



HAL
open science

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

Nadine Zbib

► **To cite this version:**

Nadine Zbib. Allocation et routage dynamique dans un FMS basés sur le concept de champ de potentiel. Informatique [cs]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2010. Français. NNT: . tel-00553003

HAL Id: tel-00553003

<https://theses.hal.science/tel-00553003>

Submitted on 6 Jan 2011

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 : 10/20

Thermique
Ecoulement
Mécanique
Matériaux
Mise en Forme
PrOduction



Thèse

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

Préparée au Laboratoire TEMPO

Laboratoire Thermique Ecoulement Mécanique Matériaux Mise en Forme Production
Equipe PSI (Production, Services, Information)

Discipline : Automatique

Spécialité : Automatique et Génie Informatique

08/07/2010

NADINE ZBIB

**Allocation et routage dynamique dans un FMS
basés sur le concept de champ de potentiel**

Devant le jury composé de :

Pierre CASTAGNA	Pr. à l'Institut Universitaire de Technologie de Nantes	Rapporteur
André THOMAS	Pr. à l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois de Nancy	Rapporteur
Henri PIERREVAL	Pr. à l'Institut Français de Mécanique Avancée de Clermont-Ferrand	Examineur
Theodor BORANGIU	Pr. A l'Université Polytechnique de Bucarest	Examineur
Damien TRENTESAUX	Pr. à l'Université de Valenciennes et de Hainaut-Cambrésis	Directeur de thèse
Yves SALLEZ	Maitre de conférences à l'Université de Valenciennes et de Hainaut-Cambrésis	Co-encadrant

« Nul ne peut atteindre l'aube sans passer par le chemin de la nuit »

JuBran Khalil Jubran

Remerciements

**Pour mes parents,
et mes frères,
pour leur soutien tout au long de ces trois années,
pour leurs encouragements.**

A mon pays Le Liban.

Je tiens à saluer ici les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat. Ces remerciements sont rédigés dans un moment de doux relâchement intellectuel, sans véritable rigueur ni souci taxinomique. J'ai laissé au hasard de ma mémoire, plus impressionnée par les événements récents, répétés, ou chargés d'émotions, le soin de retrouver ses personnes. Dans un autre état d'esprit, ces remerciements auraient certainement été tous autres, et j'aurais peut-être oublié un des noms qui suivent. Mais j'ai choisi ce moment précis pour les écrire.

*Le travail de thèse financé par le ministre français a été effectué au Laboratoire d'Automatique Industrielles et Humaines de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, au sein de l'équipe PSI dirigée par le professeur **Christian Tahon**. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.*

*Tout d'abord, mes remerciements s'adressent aux personnes qui m'ont proposé le sujet de thèse et qui m'ont encadré tout au long de ces années d'étude: **M. Damien Trentesaux et M. Yves Sallez**. A travers de nos discussions, ils m'ont apporté une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet. Je salue aussi la souplesse et l'ouverture d'esprit de mes directeurs de thèse qui ont su me laisser une large marge de liberté pour mener à bien ce travail de recherche.*

*Je tiens tout particulièrement à exprimer toute ma reconnaissance et mes vifs remerciements à Monsieur **Henri Pierreval** qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse de doctorat, et à Monsieur **Theodor Borangiu** pour son acceptation de venir de l'étranger pour assister à ma soutenance.*

*J'ai été également très sensible à l'honneur que m'ont fait Monsieur **Pierre Castagna** et Monsieur **André Thomas** d'avoir accepté le rôle de rapporteur, d'autant que je dois reconnaître que je ne leur ai pas facilité la tâche.*

Il me tient à cœur de remercier l'équipe PSI, pour leur accueil.

J'en viens maintenant à ceux qui font un travail de fond, tellement important: mes proches. Merci à tous les membres de ma famille (ma mère Najat, mon père Nabil, mes frères: Nassim, Houssein et Jamil) pour leur soutien sans faille. Leur contribution secrète n'en a pas moins été essentielle depuis toujours, surtout pendant la période fastidieuse de la rédaction. Penser à eux et leur parler m'a offert des pauses à intervalles réguliers pour lever le nez du guidon!

