Machine*, London: Hutchinson, 1967.
- (Kortuem et al., 2007) G. Kortuem, N. Davies, C. Efstratiou, K. Kinder, M.I. White, R. Hooper, J. Finney, L. Ball, J. Busby, D. Alford, Sensor networks or smart artifacts? An exploration of organizational issues of an industrial health and safety monitoring system, 9<sup>th</sup> International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2007), Innsbruck, Austria, september 16-19 2007.
- (Kortuem et al., 2010) G. Kortuem, F. Kawsar, D. Fitton, V. Sundramoorthy, Smart objects as building blocks for the internet of things, *Internet Computing IEEE*, vol. 14, n°1, pp. 44-51, 2010.
- (Kouiss & Najid, 2004) K. Kouiss, M. Najib, Un couplage MES-simulation pour le pilotage d'un système de production, 5<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation MOSIM'04, Nantes, France, 1-3 septembre 2004.
- (Kranz et al., 2011) M. Kranz, A. Möller, L. Roalter, Robots, Objects, Humans: Towards seamless interaction in intelligent environments supporting cooperative interaction between Humans and Technical Systems with Cognitive Objects, 1<sup>st</sup> International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems (PECCS 2011), Algarve, Portugal, march 5-7, 2011.

- (Kubicki et al., 2011) S. Kubicki, S. Lepreux, C. Kolski, Rfid-driven situation awareness on TangiSense, a table interacting with tangible objects, *Personal and Ubiquitous Computing*, 2011. DOI: 10.1007/s00779-011-0442-9.
- (Kubler et al., 2011) S. Kubler, W. Derigent, A. Thomas, E. Rondeau. Prototyping of a communicating textile, In: Benyoucef L., Trentesaux D., Artiba A., Rezg N. (Ed.), International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11), I4E2, Metz, mai 2011.
- (Lamnabhi-Lagarrigue, 2011) F. Lamnabhi-Lagarrigue, Prospective en Automatique (HORIZON 2020) - Contribution de l'Automatique aux défis, à l'HORIZON 2020, des Sciences et Technologies de l'Information et de Communication et de leurs Interactions, décembre 2011.
- (Leitão, 2009) P. Leitão, Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, n°7, pp. 979-991, 2009.
- (Leitão & Restivo, 2006) P. Leitão, F. Restivo, ADACOR: A Holonic Architecture for Agile and Adaptive Manufacturing Control, *Computers in Industry*, Vol. 57, n°2, pp. 121-130, 2006.
- (Leitão et al., 2012) P. Leitão, J. Barbosa, D. Trentesaux, Bio-inspired Multi-Agent Systems for Reconfigurable Manufacturing Systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, pp. 934-944, 2012.
- (Lemaignan et al., 2006) S. Lemaignan, A. Siadat, J-Y. Dantan, A. Semenenk, MASON: A Proposal for an ontology of manufacturing domain, In: Proceedings of the IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06), Washington, U.S.A., 2006.
- (Le Moigne, 1994) J.L. Le Moigne, *La théorie du système général– théorie de la modélisation*, éd. Presses universitaires de France, 1ère éd. 1977, 4ème éd. 1994.
- (Le Mortellec et al., 2012) A. Le Mortellec, J. Clarhaut, Y. Sallez, T. Berger, D. Trentesaux. Embedded cooperative holarchy for diagnosing complex moving system, In: Borangiu T., Dolgui A. (Ed.), 14th IFAC symposium on Information & Control problems in Manufacturing (INCOM), IFAC, Bucarest, Romania, may 2012.
- (Le Mortellec et al., 2013) A. Le Mortellec, J. Clarhaut, Y. Sallez, T. Berger, D. Trentesaux, Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013. DOI : 10.1016/j.engappai.2012.09.008.
- (Liao et al., 2008) L. Liao, H. Wang, J. Lee, Reconfigurable Watchdog Agent for machine health prognostics, *International Journal of COMADEM*, vol. 11, n°3, pp. 2-15, 2008.
- (Louati et al., 2012) T. Louati, F. Ounnar, P. Pujo, C. Pistoresi, Multicriteria Decision Making Service for an Intelligent Control of Individuals Flow in Restricted Area, In: Borangiu T., Dolgui A. (Ed.), 14th IFAC symposium on Information & Control problems in Manufacturing (INCOM), IFAC, Bucarest, Romania, may 2012.
- (Mabrouk et al., 1993) M. Mabrouk, J. Rojas, Y. Sallez, R. Soënen, Decision making assistance model and tools proposition for production automated systems operation, International conference on CAD/CAM, Robotics and Autonomous Factories (INCARF 93), IIT New Delhi, december 1993.
- (Mabrouk, 1996) M. Mabrouk, Proposition d'une méthode et d'un outil d'aide à la reconfiguration des systèmes automatisés de production, Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes, mai 1996.
- (Mabrouk et al., 1996a) M. Mabrouk, Y. Sallez, R. Soënen, Vers un outil d'aide à l'exploitation des systèmes automatisés de production, 5ème Congrès International de Génie Industriel GI5, Grenoble, avril 1996.
- (Mabrouk et al., 1996b). M. Mabrouk, Y. Sallez, R. Soënen, Toward a tool for aiding reconfiguration of production automated systems, Computational Engineering in Systems Applications, CESA'96, Lille, july 1996.
- (Maione & Naso, 2003) G. Maione, D. Naso, A soft computing approach for task contracting in multi-agent manufacturing control, *Computers in Industry*, vol. 52, pp. 199-219, 2003.
- (Malhéné & Deschamps, 2010) N. Malhéné, J-C. Deschamps, De la traçabilité au routage des produits en transport routier, RIRL 2010 - 8<sup>th</sup> International Conference on Logistics and SCM Research, september 29, 30 and october 1<sup>st</sup> 2010.



- (Malherbe et al., 2007) L. Malherbe, U. Herfeld, M. Kreimeyer, F. Deubzer, D. Deneux, De la mise en relation des structures produit et fonctionnelle dans le développement automobile pour gérer les flux informationnels, 10<sup>ème</sup> Colloque national AIP-PRIMECA, La Plagne, 17-20 avril 2007.
- (Manufuture, 2004) ManuFuture-EU, A vision for 2020 - Assuring the future of manufacturing in Europe, Report of the High-Level Group, november 2004, <http://www.manufuture.org>.
- (Mařík & Lazansky, 2007) V. Mařík, J. Lazansky, Industrial applications of agent technologies. *Control Engineering Practice*, vol. 15, pp. 1364-1380, 2007.
- (Mattern, 2003) F. Mattern, From smart devices to smart everyday objects, In: Proceedings of Smart Object Conference SOC'2003, pp. 15-16, Grenoble, France, may 2003.
- (McDonough & Braungart, 2011) W. McDonough, M. Braungart, *Cradle to Cradle: Créer et recycler à l'infini*, Éditions Alternatives, 2011.
- (McFarlane et al., 2002) D. McFarlane, S. Sarma, J.L. Chirn, C.Y. Wong, K. Ashton, The intelligent product in manufacturing control and management, 15<sup>th</sup> IFAC Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- (McFarlane et al., 2003) D. McFarlane, S. Sarma, J.L. Chirn, C.Y. Wong, K. Ashton, Auto id systems and intelligent manufacturing control, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 16, n°4, pp. 365-376, 2003.
- (McFarlane, 2011) D. McFarlane, Distributed Intelligence in Manufacturing & Service Environments, Invited paper, 1<sup>st</sup> International on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control (SOHOMA'2011), Paris, France, june 20-21, 2011.
- (Melki et al., 2010) A. Melki, S. Hammadi, Y. Sallez, T. Berger, C. Tahon, Advanced approach for the public transportation regulation system based on Cybercars, *RAIRO - Operations Research*, vol. 44, pp. 85-105, 2010.
- (Meyer et al., 2009) G.G. Meyer, K. Främling, J. Holmström, Intelligent Products: A survey, *Computers in Industry*, vol. 60, pp. 137-148, 2009.
- (Minaud et al., 1994) H. Minaud, Y. Sallez, R. Soënen, Utilisation de l'outil K-SYS pour l'implantation du MESAP (Modèle d'Exploitation des Systèmes Automatisés de Production), *Automatique Productique Informatique Industrielle*, vol. 28, n°5, 1994.
- (Minaud et al., 1995) H. Minaud, Y. Sallez, R. Soënen, Etude et évaluation des modes d'exploitation de systèmes automatisés à l'aide d'une approche orientée-objet / Application à l'A.I.P. de Valenciennes, Club EEA - Journées « Automatique et Expérimentation en laboratoire », Angers, avril 1995.
- (Ministère de l'Industrie, 2010) Ministère de l'Industrie, Technologies clés 2015, Paris, France, <http://www.industrie.gouv.fr/tc2015/>
- (Mintzberg, 1979) H. Mintzberg, *The structuring of organizations: A synthesis of the research*, Prentice-Hall (Englewood Cliffs, N.J.), 1979.
- (Mirdamadi, 2009) S. Mirdamadi, Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution, Mémoire de Doctorat, Université de Toulouse, juin 2009.
- (Mitsugi et al., 2007) J. Mitsugi, T. Inaba, B. Pátkai, L. Theodorou, J. Sung, T. Sánchez López, D. Kim, D. McFarlane, H. Hada, Y. Kawakita, K. Osaka, O. Nakamura, *Architecture Development for Sensor Integration in the EPCglobal Network*, Auto-ID Labs White Paper WP-SWNET-018, 2007.
- (Mitton & Simplot-Ryl, 2010) N. Mitton, D. Simplot-Ryl, From the Internet of things to the Internet of physical world, *Comptes rendus - Physique de l'Académie des sciences*, vol.12, pp. 669-674, 2011.
- (Montreuil, 2012) B. Montreuil. The Physical Internet: Enabling Efficient and Sustainable Logistics, In: Borangiu T., Dolgui A. (Ed.), 14th IFAC symposium on Information & Control problems in Manufacturing (INCOM), IFAC, Bucarest, Romania, may 2012.