Enfin, ...Merci à vous tous.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
TABLE DES FIGURES	v
TABLE DES TABLEAUX	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : PILOTAGE HETERARCHIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION	4
1. Introduction	4
2. Contexte général.....	5
2.1. Contraintes externes associées aux systèmes de production.....	5
2.1.1. Diversité des produits et personnalisation de masse	5
2.1.2. Cycle de vie et traçabilité du produit.....	6
2.1.3. Perturbations externes affectant le système de production.....	7
2.2. Impact des contraintes externes	7
3. Agilité des systèmes de production.....	7
3.1. Concept d’agilité.....	8
3.2. Caractéristiques internes associées à un système agile.....	9
3.2.1. Accroissement de la réactivité.....	9
3.2.2. Accroissement de la fiabilité	10
3.2.3. Tolérance aux défauts et Reconfigurabilité	10
4. Système de pilotage.....	10
4.1. Concept de pilotage.....	10

4.2.	Fonctions du système de pilotage	11
5.	Approches de pilotage hétérarchique	13
5.1.	Concept d' hétérarchie et architectures de pilotage associées	13
5.2.	Approches de modélisation.....	16
5.2.1.	Les approches bio-inspirées et bioniques	16
5.2.2.	Les approches à base d'agents.....	17
5.2.3.	L'approche holonique.....	18
5.3.	Les modalités d'interaction.....	19
5.3.1.	Le contract-net.....	19
5.3.2.	La stigmergie	20
5.3.3.	Le blackboard (tableau noir).....	21
5.3.4.	Les champs de potentiel	22
5.4.	Bref état de l'art relatif aux différentes approches de modélisation et d'interaction 22	
6.	Contexte scientifique et définition de notre problématique	24
7.	Conclusion.....	26
CHAPITRE II : CHAMP DE POTENTIEL : ÉTAT DE L'ART ET PROPOSITION D'UN MODELE POUR L'ALLOCATION ET LE ROUTAGE.....		27
1.	Introduction	27
2.	Etat de l'art sur le concept de champ de potentiel.....	28
2.1.	Exemples d'applications des champs de potentiel.....	28
2.2.	Analyse	31
2.3.	Synthèse	33
3.	Spécifications associées au modèle de champ de potentiel.....	34
3.1.	Contexte applicatif.....	34
3.2.	Approche de modélisation	35
4.	Modèle de champs de potentiel proposé	36
4.1.	Modèle associé à l'approche hétérarchique utilisant les champs de potentiel.....	36
4.1.1.	Modélisation des produits.....	36
4.1.2.	Modélisation des champs de potentiel associés aux ressources	37
4.1.3.	Choix de la ressource.....	42
4.2.	Comportement associé au produit.....	43
5.	Conclusion.....	46

CHAPITRE III : PROPOSITION D’UN MODELE DU PRODUIT ACTIF	48
1. Introduction	48
2. Typologie du produit actif/intelligent	49
3. Etat de l’art sur les produits actifs/intelligents dans le domaine manufacturier.....	53
3.1. Différents concepts du produit intelligent/actif	54
3.2. Synthèse de l’état de l’art.....	60
3.3. Spécifications	61
4. Notre proposition de produit « actif »	61
4.1. Concept de produit « actif ».....	61
4.2. Système cible	62
4.3. Notion de système d’augmentation.....	64
4.4. Vue organique du système cible augmenté.....	64
4.5. Approches d’implémentation du système d’augmentation.....	66
4.5.1. Système d’augmentation embarqué.....	67
4.5.2. Système d’augmentation « distant ».....	67
5. Conclusion.....	68
CHAPITRE IV : VALIDATION PAR SIMULATION DE L’APPROCHE DE PILOTAGE.....	69
1. Introduction	69
2. Environnement de simulation.....	70
2.1. Netlogo.....	70
2.2. Interface graphique du simulateur	71
3. Etude de cas.....	72
3.1. Benchmark (Trentesaux et al., 2000).....	72
3.2. Description détaillée du cas d’étude	73
3.2.1. Description de la cellule flexible de production.....	73
3.2.2. Données expérimentales	74
3.3. Modèle Netlogo	76
3.3.1. Modélisation des nœuds	77
3.3.2. Modélisation du produit.....	78
3.3.3. Interface « utilisateur ».....	79
3.4. Limitation de la comparaison avec le Benchmark de référence	80
3.4.1. Introduction des produits dans le système de production.....	80

3.4.2.	Temps de transport	80
4.	Résultats expérimentaux avec Netlogo	81
4.1.	Les scénarii étudiés	81
4.1.1.	Scénario n°1 : Optimalité	81
4.1.2.	Scénario n°2 : Robustesse face à une indisponibilité des ressources dès le début de la production	83
4.1.3.	Scénario n°3 : Comportement évolutif et réaliste.....	84
4.1.4.	Scénario n°4 : Impact du temps de transport.....	84
4.1.5.	Scénario n°5 : Robustesse face à une indisponibilité des ressources en cours de production.....	86
4.2.	Interprétation des résultats	87
5.	Conclusion.....	88
CHAPITRE V : IMPLEMENTATION DE L'APPROCHE DE PILOTAGE.....		89
1.	Introduction	89
2.	Présentation de la cellule flexible.....	90
2.1.	Instrumentation du produit actif de type PDL_IE.....	91
2.2.	Instrumentation des nœuds	91
3.	Implémentation des approches sur la cellule.....	93
3.1.	Approche par « champs de potentiel ».....	93
3.2.	Approche concurrente utilisant le protocole Contract-net.....	95
4.	Expérimentations.....	98
4.1.	Protocole expérimental	98
4.1.1.	Données descriptives des ressources et des services	98
4.1.2.	Données descriptives des PDL_IE	98
4.2.	Résultats expérimentaux	99
4.2.1.	Scénario n°1 : Fonctionnement normal	100
4.2.2.	Scénario n°2 : Robustesse aux perturbations.....	108
4.3.	Interprétation des résultats	110
5.	Conclusion.....	112
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		113
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		117

TABLE DES FIGURES

Figure 1- Personnalisation d'une voiture lors d'une commande à partir d'un site Web.....	6
Figure 2- Fonctions d'un système de pilotage à court terme	12
Figure 3- Exemple de graphe d'influence	14
Figure 4- Architecture hétérarchique	14
Figure 5- Illustration de la typologie des systèmes de contrôle	15
Figure 6- Système manufacturier bionique	17
Figure 7- Système multi-agents.....	18
Figure 8- Système holonique.....	18
Figure 9- Protocole contract-net.....	20
Figure 10- Evolution des phéromones	21
Figure 11- Principe du Blackboard	21
Figure 12- Un robot attiré par son but et repoussé par deux obstacles (Ferber, 1995)	28
Figure 13- Variation du champ de potentiel.....	32
Figure 14- Interaction entre les entités en 2D	33
Figure 15- Evolution de l'attractivité de R_j avec le temps	40
Figure 16- Un exemple de la distance calculée.....	41
Figure 17- Champs émis par des ressources pour des services spécifiques en 1D	43
Figure 18- Comportement associé au produit	45
Figure 19- Approche holonique pour le produit actif (Zbib et al., 2008)	52
Figure 20- les différents axes de notre typologie	53