- (Morel et al., 2003) G. Morel, H. Panetto, M. Zaremba, F. Mayer, Manufacturing Enterprise Control and Management System Engineering : paradigms and open issues, *Annual Reviews in Control*, vol.27, n°2, pp. 199-209, 2003.
- (Morel et al., 2007) G. Morel, P. Valckenaers, J.-M. Faure, C. Pereira, C. Dietrich, Manufacturing plan control challenges and issues, *Control Engineering Practice*, vol. 15, n°11, pp.1321-1331, 2007.
- (NIC, 2008) US National Intelligence Council, Disruptive Civil Technologies – Six Technologies with Potential Impacts on U.S. Interests out to 2025, april 2008.
- (Okino, 1993) N. Okino, Bionic Manufacturing System in Flexible Manufacturing System: past – present – future, J. Peklenik (ed), CIRP, Paris, pp. 73-95, 1993.
- (Orbita, 2006) Orbita-BT: Data monitoring Cuts rail running costs, *Journal Professional Engineering*, vol. 19, n°20, pp. 50-53, 2006.
- (Ounnar & Pujo, 2005) F Ounnar, P. Pujo, Supplier evaluation process within a self-organized logistical network, *International Journal of Logistics Management (IJLM)*, vol. 16, n° 1, pp. 159-172, 2005.
- (Ounnar & Pujo, 2012) F Ounnar, P. Pujo, Pull control for Job Shop: Holonic Manufacturing System approach using multicriteria decision-making, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, n°1, pp. 141-153, 2012, DOI: 10.1007/s10845-009-0288-4.
- (PABADIS PROMISE, 2008) *Benefits and requirements of the PABADIS' PROMISE System*, white paper, FP6-IST-016649, march 2008. <http://www.pabadis-promise.org/>
- (Pach et al., 2012a) C. Pach, T. Berger, Y. Sallez, D. Trentesaux, D. Deneux, Holo-Gen : modèle de contrôle holonique générique - mise en œuvre sur un SFP, 13<sup>ème</sup> colloque national AIP-PRIMECA, Le Mont Dore, mars 2012.
- (Pach et al., 2012b) C. Pach, A. Bekrar, N. Zbib, Y. Sallez, D. Trentesaux, An Effective Potential Field Approach to FMS Holonic Heterarchical Control, *Control Engineering Practice*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.07.005>, 2012.
- (Panetto et al., 2012) H. Panetto, M. Dassisti, A. Tursi, ONTO-PDM: product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment, *Advanced Engineering Informatics*, vol.26, n°2, pp. 334-348, 2012.
- (Pannequin, 2007) R. Pannequin, Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production, Mémoire de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, juillet 2007.
- (Pannequin & Thomas, 2012) R. Pannequin, A. Thomas, Another interpretation of stigmergy for product-driven systems architecture, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, DOI: 10.1007/s10845-011-0588-3.
- (Parayre et al., 1991a) T. Parayre, Y. Sallez, R. Soënen, Méthodologie de l'exploitation des systèmes automatisés de production, 3<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, Tours, mars 1991.
- (Parayre et al., 1991b) T. Parayre, Y. Sallez, R. Soënen, Etude des cycles de vie des SAP : Vers une méthodologie de l'exploitation, 23<sup>ème</sup> CIRP Séminaire International sur les Systèmes de Production, Nancy, juin 1991.
- (Parayre, 1992) T. Parayre, Le MESAP : Vers une méthodologie de l'exploitation des systèmes automatisés de production, Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes, mars 1992.
- (Parayre et al., 1992a) T. Parayre, R. Soënen, Y. Sallez, Hood implementation of operating modes in automated production systems, 7<sup>ème</sup> colloque de l'IFAC/IFIP/IFORS/IMACS/ISPE sur les problèmes de contrôle de l'information en technologie de fabrication, INCOM'92, Toronto, Canada, mai 1992.
- (Parayre et al., 1992b) T. Parayre, Y. Sallez, R. Soënen, Model of the state of operation for automatized systems, 8<sup>th</sup> international IFIP WG 5.3 conference PROLAMAT'92, Tokyo, Japan, june 1992.
- (Parent & Gallais, 2002) M. Parent, G. Gallais, Intelligent Transportation in Cities with CTS, ITS World Congress, Chicago, U.S.A., Oct.2002.

- (Parent & De La Fortelle, 2005) M. Parent, A. De La Fortelle, *Cybercars: Past, Present and Future of the Technology*, In: Proceedings of the 2005 ITS World Congress, San Francisco, U.S.A., 2005.
- (Parker, 2008) L.E. Parker, *Distributed Intelligence: Overview of the Field and its Application in Multi-Robot Systems*, *Journal of Physical Agents*, vol. 2, n°1, 2008.
- (Parlikad & McFarlane, 2007) A.K. Parlikad, D. McFarlane, *Rfid-based product information in end-of-life decision making*, *Control Engineering Practice*, vol.15, pp. 1348-1363, ISSN 0967-0661, 2007.
- (Parunak et al., 1998) H.V.D. Parunak, A. D. Baker, S.J. Clark, *The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design*, Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents, ICAA'98, Minneapolis, MN, 1998.
- (Parunak et al., 2004) H.V.D. Parunak, S. Brueckner, M. Fleischer, J. Odell, *A Design Taxonomy of Multi-agent Interactions*, *Agent-Oriented Software Engineering IV, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2935/2004, pp. 123-137, 2004.
- (Patkai et al., 2007) B. Patkai, L. Theodorou, D. McFarlane, K. Schmidt, *Requirements for Rfid-based sensor integration in landing gear monitoring—a case study*, Technical report, AerospaceID Technologies Programme, University of Cambridge, 2007.
- (Paviot et al., 2011) T. Paviot, V. Cheutet, S. Lamouri, *A PLCS framework for PDM / ERP interoperability*, *Int. J. Product Lifecycle Management*, vol. 5, no. 2-3-4, pp. 295-313, 2011.
- (Pomerol, 1997) J.C. Pomerol, *Artificial Intelligence and human decision making*, *European Journal of Operational Research*, vol. 99, pp. 3- 25, 1997.
- (PROMISE, 2008a) PROMISE architecture series, volume 1: architecture overview, 2008. <http://promise.no/>
- (PROMISE, 2008b) PROMISE architecture series, volume 4: architecture reference: PROMISE PDKM System Object Model, 2008. <http://promise.no/>
- (Pujo & Brun-Picard, 2002) P. Pujo, D. Brun-Picard, *Pilotage sans plan prévisionnel ni ordonnancement préalable*, Collection IC2 - Productique : Méthodes du pilotage des systèmes de production, Hermès Science Europe Ltd (P. PUJO, J.P. KIEFFER, Eds.), 2002.
- (Pujo, 2009) P. Pujo, *De l'isoarchie pour le pilotage des systèmes de production*, Mémoire de HDR, Université Paul Cezanne-Aix Marseille III, Décembre 2009.
- (Pujo et al., 2009) P. Pujo, N. Broissin, F. Ounnar, *PROSIS: An isoarchic structure for HMS control*, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, n° 3/4, pp. 1034-1045, Mars 2009.
- (Raileanu, 2011) S. Raileanu, *Proposition d'un modèle générique de pilotage pour un système à flux guidés/ Application des concepts holoniques au transport intelligente (FMS/PRT)*, Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes / Université Polihenica Bucarest Bucarest, juin 2011.
- (Riva et al., 2005) G. Riva, F. Vatalaro, F. Davide, M. Alcañiz, *Ambient Intelligence*, IOS Press, 2005 <http://www.ambientintelligence.org>
- (Rojas Ramirez et al., 1995) J. Rojas Ramirez, Y. Sallez, R. Soënen, *Aid to decision making for the reconfiguration of automated manufacturing systems*, *Intelligent Manufacturing Process & Systems*, Puerto Rico, february 1995.
- (Rojas Ramirez, 1996) J. Rojas Ramirez, *Etude des modes de marches des systèmes automatisés de production pour la définition des stratégies de conduite*. Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes, janvier 1996.
- (Salkham et al., 2006) A. Salkham, R. Cunningham, A. Senart, V. Cahill, *A Taxonomy of Collaborative Context-Aware Systems*, In: Proceedings of the CAISE'06 Workshop on Ubiquitous Mobile Information and Collaboration Systems, UMICS'06, Luxemburg, pp. 899-911, June 5-9 2006.
- (Sallez et al., 2009a) Y. Sallez, T. Berger., D. Trentesaux, *A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS*, *Computer in Industry*, vol. 60, n°3, pp. 204-216, 2009.

- (Sallez et al., 2009b) Y. Sallez, T. Berger., D. Trentesaux, Open-control: a new paradigm for integrated product-driven manufacturing control, 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problem in Manufacturing (INCOM'09), Moscow, Russia, june 3-5 2009.
- (Sallez et al., 2010a) Y. Sallez, T. Berger, D. Deneux, D. Trentesaux, The Life Cycle of Active and Intelligent Products: The Augmentation concept, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, n°10, pp. 905-924, 2010.
- (Sallez et al., 2010b) Y. Sallez, T. Berger, S. Raileanu, S. Chaabane, D. Trentesaux, Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, pp. 1314-1326, 2010.
- (Sallez et al., 2011) Y. Sallez, T. Berger, O. Senechal, G. Branger, D. Trentesaux, Augmentation concept for the embedded diagnosis of complex systems, In: Benyoucef L., Trentesaux D., Artiba A., Rezg N. (Ed.), International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11), I4E2, Metz, may 2011.
- (Sallez, 2012) Y. Sallez, The Augmentation Concept: How to make a Product “Active” during its Life Cycle, In: Borangiu, Thomas, Trentesaux (Ed.), Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control, studies in computational intelligence, 402, Springer, pp. 35-48, 2012.
- (Sánchez López et al., 2011a) T. Sánchez López, D.C. Ranasinghe, B. Patkai, D. McFarlane, Taxonomy, technology and applications of smart objects, *Information Systems Frontiers*, vol. 13, n°2, pp. 281-300, 2011.
- (Sánchez López et al., 2011b) T. Sánchez López, D.C. Ranasinghe, M. Harrison, D. McFarlane, Adding sense to the Internet of Things: An architecture framework for Smart Object systems, *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 16, pp. 291-308, 2011, ISSN 1617-4909.
- (Sarac et al., 2010) A. Sarac, N. Absi, S. Dauzère-Pérès, A literature review on the impact of Rfid technologies on supply chain management, *International Journal of Production Economics*, vol. 128, n°1, pp. 77-95, 2010.
- (Siegemund, 2004) F. Siegemund, A context-aware communication platform for smart objects, 2<sup>nd</sup> International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2004), pp. 69-86, 2004.
- (Shahzad et al., 2012) M.K. Shahzad, S. Hubac, A. Siadat, M. Tollenaere, MAM (mapping and alignment model) for inspection data in semiconductor industry, 12<sup>th</sup> European Advanced Process Control and Manufacturing Conference, France, 2012.
- (Shin, 2009) J.H. Shin, Decision support methods for closed-loop conceptual design, PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.
- (Smith, 1980) R.G. Smith, The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver, *IEEE Transactions on Computer*, vol. 29, n°12, pp.1104-1113, 1980.
- (Stark, 2006) J. Stark, *Product lifecycle management: 21st century paradigm for product realization*. London, Springer-Verlag, 3<sup>rd</sup> printing, ISBN: 1-85233-810-5, 2006.
- (Sterling, 2005) B. Sterling, *Shaping Things*, The MIT Press, 2005.
- (Strohbach, et al., 2004) M. Strohbach, H.W. Gellersen, G. Kortuem, C. Kray, Cooperative artefacts: Assessing real world situations with embedded technology, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3205, In: 6<sup>th</sup> International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp 2004), pp. 250-267, Nottingham, U.K., Sept. 2004.
- (Tahon et al., 1988a) C. Tahon, Y. Sallez, R. Soënen, Systèmes flexibles de production : simulation d'une structure de commande hétérarchique avec le langage ADA, ESC'88, Orlando, U.S.A., avril 1988.
- (Tahon et al., 1988b) C. Tahon, Y. Sallez, R. Soënen, Simulation of a non hierarchical manufacturing cell control with ADA, CARS&FOF'88, Michigan, U.S.A., August 1988.
- (Tahon & Trentesaux, 2001) C. Tahon, D. Trentesaux, *Aide à la décision en gestion de production*, In : Grabot & Erschler (Ed.), Organisation et gestion de production, Traité IC2, Hermès, Paris, pp. 171-218. 2001.

- (Tamayo et al., 2009) S. Tamayo, T. Monteiro, N. Sauer, Diminution des coûts de rappel de produits par la prise en compte des informations de traçabilité, 8<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, Bagnères de Bigorre, France, 10-12 juin 2009.
- (Tehrani et al., 2010) H. Tehrani, N. Sugimura K. Iwamura, Y. Tanimizu, Multi agent architecture for dynamic incremental process planning in the flexible manufacturing system, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 21, n° 4, pp. 487-499, 2010.
- (Teixeira et al., 2011) T. Teixeira, S. Hachem, V. Issarny, N. Georgantas, Service Oriented Middleware for the Internet of Things: A Perspective, Springer-Verlag, In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> European conference on Towards a service-based internet, pp. 220-229, 2011.
- (Terzi et al., 2007) S. Terzi, H. Panetto, M. Garetti, A holonic metamodel for product lifecycle management, *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 2/3, pp. 253-289, Inderscience, December 2007, ISBN1743-5110.
- (Terzi et al., 2008) S. Terzi, P.D. Ball, A. Bouras, D. Dutta, M. Garetti, B. Gurumoorthy, S. Han, D. Kiritsis, A new point of view on Product Lifecycle Management, In: Proc. of 5th International Conference on Product Lifecycle Management, Seoul, Korea, 11-13 July 2008.
- (Thomas et al., 2008) A. Thomas, T. Klein, H. ElHaouzi, S. Belmokhtar, Architecture de systèmes contrôlés par le produit pour un environnement en juste à temps, 7<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes MOSIM'08, Paris, 31 mars- 2 avril 2008.
- (Tounsi et al., 2012) J. Tounsi, G. Habchi, J. Boissiere, S. Azaiez, A multi-agent knowledge model for SMEs mechatronic supply chains, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012. DOI: 10.1007/s10845-011-0537-1.
- (Trentesaux, 2002) Pilotage hétérarchique des systèmes de production, Mémoire de HDR, Université de Valenciennes, janvier 2002.
- (Trentesaux, 2007) D. Trentesaux, Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles ?, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 9-10, pp. 1165-1202, 2007.
- (Trentesaux, 2009) D. Trentesaux, Distributed control of production systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, n°7, pp. 971-978, 2009.
- (Trentesaux et al., 2013) D. Trentesaux, C. Pach, A. Bekrar, Y. Sallez, T. Berger, P. Leitão, J. Barbosa, Benchmarking Framework and Data For Flexible Job Shop Scheduling and Control Problem, *Control Engineering Practice*, (article soumis).
- (Tursi et al., 2009) A. Tursi, H. Panetto, G. Morel, M. Dassisti, Ontological approach for Products-Centric Information System Interoperability in Networked Manufacturing Enterprises, *IFAC Annual Reviews in Control*, vol. 33, n°2, Elsevier, ISSN: 1367-5788, 2009.
- (Ueda, 2001) K. Ueda, Synthesis and emergence - research overview, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 15, n°4, pp. 321- 327, 2001.
- (Van Belle et al., 2011) J. Van Belle, B. Saint Germain, P. Valckenaers, H. Van Brussel, R. Bahtiar, D. Cattrysse, Intelligent Products in the Supply Chain Are Merging Logistic and Manufacturing Operations, Preprints of the 18<sup>th</sup> IFAC World Congress, Milano, Italy, September 2011.
- (Van Belle et al., 2012) J. Van Belle, J. Philips, O. Ali, B. Saint Germain, H. Van Brussel, P. Valckenaers, A Service-Oriented Approach for Holonic Manufacturing Control and Beyond. In: Borangiu, Thomas, Trentesaux (Ed.), *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control*, studies in computational intelligence, 402, Springer, pp. 1-10, 2011.
- (Van Brussel et al., 1998) H. Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, L. Peeters, Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in Industry*, vol. 37, n°3, pp. 255-274, 1998.
- (Ventä, 2007) O. Ventä, Intelligent products and systems, Technical Report, VTT Publications 635, 2007.
- (Verstraete et al., 2007) P. Verstraete, P. Valckenaers, H. Van Brussel, B. Saint Germain, K. Hadeli, J. Van Belle, Towards robust and efficient planning execution, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, pp. 304-314, 2007.

- (Vrba & Mařík, 2005) P. Vrba, V. Mařík, Simulation in Agent-based Control Systems: MAST Case Study, In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- (Vrba et al., 2008) P. Vrba, F. Macurek, V. Mařík, Using radio frequency identification in agent-based control systems for industrial applications, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, n°3, p. 331-342, 2008, ISSN 0952-1976.
- (Wolfram, 2002) S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, ISBN 1-57955-008-8, 2002.
- (Wong et al., 2002) C.Y. Wong, D. McFarlane, A.A. Zaharudin, V. Agarwal, The Intelligent Product Driven Supply Chain, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hammamet, Tunisia, 2002.
- (Wycisk et al., 2008) C. Wycisk, B. McKelvey, M. Hulsmann, Smart parts supply networks as complex adaptive systems: analysis and implications, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 38, n°2, pp. 108-125, 2008.
- (Zambrano Rey et al., 2011) G.M. Zambrano Rey, C. Pach, E. Adam, T. Berger, D. Trentesaux, Myopic behavior in heterarchical control of FMS. In: Benyoucef L., Trentesaux D., Artiba A., Rezg N. (Ed.), International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11), I4E2, Metz, pp. 1352-1362, mai, 2011.
- (Zambrano Rey et al., 2012) G.M. Zambrano Rey, N. Aissani, A. Bekrar, D. Trentesaux, A holonic approach to myopic behavior correction for the allocation process in flexible-job shops using recursiveness, In: Borangiu, Thomas, Trentesaux (Ed.), *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control*, studies in computational intelligence, 402, Springer, pp. 115-128, 2012.
- (Zbib, 2010) N. Zbib, Allocation et routage dynamique dans un FMS basés sur le concept de champ de potentiel. Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes, juillet 2010.
- (Zbib et al., 2012) N. Zbib, C. Pach, Y. Sallez, D. Trentesaux, Heterarchical Production Control in Manufacturing Systems Using the Potential Fields Concept, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-010-0467-3>.