Figure 21- Produit actif (Brun picard et al., 1997).....	54
Figure 22- Positionnement du produit actif.....	54
Figure 23- Produit intelligent avec un agent de décision (McFarlane et al., 2002)	55
Figure 24- Positionnement du Produit Informationnel de Macfarlane	56
Figure 25- Objet pointeur vers un système d'information (Bajic, 2004).....	57
Figure 26- Objet demandeur et fournisseur des services (Bajic, 2004)	57
Figure 27- Mediacup (Beigl et al., 2001).....	58
Figure 28- Représentation des objets communicants (Bajic, 2004).....	58
Figure 29- Objets communicants de Cea Ramirez.....	59
Figure 30- Produit actif dans un environnement d'intelligence ambient (Dobre et Bajic, 2008).....	59
Figure 31- Positionnement du produit « actif » défini par Dobre	60
Figure 32- Vue schématique du "produit actif"	62
Figure 33- Représentation des fonctions, système cible et système de soutien	63
Figure 34- Représentation du système cible augmenté, du système d'augmentation et du système de soutien externe	64
Figure 35- Système d'augmentation et Système cible augmenté.....	65
Figure 36- Implémentation embarqué du système d'augmentation.....	67
Figure 37- Implémentation du système d'augmentation à distance.....	68
Figure 38- Positionnement du produit « PDL_IE »	70
Figure 39- Interface Netlogo	72
Figure 40- Topologie de la cellule flexible	74
Figure 41- Le modèle NetLogo du FMS utilisé.....	77
Figure 42- Variables et paramètres d'un nœud service.....	78
Figure 43- Variables et paramètres associés à un produit.....	79
Figure 44- Interface de simulation	80
Figure 45- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°1 (simulation n°6)	82
Figure 46- Diagramme deGantt obtenu pour le scénario n°2.....	83
Figure 47- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°3.....	84
Figure 48- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°4 (avec les temps de transport)	85
Figure 49- Evolution du makespan selon les valeurs du coefficient α	86

Figure 50- Diagramme de Gantt obtenu pour le scenario n°5.....	87
Figure 51- La cellule d'assemblage flexible	90
Figure 52- Instrumentation associée à un produit « actif ».....	91
Figure 53- Distribution des différents Wagos	92
Figure 54- Communication produit/nœud.....	94
Figure 55- Détails de l'architecture de commande pour les WAGOs w3 et w4.....	95
Figure 56- Processus d'allocation et de routage.....	96
Figure 57- Interactions entre produit actif et contrôleur de nœud.....	97
Figure 58- Introduction des PDL_IE.....	100
Figure 59- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du premier service ...	101
Figure 60- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du deuxième service.....	101
Figure 61- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du dernier service ...	102
Figure 62- Gantt relatif au scénario n°1 (approche contract-net).....	103
Figure 63- Introduction des PDL_IE.....	104
Figure 64- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du premier service ...	105
Figure 65- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du deuxième service.....	106
Figure 66- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du deuxième service.....	107
Figure 67- Gantt-scénario 1- champ de potentiel.....	108
Figure 68- Changement de trajectoire en cas d'indisponibilité des ressources.....	108
Figure 69- Impact de la disponibilité des ressources avec contract-net.....	109
Figure 70- Impact de la disponibilité des ressources avec le champ de potentiel.....	110
Figure 71- Evolution du makespan pour les deux scénarii	111

TABLE DES TABLEAUX

Tab. 1 Tableau résumant les différents travaux	24
Tab. 2 Tableau des domaines applicatifs	31
Tab. 3 Liste de défaillances avec comportements du produit correspondant.....	46
Tab. 4 Données d'entrée (pour la simulation)	76
Tab. 5 Valeur de makespan pour les 6 simulations.....	82
Tab. 6 Données d'entrée (pour l'implémentation).....	99

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte de plus en plus compétitif, les entreprises ont besoin d'adapter et d'optimiser leurs outils industriels en vue d'assurer leur pérennité. De plus, les exigences de productivité sont accrues pour faire face à une concurrence de plus en plus importante due à la mondialisation des échanges. Cette concurrence conduit les entreprises à développer de nouveaux services comme la personnalisation des produits et à devoir assurer une traçabilité des produits tout au long de leur cycle de vie.

Ces enjeux se répercutent au niveau des systèmes de pilotage des systèmes de production. Les besoins de réactivité, de flexibilité et de productivité se traduisent par une complexité accrue de ces systèmes de pilotage. Pour répondre à ces exigences, le pilotage de la production doit combiner des qualités d'efficacité, permettant de maintenir une haute productivité, et d'agilité, permettant d'appréhender la forte variété des produits et l'incertitude de l'environnement (Bousbia, 2006).