## *Liste des figures*

- Figure 1. Contraintes associées au cycle de vie d'un produit
- Figure 2. Positionnement de la thématique de Recherche « Produits Intelligents / Actifs »
- Figure 3. Miniaturisation croissante des capacités de traitement (ITU, 2005)
- Figure 4. Les différents courants de Recherche (visions) associés à l'IOT extrait de (Atzori et al., 2010)
- Figure 5. : Les différents vocables associés au produit « intelligent / actif »
- Figure 6. Les différentes typologies de produits « intelligents »
- Figure 7. Typologie du CERP-IOT
- Figure 8. Trièdre de Meyer
- Figure 9. Typologie de Kawsar
- Figure 10. Typologie de Zbib
- Figure 11. Typologie de Kortuem
- Figure 12. Typologie de Salkham
- Figure 13. Positionnement introduit dans (McFarlane, 2011)
- Figure 14. Stratégie de développement des travaux de Recherche
- Figure 15. Fonctions principales et secondaires
- Figure 16. Illustration de l'activité associée au produit pour une phase donnée du cycle de vie
- Figure 17. Les différents points de vue de la modélisation
- Figure 18. Représentation du système cible augmenté, du système d'augmentation et du système de soutien externe
- Figure 19. Vue évolutionniste
- Figure 20. Exemple d'analyse d'une fonction
- Figure 21. Les classes de relations Collectif – Système de soutien
- Figure 22. Exemple de décomposition holonique
- Figure 23. Implémentation « embarquée » du système d'augmentation
- Figure 24. Implémentation « distante » du système d'augmentation
- Figure 25. Structure du cadre d'analyse
- Figure 26. Exemple d'application de cadre d'analyse au projet SURFER
- Figure 27. Interaction informationnelles proposées dans le projet PROMISE (extrait de Jun et al., 2007).
- Figure 28. Positionnement des différentes contributions nationales
- Figure 29 : Exemple de modélisation de cellule utilisant le MESAP
- Figure 30. Système d'augmentation dans le contexte manufacturier
- Figure 31. Implémentation d'un produit « actif »
- Figure 32. Changement de trajectoire en cas d'indisponibilité d'une ressource
- Figure 33. Structure supportant l'approche récursive de diagnostic
- Figure 34. Approche de diagnostic utilisée
- Figure 35. Exemples de cyber-véhicules



Figure 36. Reconfiguration d'itinéraire de PRT en présence de perturbation

Figure 37. Evolution des temps de déplacement des PRTs

Figure 38. Positionnement des différentes thématiques de Recherche envisagées

Figure 39. Descriptif de l'approche proposée

Figure 40. Implémentation des systèmes d'augmentation en distribution

## *Annexes*



## ANNEXE I - Publications et thèses

### Liste classée des publications

#### ACL - Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

- ACL 1. LEMORTELLEC A., CLARHAUT J., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2013). Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.09.008> (Impact factor = 1,665)
- ACL 2. PACH C, BEKRAR A., ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2012). An Effective Potential Field Approach to FMS Holonic Heterarchical Control. *Control Engineering Practice*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.07.005> (Impact Factor = 1,481)
- ACL 3. ZBIB N., PACH C., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2012). Heterarchical Production Control in Manufacturing Systems Using the Potential Fields Concept. *Journal of Intelligent Manufacturing*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-010-0467-3> (Impact Factor = 0,859)
- ACL 4. GIBAUD A., THOMIN P., SALLEZ Y. (2011). Foresee, a fully distributed self-organized approach for improving traffic flows. *Simulation Modelling, Practice and Theory*, 19(4), pp. 1096-1117. (Impact Factor = 0,969)
- ACL 5. BERGER T., SALLEZ Y., RAILEANU S., TAHON C., TRENTESAUX D., BORANGIU T. (2011). Personal Rapid Transit in an Open Control framework. *Computers & Industrial Engineering*, 61, pp. 300-312. (Impact Factor = 1,589)
- ACL 6. ADAM E., BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2011). Role-based manufacturing control in a Holonic Multiagent System. *International Journal of Production Research*, 49(5), pp. 1455-1468. (Impact factor = 1,115)
- ACL 7. BERGER T., SALLEZ Y., VALLI B., GIBAUD A., TRENTESAUX D. (2010). Semi-herarchical allocation and routing processes in FMS control: a stigmergic approach. *Journal of intelligent & Robotic systems*, 58 (1), pp. 17-45. (Impact factor = 0,829)
- ACL 8. MELKI A., HAMMADI S., SALLEZ Y., BERGER T., TAHON C. (2010). Advanced approach for the public transportation regulation system based on Cybercars. *RAIRO - Operations Research*, 44, pp. 85-105. (Impact factor = 0,22)
- ACL 9. SALLEZ Y., BERGER T., RAILEANU S., CHAABANE S., TRENTESAUX D. (2010). Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, pp. 1314-1326. (Impact factor = 1,665)
- ACL 10. RAILEANU S., BERGER T., SALLEZ Y., BORANGIU T., TRENTESAUX D. (2010). The open-control concept for holonic manufacturing. *International Journal of Mechanics and Control*, 11(1), pp. 13-20.
- ACL 11. SALLEZ Y., BERGER T., DENEUX D., TRENTESAUX D. (2010). The Life Cycle of Active and Intelligent Products: The Augmentation concept. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(10), pp. 905-924. (Impact factor = 1,071)
- ACL 12. SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2009). A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS. *Computers In Industry*, 60 (3), pp. 204-216. (Impact factor = 1,529)
- ACL 13. SALLEZ Y., TRENTESAUX D., BERGER T., TAHON C. (2004). Product-based and resource-based heterarchical approaches for dynamic FMS scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 46, pp. 611-623. (Impact Factor = 1,589)
- ACL 14. BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., TAHON C. (2002). Two heterarchical multiagent approaches for FMS dynamic scheduling. *Systems Analysis - Modelling - Simulation (International Journal of Systems Science)*, 42, pp. 757-758. (Impact Factor = 0,991)

## **ACLN - Articles dans des revues nationales avec comité de lecture**

- ACLN 1. BERGER T., ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2009). Active product driven control of dynamic routing in FMS. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 43(4-5), pp. 407-434.
- ACLN 2. DENEUX D., POPIEUL J-C., SALLEZ Y., BERGER T., DUPAS M. (2002). Plateau projet pédagogique en productique : Mise en œuvre d'une cellule flexible par des élèves ingénieurs. *Mécanique et Industries*, 3, pp. 129-136.
- ACLN 3. MINAUD H., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1994). Utilisation de l'outil K-SYS pour l'implantation du MESAP (Modèle d'Exploitation des Systèmes Automatisés de Production). *Automatique Productive Informatique Industrielle*, 28(5).

## **Ouvrages scientifiques (ou chapitres d'ouvrages)**

- OS 1. SALLEZ Y. (2012). The Augmentation Concept: How to make a Product "Active" during its Life Cycle. In Borangiu, Thomas, Trentesaux (Ed.), *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control, studies in computational intelligence*, 402, Springer, pp. 35-48.
- OS 2. BERGER T., SALLEZ Y., TAHON C. (2006). Bio-inspired approach for autonomous routing in FMS. In book "Manufacturing the Future: Concepts, Technologies & Visions". pp 101–124, edited by V. Kordic, A. Lazinica and M. Merdan, A.R.S. Verlag.
- OS 3. DENEUX D., SALLEZ Y., TABARY D. (2004). Implementation of an educational intelligent assembly cell. In Kopacek & Borangiu (Ed.), *Intelligent Assembly and Disassembly*, Elsevier, ISBN ISBN: 0 08 044065 7.

## **ACT - Conférences internationales avec actes et comité de lecture**

- ACT 1. PACH C., BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2012). Instantiation of the Open-Control Concept in FMS based on Potential Fields, *38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON*, Montréal, Canada, october.
- ACT 2. LE MORTELLEC A., CLARHAUT J., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2012). Embedded cooperative holarchy for diagnosing complex moving systems. Borangiu T., Dolgui A. (Ed.), *14th IFAC symposium on Information & Control problems in Manufacturing (INCOM)*, IFAC, Bucarest, Romania, mai.
- ACT 3. SALLEZ Y., BERGER T., SENECHAL O., BRANGER G., TRENTESAUX D. (2011). Augmentation concept for the embedded diagnosis of complex systems. Benyoucef L., Trentesaux D., Artiba A., Rezg N. (Ed.), *International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11)*, 14E2, Metz, pp. 1444-1453, mai.
- ACT 4. ADAM E., BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., MANDIAU R. (2010). Robustness in Adaptative Holonic Multiagent Systems: the Open-Control Concept. *10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing System (July 1-2)*, Lisbon, Portugal, juillet.
- ACT 5. ADAM E., BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2009). An open-control concept for a holonic multiagent system. V. Marik, T. Strasser, A. Zoitl (Ed.), *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing, HoloMAS 2009, LNAI 5696*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 145–154, september, ISBN 978-3-642-03666-8
- ACT 6. RAILEANU S., SALLEZ Y., BERGER T., TAHON C., TRENTESAUX D. (2009). Personal Rapid Transit in Open Control framework. *Int. Conf. On Computer & Industrial Engineering, CIE39, DOI: 10.1109/ICCIE.2009.5223753*, Troyes, 1016-1021, juillet, ISBN 978-1-4244-4136-5.
- ACT 7. SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2009). Management du cycle de vie d'un produit actif : Concept d'agent d'augmentation. *8ème Congrès international de Génie Industriel*, Bagnères De Bigorre, juin, ISBN 978-2-7466-0894-8.
- ACT 8. BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2009). Open control of FMS and its application to potential field. *42th CIRP Conference on manufacturing systems, CIRP*, Grenoble, june.
- ACT 9. RAILEANU S., SALLEZ Y., BERGER T., BORANGIU T., TRENTESAUX D. (2009). Open-control paradigm: holonic implementation. *IESM'09, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Montréal, Canada, may 13-15.

- ACT 10. RAILEANU S., BERGER T., SALLEZ Y., BORANGIU T., TRENTESAUX D. (2009). The open-control concept in a holonic manufacturing system. *18th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, Brasov, Romania, may, ISBN 978-606-521-315-9.
- ACT 11. SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2009). Open-control: a new paradigm for integrated product-driven manufacturing control. *INCOM'09, 13th IFAC Symposium on Information Control Problem in Manufacturing*, Moscow, Russia, june 3-5.
- ACT 12. ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2009). Simulation of dynamic allocation and routing in FMS using potential field. *IEEE International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling*, Beirut, Lebanon, september 27-29.
- ACT 13. TRENTESAUX D., BERGER T., SALLEZ Y. (2008). Product & resource driven control of allocation and routing process in FMS. *7ème conférence internationale francophone MOSIM'08*, Paris, France, march 31-april 2.
- ACT 14. ZBIB N., RAILEANU S., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2008). From passive products to intelligent products: The augmentation module concept. *DET2008, 5th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Nantes, France, october 22-24.
- ACT 15. DAOUD R.M., EL DAKOURY M.A., SALLEZ Y. (2007). Burst Communication for Traffic Control in Light Urban Areas. *International Workshop on Logistics and Transportation 2007, IEEE LT*, Sousse-Tunis, November.
- ACT 16. MELKI A., DUMITRESCU F., BERGER T., SALLEZ Y. (2007). Interaction des transports publics et des cybercars dans un contexte urbain. *International Workshop on Logistics and Transportation 2007, IEEE LT*, Sousse-Tunis, november.
- ACT 17. DAOUD R.M., AMER H.H., SALLEZ Y. (2006). Ethernet Based Car Control Network. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa-Canada, may 2006.
- ACT 18. DAOUD R.M., AMER H.H., ELSAYED H.M., SALLEZ Y. (2006). Fault-Tolerant On-Board Ethernet-Based Vehicle Networks. *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON*, Paris-France, november.
- ACT 19. DAOUD R.M., AMER H.H., ELSAYED H.M., EI-SOUDANI M., SALLEZ Y. (2006). Wireless Vehicle Communication for Traffic Control in Urban Areas. *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON*, Paris-France, november.
- ACT 20. SALLEZ Y, BERGER T., TAHON C. (2005). Stigmergic approach and potential field based method for intelligent routing in FMS. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2005*, Marrakech, Morocco, may 16-19.
- ACT 21. SALLEZ Y, BERGER T., TAHON C. (2005). Routage stigmergique de produits dans un système flexible de production manufacturière. *6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel (GI 2005)*, Besançon, 7-10 juin.
- ACT 22. BERGER T., SALLEZ Y., TAHON C. (2004). Dynamic FMS scheduling using ant-based control. *5th International Conference on integrated design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Bath, R-U, april.
- ACT 23. SALLEZ Y., BERGER T., TAHON C. (2004). Applications of ant-based control in intelligent manufacturing systems. *35th International Symposium on Robotics (ISR'2004)*, Paris, France, march.
- ACT 24. SALLEZ Y., BERGER T., TAHON C. (2004). Intelligent shuttles for FMS using ant-based approach. *7<sup>th</sup> IFAC Symposium on Cost Oriented Automation (COA'2004)*, Gatineau/Ottawa, Canada, june.
- ACT 25. SALLEZ Y, BERGER T., TAHON C. (2004). Simulating intelligent routing in Flexible Manufacturing Systems using NetLogo. *IEEE ICIT'04*, Hammamet, Tunisia, december.
- ACT 26. SALLEZ, Y., BERGER, T., TAHON C. (2003). Applications of virtual pheromones in FMS. *5ème congrès international de génie industriel (GI 2003)*, Québec, Canada, octobre.
- ACT 27. SALLEZ, Y., BERGER, T., TAHON C. (2003). Scheduling of large assembly cells with virtual pheromone approach, *International IFAC Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly (IAD'03)*, Bucarest, Romania, october.
- ACT 28. BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., TAHON C. (2001). Comparative study of two heterarchical multiagent approaches for FMS dynamic scheduling. *29th ICCIE (International Conf. on computers and Industrial Engineering)*, Montréal, Canada, november.

- ACT 29. POPIEUL J-C., DENEUX D., SALLEZ Y., BERGER T., DUPAS M. (2001). Teamwork in a Pedagogical Lab. on a Flexible Manufacturing Cell. *29th ICCIE (International Conf. on computers and Industrial Engineering)*, Montréal, Canada, november.
- ACT 30. BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., TAHON C. (2000). Comparison of two hierarchical multiagent approaches for fms dynamic scheduling. *WAC'2000*, Hawaii.
- ACT 31. BERGER T., CAUFFRIEZ L., DENEUX D., POPIEUL J-C., SALLEZ Y. (2000). Retour d'une expérience de pédagogie par projet : mise en œuvre intégrale d'une cellule flexible en école d'ingénieur. P. Borne, J.-p. Richard, P. Vanheeghe (Ed.), *Actes de CIFA'2000, Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, UCIS, Villeneuve D'Ascq, France, pp. 600-605, janvier, ISBN 2-9516453-0-9-1-5.
- ACT 32. DUPAS M., SALLEZ Y., BERGER T., SOËNEN R. (1999). Reconfiguration des systèmes automatisés de production. *3ème Congrès International de Génie Industriel*, Montréal, Canada, mai.
- ACT 33. MABROUK M., Y. SALLEZ Y., SOËNEN R. (1996). Toward a tool for aiding reconfiguration of production automated systems. *Computational Engineering in Systems Applications, CESA'96*, Lille, july.
- ACT 34. JACQUET L., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). An automated system specification method according to concurrent engineering concepts. *ASI'95*, Lisbonne, june 25-28.
- ACT 35. JACQUET L., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). Towards a specification procedure of operational functions for an automated system. *IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, october 22-25.
- ACT 36. JACQUET L., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). Specification procedure of an automated system. *IFAC IM'95 conference - Intelligent Manufacturing Systems*, Bucharest, Romania, october.
- ACT 37. JACQUET L., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). Towards a new specification method for an automated system. *IFIP WG 5.3 International conference on life-cycle modelling for innovative products and processes - Chapman & Hall*, Berlin, december.
- ACT 38. ROJAS J., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). Aid to decision making for the reconfiguration of automated manufacturing systems. *Intelligent Manufacturing Process & Systems*, Puerto Rico, february.
- ACT 39. MABROUK M., ROJAS J., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1993). Decision making assistance model and tools proposition for production automated systems operation. *International conference on CAD/CAM, Robotics and Autonomous Factories (INCARF 93)*, New Delhi , India, december.
- ACT 40. PARAYRE T., SOËNEN R., SALLEZ Y. (1992). Hood implementation of operating modes in automated production systems. *7th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'92*, Toronto, Canada, may.
- ACT 41. PARAYRE T., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1992). Model of the state of operation for automatized systems. *8th international IFIP WG 5.3 conference PROLAMAT'92*, Tokyo, june.
- ACT 42. PARAYRE T., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1991). Etude des cycles de vie des SAP : Vers une méthodologie de l'exploitation. *23<sup>ème</sup> CIRP, Séminaire International sur les Systèmes de Production* Nancy, juin.
- ACT 43. LEPOT P., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1989). Elaboration of an implicit programming system for assembly robot-based cell. *IFIP TC5/WG 5.3 Working Conference on robots and assembly*, Jerusalem, december.
- ACT 44. SALLEZ Y., LEPOT P., SOËNEN R. (1989). The use of the ADA language for the simulation and the control of robot-based cells. *IFIP Conference on Modeling and Simulation for Optimization of manufacturing Systems Design and Application*, Tempe, US, november.
- ACT 45. SALLEZ Y., LEPOT P., SOËNEN R. (1989). The use of the ADA language for the simulation of manufacturing cells. *Fourth International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, New Delhi, December.
- ACT 46. TAHON C., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1988). Systèmes flexibles de production : simulation d'une structure de commande hétérarchique avec le langage ADA. *ESC'88*, Orlando, avril.
- ACT 47. TAHON C., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1988). Simulation of a non hierarchical manufacturing cell control with ADA. *CARS&FOF'88*, Michigan, August
- ACT 48. SALLEZ Y., WIBAUT F., SOËNEN R. (1987). Utilisation du langage ADA pour la simulation et la conduite des cellules robotisées. *10th IASTED International Symposium Robotics & Automation*, Lugano, june.

## ACTN - Conférences nationales avec actes et comité de lecture

- ACTN 1. PACH C., BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., DENEUX D. (2012). Holo-Gen : modèle de contrôle holonique générique - mise en œuvre sur un SFP. *Actes du 13<sup>ème</sup> colloque national AIP-PRIMECA*, Le Mont Dore, mars.
- ACTN 2. PACH C., ZAMBRANO REY G-M., BERGER T., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., DENEUX D. (2011). Maitrise de la myopie des systèmes flexibles de production industriels. *Actes du 12<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA*, Le Mont Dore, mars.
- ACTN 3. RAILEANU S., ZBIB N., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2009). Du produit passif au produit actif : le concept d'augmentation. *Actes du 11<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA*, La Plagne, avril.
- ACTN 4. ZBIB N., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2009). Pilotage des systèmes de production : approche par produits actifs et champs de potentiel. *3<sup>ème</sup> Journées doctorales MACS*, Angers, mars.
- ACTN 5. LEMIEUX S., SALLEZ Y., TETREAULT M. (2003). Présentation d'un laboratoire d'enseignement en automatisation industrielle. *4<sup>ème</sup> conférence internationale sur l'automatisation industrielle*, Montréal, Canada, juin.
- ACTN 6. BERGER T., DENEUX D., POPIEUL J.C., SALLEZ Y., TABARY D. (2003). Mise en œuvre d'une cellule flexible d'assemblage en plateau projet pédagogique. *CETSI 03*, Toulouse, France, novembre.
- ACTN 7. DENEUX D., POPIEUL J-C., SALLEZ Y., BERGER T., DUPAS M. (2001). Plateau projet pédagogique en productique - mise en œuvre d'une cellule flexible par des élèves ingénieurs. *7<sup>ème</sup> Colloque national sur la conception mécanique intégrée*, La Plagne, France, avril.
- ACTN 8. MABROUK M., Y. SALLEZ Y., SOËNEN R. (1996). Vers un outil d'aide à l'exploitation des systèmes automatisés de production. *5<sup>ème</sup> congrès international de génie industriel (GI5)*, Grenoble, avril.
- ACTN 9. MINAUD H., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). Etude et évaluation des modes d'exploitation de systèmes automatisés à l'aide d'une approche orientée-objet / Application à l'A.I.P. de Valenciennes. *Club EEA - Journées "AUTOMATIQUE" - "Automatique et Expérimentation en laboratoire "*, Angers, avril.
- ACTN 10. PARAYRE T., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1991). Méthodologie de l'exploitation des systèmes automatisés de production. *3<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel (GI3)*, Tours, mars.