Les travaux présentés dans cette thèse se situent à la croisée de deux thématiques présentes dans notre équipe de Recherche : le développement d'architecture de pilotage hétéroarchitecturales et le développement de produits « actifs » dans un contexte d'intelligence ambiante.

Nous proposons dans cette thèse une approche de pilotage hétéroarchitectural à base de champs de potentiel exploitant les capacités décisionnelles des produits « actifs » circulant dans le système de production. Cette approche s'attachera à résoudre conjointement deux

problématiques courantes dans les systèmes de production : l'allocation des tâches aux différentes ressources et le routage des produits vers ces ressources.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres s'articulant selon le plan suivant :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du contexte et des problématiques associées à notre étude. Après une description des nombreuses contraintes externes auxquelles sont confrontés les systèmes de production, nous proposons un cadre générique caractérisant l'agilité des systèmes de production, et nous détaillons les principales fonctions d'un système de pilotage. Nous nous focalisons dans l'état de l'art sur les approches de pilotage hétérarchiques, en mettant l'accent sur les différentes architectures et modalités d'interaction. Nous dégageons enfin la double problématique d'allocation et de routage faisant l'objet de nos travaux.

Après avoir dressé un état de l'art sur l'utilisation du concept de champ de potentiel dans différents domaines applicatifs, le second chapitre présente notre proposition de pilotage. Nous y détaillons le modèle de champs de potentiel utilisé pour résoudre conjointement les problèmes d'allocation et de routage. Ce modèle repose sur l'hypothèse que les différentes entités composant le système de production (ressources et produits) sont dotées de capacités décisionnelles.

Dans ce contexte où les produits sont dotés de capacités décisionnelles, le troisième chapitre est dédié à une présentation d'un modèle de produit « actif ». Après avoir dressé un état de l'art de l'utilisation des produits « actifs/intelligents » dans le domaine manufacturier, nous détaillons les spécifications associées à un produit « actif ». Nous introduisons ensuite le concept d'augmentation supportant notre modèle de produit « actif ».

Le quatrième chapitre propose une validation par simulation de notre approche de pilotage à base de champs de potentiel. La plate-forme de développement multi-agents Netlogo est utilisée pour modéliser les différentes entités du système de pilotage proposé. Un benchmark permet de comparer notre approche à base de champs de potentiel avec une autre approche de pilotage hétérarchique utilisant contract-net.

Dans le dernier chapitre, les deux approches de pilotage précédentes sont implémentées sur la cellule flexible du pôle AIP Primeca de Valenciennes. Les méthodologies et outils ayant permis l'implémentation sont détaillés. Plusieurs scénarii sont mis en œuvre pour évaluer les caractéristiques de réactivité et de robustesse de notre approche de pilotage.

Enfin, nous présentons les conclusions de notre travail et proposons quelques perspectives de Recherche à court et moyen termes.

CHAPITRE I : PILOTAGE HETERARCHIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

1. Introduction

Actuellement, les systèmes de production opèrent dans un environnement dynamique caractérisé par une forte concurrence, imposant aux entreprises de faire face simultanément à la concurrence et aux fluctuations du marché. La logique de production à moindre coût peut s'avérer efficace pour contrer la concurrence mais ne l'est plus lorsqu'il faut intégrer la dynamique du marché. Un compromis entre les coûts de production et le besoin de flexibilité en termes de produits doit donc être instauré au niveau des systèmes de production. Ce compromis peut être atteint par une amélioration des performances du système de production notamment en termes de réactivité et de flexibilité.

Le but de ce premier chapitre est :

- de présenter le contexte et le champ applicatif de notre travail (système de production flexible évoluant dans un environnement de plus en plus mouvant),
- d'identifier les différentes problématiques inhérentes à l'adoption d'un système de pilotage hétérarchique,

- de dresser un état de l'art des différentes approches hétéroarchiques utilisées dans le domaine du pilotage.

Nous nous intéresserons dans un premier temps au contexte général dans lequel évoluent actuellement les systèmes de production. Nous mettrons ensuite l'accent sur les concepts d'agilité et de pilotage. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux systèmes de pilotage hétéroarchiques et nous préciserons enfin notre problématique de Recherche.

2. Contexte général

Les responsables d'entreprises sont actuellement confrontés à un fort accroissement de la complexité de la production en termes de contraintes externes : diversité et personnalisation de masse des produits, cycle de vie réduit des produits et contraintes de traçabilité de plus en plus sévères, perturbations des chaînes logistiques, etc. Ces contraintes sont détaillées ci-après :

2.1. Contraintes externes associées aux systèmes de production

2.1.1. Diversité des produits et personnalisation de masse

La diversité au niveau des produits a pour objectif d'augmenter le choix proposé au client et de lui assurer ainsi une meilleure satisfaction. Cette diversité des types des produits devant être pris en charge par un système de production induit cependant une complexité croissante de ce dernier.

Le développement des technologies liées à l'Internet a également donné la possibilité à chaque client d'une entreprise d'accéder au système d'information de l'entreprise. Via des sites Web, certains fabricants donnent la possibilité au client de configurer et de personnaliser le produit qu'il souhaite acheter (figure 1). Le client peut y saisir directement sa commande selon ses besoins et désirs, sans intervention du personnel commercial de l'entreprise (Layne et Bougelsdijk, 1998).

Cette personnalisation de masse permet de fournir au grand public des produits ou des services personnalisés dans des quantités importantes à des coûts raisonnables (Da Silveira et al., 2001). Une définition trouvée dans la littérature (www.mass-customization.de) présente la

personnalisation de masse comme un *système utilisant les technologies de l'information, un processus de fabrication flexible et des structures organisationnelles afin de fournir un large choix de produits et de services qui correspondent aux besoins spécifiques et individuels des consommateurs.*



Figure 1- Personnalisation d'une voiture lors d'une commande à partir d'un site Web

L'accès direct au système d'information permet d'offrir des produits sur mesure à grande échelle, avec une efficacité se rapprochant de la production de masse. Pour garder une certaine rentabilité de l'entreprise, des limites à une personnalisation totale existeront toujours. Farrell et Simpson (2003) préconisent l'utilisation d'une «plateforme» commune à un type de produits afin de maîtriser cette personnalisation.

2.1.2. Cycle de vie et traçabilité du produit

La concurrence accrue et l'obsolescence de plus en plus rapide des gammes de produits, obligent les responsables d'entreprises à réduire considérablement le cycle de vie d'un produit (Stark, 2006).

Des contraintes de traçabilité de plus en plus draconiennes nécessitent un suivi précis du produit tout au long de son cycle de vie. Ces contraintes encouragent le développement de nouvelles approches favorisant l'association de données aux produits (ou au dispositif de conditionnement associé) et permettant leur accès en temps réel. L'entreprise offre des moyens automatiques de gestion de l'information (via Internet, via messagerie

électronique,...) afin de suivre les objets physiques et d'informer ses clients, en temps réel, des événements importants survenus pendant le traitement de leurs commandes.

2.1.3. Perturbations externes affectant le système de production

Le système de production est soumis à des perturbations externes affectant son environnement, principalement liées aux diverses chaînes logistiques. Celles-ci regroupent l'ensemble des activités permettant de mettre à disposition du système la bonne quantité de produits, à moindre coût, au moment et à l'endroit où une demande existe. Une perturbation au niveau de la logistique (rupture de stock chez un fournisseur, retard d'une livraison) peut altérer les performances d'un système de production, entraînant par exemple retards de fabrication et délais de livraison.

2.2. Impact des contraintes externes

Bouwens et Abernethy (2000) ont prouvé que la personnalisation des produits a différents impacts sur le système de production et sur l'entreprise. Les systèmes de production doivent s'adapter à l'évolution continue de l'environnement et faire face efficacement aux différentes perturbations. Il devient également indispensable de contrôler individuellement la fabrication de chaque produit et de suivre celui-ci tout au long de son cycle de vie.