## Rapport de contrat de Recherche

- RAP 1. BERGER T., SALLEZ Y., TAHON C., RAILEANU S., KOLSKI C., MANDIAU R., TABARY D., HAMMADI S., MELKI A., JOLLY D. (2009). Cœur de Ville, Véhicules intelligents en environnement urbain. *Projet PPF, rapport final*, LAMIH-TEMPO, Valenciennes, juillet.

## Détail des thèses

### - Thèse de Thierry PARAYRE

Titre: Le MESAP : Vers une méthodologie de l'exploitation des systèmes automatisés de production.

Soutenue le 24 mars 1992 à Valenciennes.

Composition du jury :

- Rapporteurs : P. LADET et G. MOREL
- Examineurs : M. BITTON, J. DEFRENNE, J.P. ELLOY, Y. SALLEZ et R. SOËNEN

Liste des publications :

PARAYRE T., SOËNEN R., SALLEZ Y. (1992). Hood implementation of operating modes in automated production systems. *7th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'92*, Toronto, Canada, may.

PARAYRE T., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1992). Model of the state of operation for automatized systems. *8th international IFIP WG 5.3 conference PROLAMAT'92*, Tokyo, june.



PARAYRE T., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1991). Méthodologie de l'exploitation des systèmes automatisés de production. 3ème Congrès International de Génie Industriel, Tours, mars.

PARAYRE T., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1991). Etude des cycles de vie des SAP : Vers une méthodologie de l'exploitation. 23ème CIRP, Séminaire International sur les Systèmes de Production Nancy, juin.

#### **- Thèse de Jorge ROJAS RAMIREZ**

Titre : Etude des modes de marches des systèmes automatisés de production pour la définition des stratégies de conduite.

Soutenue le 30 janvier 1996 à Valenciennes.

Composition du jury :

- Rapporteurs : E. CRAYE et P. LHOSTE
- Examineurs : F.X. LEPOUTRE, Y. SALLEZ et R. SOËNEN

Liste des publications :

ROJAS J., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1995). Aid to decision making for the reconfiguration of automated manufacturing systems. *Intelligent Manufacturing Process & Systems*, Puerto Rico, february.

MABROUK M., ROJAS J., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1993). Decision making assistance model and tools proposition for production automated systems operation. *International conference on CAD/CAM, Robotics and Autonomous Factories (INCARF 93)*, New Delhi , India, december.

#### **- Thèse de Mohamed MABROUK**

Titre : Proposition d'une méthode et d'un outil d'aide à la reconfiguration des systèmes automatisés de production.

Soutenue le 28 mai 1996 à Valenciennes.

Composition du jury :

- Rapporteurs : JC. GENTINA et M. MOALLA,
- Examineurs : C. TAHON, J.J. LESAGE, Y. SALLEZ et R. SOËNEN

Liste des publications :

MABROUK M., Y. SALLEZ Y., SOËNEN R. (1996). Toward a tool for aiding reconfiguration of production automated systems. *Computational Engineering in Systems Applications, CESA '96*, Lille, july.

MABROUK M., Y. SALLEZ Y., SOËNEN R. (1996). Vers un outil d'aide à l'exploitation des systèmes automatisés de production. 5ème Congrès International de Génie Industriel GI5, Grenoble, avril.

MABROUK M., ROJAS J., SALLEZ Y., SOËNEN R. (1993). Decision making assistance model and tools proposition for production automated systems operation. *International conference on CAD/CAM, Robotics and Autonomous Factories (INCARF 93)*, New Delhi, India, december.

#### **- Thèse de Ramez DAOUD**

Titre : Wireless and wired Ethernet for Intelligent Transportation Systems.

Thèse soutenue le 11 décembre 2008 à Valenciennes.

Composition du jury :

- Rapporteurs : E. RONDEAU et J-M. THIRIET,
- Examineurs : T. ERNST, M. BAYART, H. AMER, Y. SALLEZ et C. TAHON

Cette thèse co-encadrée avec Christian TAHON est le fruit d'une collaboration entamée en 2005 avec l'équipe SEAD de l'Université Américaine du Caire (UAC).

### Liste des publications :

DAOUD. R.M., EL DAKOURY M.A., SALLEZ Y. (2007). Burst Communication for Traffic Control in Light Urban Areas. *International Workshop on Logistics and Transportation 2007, IEEE LT*, Sousse-Tunis, November.

DAOUD R.M., AMER H.H., SALLEZ Y. (2006). Ethernet Based Car Control Network. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa-Canada, may 2006.

DAOUD R.M., AMER H.H., ELSAYED H.M., SALLEZ Y. (2006). Fault-Tolerant On-Board Ethernet-Based Vehicle Networks. *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON*, Paris-France, november.

DAOUD R.M., AMER H.H., ELSAYED H.M., EI-SOUDANI M., SALLEZ Y. (2006). Wireless Vehicle Communication for Traffic Control in Urban Areas. *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON*, Paris-France, november.

### **- Thèse de Nadine ZBIB**

Titre : Allocation et routage dynamique dans un FMS basés sur le concept de champ de potentiel.

Thèse soutenue le 8 juillet 2010 à Valenciennes.

### Composition du jury :

- Rapporteurs : P. CASTAGNA et A. THOMAS,
- Examineurs : T. BORANGIU, H. PIERREVAL, Y. SALLEZ et D. TRENTESAUX

### Liste des publications :

PACH C, BEKRAR A., ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2012). An Effective Potential Field Approach to FMS Holonic Heterarchical Control. *Control Engineering Practice*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.07.005> (Impact Factor = 1,481)

ZBIB N., PACH C., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2012). Heterarchical Production Control in Manufacturing Systems Using the Potential Fields Concept. *Journal of Intelligent Manufacturing*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-010-0467-3> (Impact Factor = 0,859)

BERGER T., ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2009). Active product driven control of dynamic routing in FMS. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 43(4-5), 407-434.

ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D. (2009). Simulation of dynamic allocation and routing in FMS using potential field. *IEEE International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling*, Beirut, Lebanon, september 27-29.

ZBIB N., RAILEANU S., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2008). From passive products to intelligent products: The augmentation module concept. *DET2008, 5th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Nantes, France, october 22-24.

RAILEANU S., ZBIB N., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2009). Du produit passif au produit actif : le concept d'augmentation. *11ème Colloque National AIP PRIMECA*, La Plagne, avril.

### **- Thèse d'Antoine LE MORTELLEC**

Titre : Proposition d'une architecture de surveillance « active » à base d'agents intelligents – Application à la maintenance prédictive dans le domaine ferroviaire

La thèse, financée via le projet FUI SURFER, devrait être soutenue au dernier trimestre 2013.

### Liste des publications :

LE MORTELLEC A., CLARHAUT J., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2012). Embedded cooperative holarchy for diagnosing complex moving systems. Borangiu T., Dolgui A. (Ed.), 14th IFAC symposium on Information & Control problems in Manufacturing (INCOM), IFAC, Bucarest, Romania, mai.

LE MORTELLEC A., CLARHAUT J., SALLEZ Y., BERGER T., TRENTESAUX D. (2013). Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, DOI : 10.1016/j.engappai.2012.09.008



## ANNEXE II - Exemples de flux d'informations amont et aval

(extrait de (Jun et al., 2007))

Information flow	Category	Main data
Forward		
BOL to MOL	BOM information	Product ID, product structure, part ID, component ID, product/part/component design specification, etc.
	Information for maintenance/service	Spare part ID list, price of spare part, maintenance/service instructions, etc.
	Production information	Assemble/disassemble instruction, production specifications, production history data, production routing data, production plan, inventory status, etc.
BOL to EOL	Product information	Material information, BOM, part/component cost, disassemble instruction, assembly information for remanufacturing, etc.
	Production information	Production date, lot ID, production location, etc.
MOL to EOL	Maintenance history information	Number of breakdowns, parts/components' IDs in problem, installed date, maintenance engineers' IDs, list of replaced parts, aging statistics after substitution, maintenance cost, etc.
	Product status information	Degree of quality of each component, performance definition, etc.
	Usage environment information	Usage condition (e.g., average humidity, internal/external temperature), user mission profile, usage time, etc.
	Updated BOM	Updated BOM by repairing or changing parts and components, etc.
Backward		
MOL to BOL	Maintenance and failure information for design improvement	Ease of maintenance/service, reliability problems, maintenance date, frequency of maintenance, MTBF, MTTR, failure rate, critical component list, root causes, etc.
	Technical customer support information	Customer complaints, customer profiles, response, etc.
	Usage environment information	Usage condition (e.g., average humidity, internal/external temperature), user mission profile, usage time, etc.
EOL to MOL	Recycling/reusing part or component information	Reuse part or component, remanufacturing information, quality of remanufacturing, part or component, etc.
EOL to BOL	EOL product status information	Product/part/component life-time, recycling/reuse rate of each component or part, etc.
	Dismantling information	Ease to disassemble, Reuse or recycling value, disassembly cost, remanufacturing cost, disposal cost, etc.
	Environmental effects information	Material recycle rate, environmental hazard information, etc.



## ANNEXE III - Bref état de l'art sur les typologies de collectifs

Un des points clef de notre thématique de Recherche réside en la prise en compte des relations existant au sein d'un collectif de produits « actifs ». Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés aux typologies proposées par différentes communautés. Nous présentons ci-dessous les principales typologies utilisées en Sociologie, dans le domaine des systèmes multi-agents et en robotique mobile.

### Typologies issues du domaine du Management et de la Sociologie

Beaucoup d'études ont été menées dans le domaine des sciences Humaines et Sociales et du Management des entreprises pour caractériser les différents collectifs. Les typologies suivantes sont parmi les plus connues :

- **Typologie de Mintzberg** : En étudiant les différents types d'organisation d'entreprises, Mintzberg (1979) a identifié trois processus fondamentaux de coordination :
  - o Coordination par ajustements mutuels : Forme de coordination dans laquelle les individus s'accordent pour partager des ressources en vue d'atteindre un but commun : aucun individu n'a d'emprise sur les autres individus, et le processus de décision est conjoint.
  - o Coordination par leadership / supervision directe : Une relation de hiérarchie existe entre les individus : un contrôle est exercé par certains individus sur les autres.
  - o Standardisation : Des procédures ou règles sont prédéfinies en vue de gérer des situations d'interaction particulières, notamment pour limiter les conflits.
- **Typologie de Fiske** : Dans (Fiske, 1992), le sociologue met en évidence 4 formes de base permettant de caractériser les relations entre personnes ou organisations :
  - o Echange marchand (*Market Pricing*) (relation orientée en fonction de rapports significatifs socialement, c'est-à-dire dont la valeur est reconnue).
  - o Echange autoritaire (*Authority ranking*) (relation asymétrique, avec dominant(s) et dominé(s)).
  - o Echange égalitaire (*Equality matching*) (relation où chaque partie veut maintenir ou restaurer l'équilibre entre parties).
  - o Partage communal (*Communal sharing*) (relation de respect et de partage où chaque partie est l'équivalente d'une autre).

### Typologies issues du domaine des SMA (Systèmes Multi-agents)

De par la nature même de son champ d'études, la communauté œuvrant dans le domaine des systèmes multi-agents a proposé des typologies à fin de caractériser les interactions entre agents. Les typologies les plus significatives sont décrites ci-après :

- **Typologie de Ferber (1995)** : Ferber (1995) propose une typologie tenant compte de :
  - o de la compatibilité des buts des agents,
  - o de la disponibilité des ressources,
  - o de la compétence des agents.

La combinaison des différentes possibilités donnent 8 classes d'interactions résumées dans la table A-1 suivante :

Table A-1. les différentes classes d'interactions selon FERBER

Buts	Ressources	Compétences	Types de situation	Remarques
compatibles	suffisantes	suffisantes	<i>indépendance</i>	situation d'indifférence
compatibles	suffisantes	insuffisantes	<i>collaboration simple</i>	situations de coopérations
compatibles	insuffisantes	suffisantes	<i>emcombement</i>	
compatibles	insuffisantes	insuffisantes	<i>collaboration coordonnée</i>	
incompatibles	suffisantes	suffisantes	<i>compétition individuelle pure</i>	situations d'antagonismes
incompatibles	suffisantes	insuffisantes	<i>compétition collective pure</i>	
incompatibles	insuffisantes	suffisantes	<i>conflits individuels pour des ressources</i>	
incompatibles	insuffisantes	insuffisantes	<i>conflits collectifs pour des ressources</i>	

- **Typologie de Franklin :** Dans (Doran et al., 1997), les auteurs proposent une typologie de la coopération dans les SMA décrite par la figure A-1.  
 Au niveau de la racine Franklin classe les SMA en deux branches: « indépendant » si chaque agent poursuit son propre agenda indépendamment des autres et « Coopératif », si l'agenda de l'agent inclut une certaine coopération avec d'autres agents.
  - o La classe « communicant » regroupe les systèmes où les agents coopèrent par le biais de messages intentionnels. Cette communication peut prendre l'une des deux formes : « délibératif » ou « par négociation ». Au sein de systèmes délibératifs, les agents planifient conjointement les actions qu'ils prennent, comportant (ou non) des actions conjointes de coopération. Les systèmes à base de négociation impliquent aussi une communication au niveau de la planification, mais les agents peuvent faire des offres en concurrence les uns contre les autres pour obtenir les meilleurs profits pour eux-mêmes.
  - o La classe « non communicants » regroupe les systèmes au sein desquels les agents coopèrent en observant et en réagissant aux comportements des autres agents.

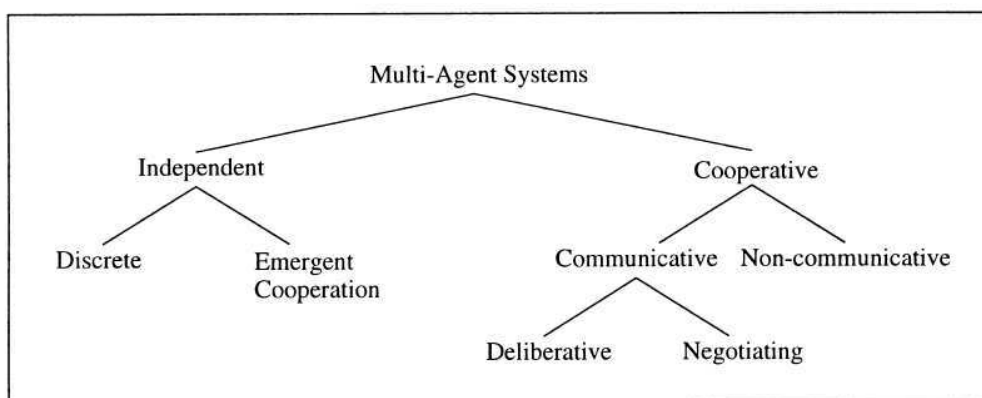


Figure A-1. Typologie de Franklin

- **Typologie de Parunak :** Dans (Parunak et al., 2004), les auteurs proposent de classifier les interactions entre agents selon table A-2 ci-après, en mettant l'accent sur les différents types de communication possibles.

Table A-2. Typologie de Parunak

		Topology of Inter-Agent Relationships	
		Centralized (between Distinguished and Subordinate agents)	Decentralized (among Peer agents)
Information Flow	Direct (messages between agents)	<i>Construction</i> (Build-Time) <i>Command</i> (Run-time)	<i>Conversation</i>
	Indirect (non-message interaction)	<i>Constraint</i>	<i>Stigmergy</i> <sup>2</sup> (generic) <i>Competition</i> (limited resources)

### Typologies issues du domaine de la Robotique mobile

Dans le domaine de la Robotique mobile, l'intérêt d'une typologie des collectifs a été très vite ressenti. Parmi les travaux les plus marquants de cette communauté, nous pouvons citer :

- **Typologie de Dudek :** Dans (Dudek et al., 1996), les auteurs introduisent une classification fondée sur les propriétés (physiques et fonctionnelles) du collectif. Les principales caractéristiques retenues sont : la taille du collectif, la portée et le type de communication, l'hétérogénéité, la reconfigurabilité...

Cette typologie, plutôt descriptive, ne permet pas d'identifier de grandes classes de coopération / collaboration.

- **Typologie de Farinelli :** Dans (Farinelli, et al., 2004), une taxonomie sur 4 niveaux (coopération, connaissance, coordination et organisation) est présentée (figure A-2) :

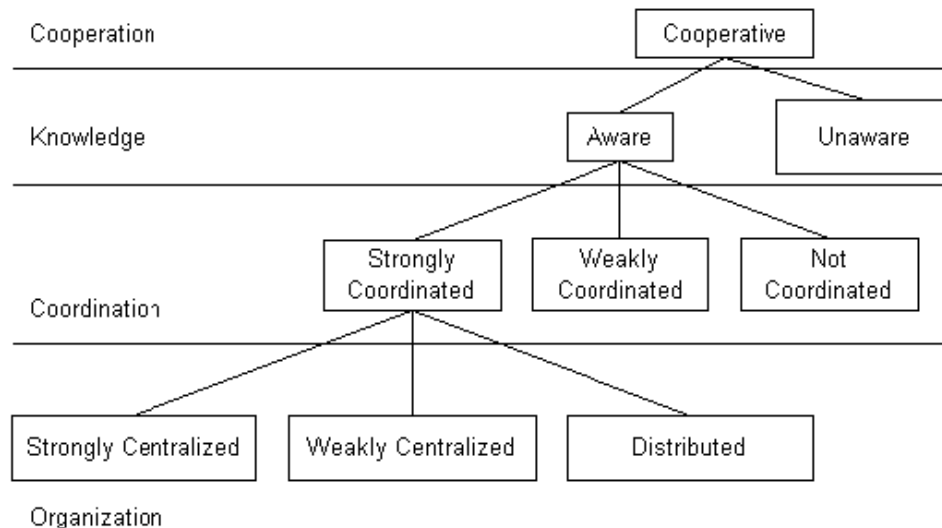


Figure A-2. Typologie de Farinelli

- o Le premier niveau de la taxonomie est relatif à la capacité du collectif à coopérer en vue d'accomplir une tâche spécifique.
- o Le deuxième niveau concerne la connaissance de ses co-équipiers, dont chaque robot dispose. Les systèmes « aware » ont une connaissance plus ou moins approfondie des autres membres du collectif.
- o Le niveau « coordination » s'intéresse aux mécanismes utilisés pour la coopération. La Coordination est vue en tant que "coopération dans laquelle les actions réalisées par chaque agent robotique prend en compte les actions exécutées par les autres agents robotiques de telle sorte que les performances globales soient améliorées ». Différents modes de



coordination existent, en fonction de l'utilisation d'un protocole de coordination explicite, (règles que les robots doivent suivre afin d'interagir). Une coordination forte (faible) repose (ou non) sur un protocole de coordination.