Dans ce contexte, les différentes contraintes externes citées ci-dessus se traduisent par des contraintes internes que nous pouvons fédérer sous le concept d'agilité. L'agilité représente une caractéristique vitale pour un système de production et est présentée dans la section suivante.

3. Agilité des systèmes de production

Pour faire face à l'ensemble des contraintes présentées précédemment, nous présentons brièvement le concept d'agilité et passons en revue les caractéristiques associées à un système agile.

3.1. Concept d'agilité

Le concept d'agilité est souvent cité dans la littérature relative aux systèmes manufacturiers sans qu'aucune définition stricte n'en soit donnée.

Quinn et al. (1997) définissent l'agilité dans le domaine manufacturier comme suit : *Agile manufacturing is the ability to accomplish rapid changeover between the manufacture of different assemblies.*

Dans le domaine industriel, Sharifi et Zhang (1999) présentent l'agilité comme un facteur déterminant pour obtenir de meilleures performances. Cette amélioration des performances se traduit par une réaction rapide aux changements et aux perturbations de l'environnement. Les auteurs s'accordent à dire que de nos jours le coût de revient d'un produit n'est pas le seul élément qui détermine la performance d'une entreprise. D'autres facteurs tels que la qualité, le délai de livraison et plus globalement la satisfaction du client sont à prendre en compte.

Bousbia dans sa thèse (Bousbia, 2006), a décrit le concept d'agilité en faisant un lien entre la nature du système de production et le type d'agilité. Il a défini un cadre conceptuel du type d'agilité s'inspirant largement de l'approche systémique (structure, activité, évolution) développée par Le Moigne (1994). Dans notre travail, nous reprenons la caractérisation de l'agilité proposée par Bousbia, dans laquelle trois types d'agilité sont considérés :

- agilité structurelle : Ce type d'agilité concerne le système physique (le système de production). Cette agilité détermine si un système possède l'équipement (les moyens de production) nécessaire et suffisant pour réaliser le ou les objectifs attendus lors de la production. Par exemple, un système de production possède une agilité structurelle forte s'il contient des unités de production polyvalentes et diversifiées et/ou des outils de transfert évolués.
- agilité opérationnelle : Ce type définit l'aptitude d'un système de production d'une part à atteindre un objectif fixé (poursuite) et, d'autre part, à réagir en présence des perturbations (régulation). L'agilité opérationnelle signifie que quotidiennement les équipes du système de production sont capables d'adopter les comportements adaptés à l'évolution de leurs enjeux internes et externes. Ce type d'agilité exploite les moyens offerts par l'agilité structurelle pour assurer cette évolution.
- agilité évolutionniste : Ce type présente une solution qui permet aux entreprises de répondre rapidement aux besoins variés des clients. Cette agilité s'appuie sur les deux

types d'agilité précédents et dépasse le cadre réduit d'une simple réaction face aux perturbations ou à la poursuite d'un objectif.

Dans ce travail, nous nous focalisons sur l'agilité opérationnelle où le système de production est capable de répondre aux besoins de ses clients et de faire face à des perturbations ou à des contraintes externes. Dans le but d'obtenir un système de production agile, certaines caractéristiques décrites par la suite sont indispensables.

3.2. Caractéristiques internes associées à un système agile

La construction d'un système agile nécessite la prise en compte de certaines caractéristiques internes (réactivité, fiabilité, tolérance aux fautes, reconfigurabilité) permettant une amélioration des performances du système de production.

3.2.1. Accroissement de la réactivité

La recherche fondamentale d'une performance afin de répondre aux perturbations et aux modifications de la demande commerciale, a permis de définir la réactivité. Cette dernière est la capacité d'une organisation à répondre rapidement aux sollicitations de son environnement par la mise en œuvre de la flexibilité des ressources. Pujo et Kieffer (2002) ont proposé plusieurs définitions du concept de réactivité. Une de ces définitions décrit la réactivité comme la promptitude à réagir prévisionnellement et à faire face aux changements de plan de charge. Par exemple, plus le temps de réponse est court, plus le système est réactif, c'est-à-dire plus le système sera apte à répondre rapidement à des nouvelles contraintes. Cette réactivité est devenue un enjeu important traduisant la dynamique avec laquelle le système de production s'adapte aux perturbations de son environnement.