- le quatrième niveau de la structure hiérarchique s'intéresse à l'aspect organisation de la décision en distinguant approches centralisées et distribuées.
- **Typologie de Parker :** Dans (Parker, 2008), l'auteur distingue 4 types d'interactions : Collective, Coopérative, Collaborative et Coordinative. Cette typologie, représentée par la figure A-3, tient compte :
  - du type de but (individuel ou partagé),
  - du niveau de connaissance qu'un robot possède sur les autres robots,
  - du fait que l'action du robot fait avancer ou nuit aux buts des autres robots.
- Dans l'interaction « Collective », les entités ne sont pas conscientes des autres entités de l'équipe, mais ils partagent les mêmes objectifs, et leurs actions sont bénéfiques à leurs coéquipiers.
- Le deuxième type d'interaction est l'interaction « Coopérative » : les entités sont conscientes des autres entités, partagent les objectifs, et leurs actions sont bénéfiques à leurs coéquipiers.
- Dans le troisième type d'interaction « Collaborative », les robots ont des objectifs individuels, ils sont conscients de leurs coéquipiers mais leurs actions ne font pas avancer les objectifs des autres.
- Le quatrième type d'interaction « Coordinative » est représentative de situation où les entités sont conscientes les unes des autres, mais ne partagent pas un objectif commun, et dont les actions ne sont pas utiles aux autres membres de l'équipe.

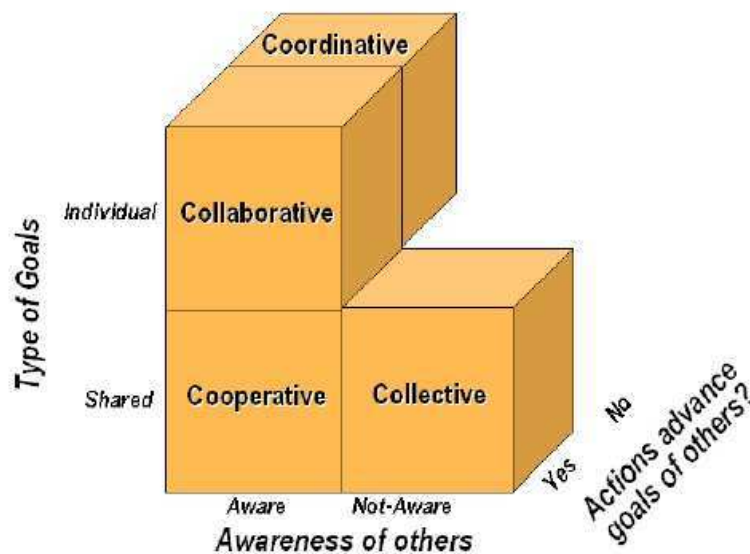


Figure A-3. Typologie de Parker

## ANNEXE IV - Liste des projets Européens du volet ITC dans le domaine du Produit « Intelligent / Actif »

(extrait de (CERP-IOT, 2010))

Acronym	Project Title	Coordinator
AMI-4-SME www.ami4sme.org	Ambient Intelligence Technology for Systemic Innovation in Manufacturing SMEs	Harald Sundmaeker sundmaeker@atb-bremen.de ATB, Germany
ASPIRE www.fp7-aspire.eu	Advanced Sensors and lightweight Programmable middleware for Innovative RFID Enterprise applications	Prof.Dr. Neeli R.Prasad np@es.aau.dk CTIF Aalborg, Denmark
BRIDGE www.bridge-project.eu	Building Radio frequency Identification solutions for the Global Environment	Henri Barthel henri.barthel@gs1.org GS1
CASAGRAS www.rfidglobal.eu	Coordination and Support Action (CSA) for Global RFID-related Activities and Standardisation	Ian Smith ian@aimuk.org AIM UK
CASCADAS www.cascadas-project.org	Component-ware for Autonomic Situation-aware Communications, and Dynamically Adaptable Services	Antonio Manzalini antonio.manzalini@telecomitalia.it Telecom Italia - Future Centre
CE-RFID http://www.rfid-in-action.eu/	Coordinating European Efforts for Promoting the European RFID Value Chain	Dr. Gerd Wolfram gerd.wolfram@mgi.de METRO Group, Germany
CoBIs www.cobis-online.de	Collaborative Business Items	Stephan Haller stephan.haller@sap.com SAP, Switzerland
CONFIDENCE www.confidence-eu.org	Ubiquitous Care System to Support Independent Living	Igone Velez ivelez@ceit.es CEIT, Spain
CuteLoop www.cuteloop.eu	Customer in the Loop: Using Networked Devices enabled Intelligence for Proactive Customers Integration as Drivers of Integrated Enterprise	Harald Sundmaeker sundmaeker@atb-bremen.de ATB, Germany
ETP EPoSS www.smart-systems-integration.org	European Technology Platform on Smart Systems Integration	Alessandro Bassi alessandro.bassi@Hitachi-eu.com Hitachi Europe
DACAR www.dacar.org.uk/	Data Capture and Auto Identification Reference Project	Dr. Christoph Thuemmler c.thuemmler@napier.ac.uk Chelsea and Westminster NHS Foundation Trust, London
DiYSE www.dyse.org/	DiY Smart Experiences, Creating smart experiences on the Web of Things	Marc Roelands marc.roelands@alcatel-lucent.com Bell Labs, Alcatel-Lucent, Belgium
Dynamite dynamite.vtt.fi/	Dynamic Decisions in Maintenance	Kenneth Holmberg kenneth.holmberg@vtt.fi VTT, Finland
EU-IFM www.ifm-project.eu	Interoperable Fare Management Project	John Verity compliance@itso.org.uk ITSO Limited
EURIDICE www.univiu.org/projects/euridice/	European Inter-Disciplinary Research on Intelligent Cargo for Efficient, Safe and Environment-Friendly Logistics	Paolo Paganelli paolo.paganelli@insiel.it Insiel, Italy
FIA/RWI www.rwi.future-internet.eu	Future Internet Assembly: Real World Internet	Alex Gluhak a.gluhak@surrey.ac.uk University of Surrey, UK
GRIFS www.grifs-project.eu	Global RFID Interoperability Forum for Standards	Stephane Pique stephane.pique@gs1eu.org GS1, Belgium

<b>Acronym</b>	<b>Project Title</b>	<b>Coordinator</b>
HYDRA www.hydramiddleware.eu	Heterogeneous physical devices in a distributed architecture	Markus Eisenhauer markus.eisenhauer@fit.fraunhofer.de Fraunhofer FIT
IMS2020 www.ims2020.net	Intelligent Manufacturing System 2020	Dr. Dimitris Kiritsis dimitris.kiritsis@epfl.ch EPFL, Lausanne
INDISPUTABLE KEY www.indisputablekey.com	Intelligent distributed process utilization and blazing environmental key	Richard Uusijärvi richard.uusijarvi@sp.se SP, Sweden
iSURF www.isurfproject.eu	An Interoperability Service Utility for Collaborative Supply Chain Planning across Multiple Domains Supported by RFID Devices	Asuman Dogac asuman@srhc.metu.edu.tr METU, Turkey
LEAPFROG www.leapfrog-eu.org	Leadership for European Apparel Production From Research along Original Guidelines	Dieter Stellmach dieter.stellmach@ditf-denkenhof.de euratex, Belgium
PEARS Feasibility www.friendlytechnologies.eu	Privacy and Security Ensuring Affordable RFID System: Technical and Commercial Feasibility	Humberto Moran hmoran@friendlytechnologies.eu Friendly Technologies
PrimeLife www.primelife.eu	Bringing sustainable privacy and identity management to future networks and services	Dieter Sommer DSO@zurich.ibm.com IBM Zurich
PRIME	Privacy and Identity Management for Europe	Marit Hansen prime@datenschutzzentrum.de ULD, Germany
PROMISE www.promise.no	Product orientated manufacturing systems including RFID technology	Dr. Dimitris Kiritsis dimitris.kiritsis@epfl.ch EPFL, Lausanne
RACE net-workRFID www.race-networkrfid.eu	ICT PSP European RFID Thematic Network (Call2) : Raising Awareness and Competitiveness on RFID in Europe	Philippe Rohou philippe.rohou@ercim.org ERCIM, France
SMART www.smart-rfid.eu	Intelligent Integration of Supply Chain Processes and Consumer Services based on Unique Product Identification in a Networked Business Environment	Dr. Antonis Ramfos antonis.ramfos@intrasoft-intl.com Intrasoft, Belgium Dr. Katerina Pramadari k.pramadari@aueb.gr Athens University
SMMART www.smmart.eu	System for Mobile Maintenance Accessible in Real Time	Jean-Louis Boucon jean-louis.boucon@turbomeca.fr TURBOMECA, France
StoLPaN www.stolpan.com	Store Logistics and Payment with NFC	András Vilmos Vilmos@stolpan.com Motorola, Hungary
SToP www.stop-project.eu	Stop tampering of products	Harald Vogt harald.vogt@sap.com SAP, Germany
TraSer www.traser-project.eu	Identity-based Tracking and Web-Services for SMEs	Zsolt Kemeny kemeny@sztaki.hu SZTAKI, Hungary
WALTER www.walter-uwv.eu	Wireless Alliances for Testing, Experiment and Research	Franck Le Gall F.le-gall@inno-group.com Inno