Le manque de réactivité peut provenir de boucles de pilotage hiérarchisées présentant un temps de réaction d'autant plus long qu'il y a d'intermédiaires. Il semble donc souhaitable de « rapprocher » (au sens proposé par Pujo (Pujo et Ounnar, 2001)) les décisions du lieu de leur application pour mieux prendre en compte l'évolution réelle des systèmes pilotés (Sohier, 1996).

3.2.2. Accroissement de la fiabilité

La fiabilité est la probabilité de fonctionnement normal d'un système sans tomber en panne, pendant un certain temps et dans des conditions d'utilisation définies. L'étude de la fiabilité d'un système consiste à déterminer son taux de défaillance, à calculer son temps moyen de bon fonctionnement et d'autres indicateurs utiles pour la maintenance du système.

3.2.3. Tolérance aux défauts et Reconfigurabilité

La tolérance aux défauts décrit la capacité d'un système à garder un fonctionnement normal et conforme aux contraintes initiales, malgré les événements de dysfonctionnement (Diltis et al., 1991). Les perturbations internes (pannes, ralentissement, etc.) provoquent la création de goulets d'étranglement. Ceux-ci réduisent la fluidité des flux de produits dans le système de production et diminuent notablement les performances de ce dernier.

Dans ce contexte, il est possible de définir la notion de reconfigurabilité d'un système de pilotage, tel que *La reconfigurabilité du système de production est sa capacité à être reconfiguré, c'est-à-dire la capacité de sa structure à être modifiée pour que ce système soit adapté à un nouveau type de production, ou pour continuer à produire en présence de défaillances* (Toguyeni, 2004).

Après la présentation des caractéristiques internes associées à un système de production agile, nous nous intéresserons à la description du système de pilotage associé.

4. Système de pilotage

La conception de systèmes de pilotage est l'un des thèmes phares de notre équipe de Recherche. Nos travaux de thèse s'inscrivent dans cette thématique de Recherche. Après une présentation du concept de pilotage, les différentes fonctions associées sont décrites.

4.1. Concept de pilotage

Le terme de pilotage diffère d'un auteur à un autre, et plusieurs définitions sont données dans (Pujo et Kieffer, 2002). Dans ce mémoire, nous adoptons la définition du pilotage proposée par les membres de notre équipe (Trentesaux, 2002) : *le pilotage consiste à décider dynamiquement des commandes pertinentes à donner à un système soumis à des perturbations pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances.*

La notion de maîtrise intègre non seulement celle de maintien d'un niveau de performance donné, mais également celle d'une évolution vers un niveau de performance souhaité ou amélioration continue.

4.2. Fonctions du système de pilotage

Nous nous basons sur les fonctions indiquées dans la figure 2 adaptée de (Trentesaux, 1996), mettant en évidence le lien entre les différentes fonctions de pilotage à court terme. Des travaux en cours au sein de notre équipe mettent en évidence ces fonctions en se focalisant sur les problématiques d'ordonnancement à court terme et en tenant compte des contraintes de maintenance préventive et de l'état réel du système de production.

Les principales fonctions d'un système de pilotage sont :

1. *Planification* : Cette fonction correspond au niveau prévisionnel du système de pilotage. Des plans de production nécessaires peuvent être générés selon des objectifs, des besoins et des données externes du système en utilisant généralement des systèmes d'informations spécialisés : ERP « Enterprise Resource Planning » ou « planification des ressources de l'entreprise ».
2. *Ordonnancement* : Dans le contexte actuel, l'ordonnancement est l'une des fonctions de pilotage les plus importantes et aussi l'une des plus délicates. Selon (Pinedo, 1995), « *L'ordonnancement est l'allocation des ressources, humaines ou techniques, aux tâches sur une durée définie avec le but d'optimiser un ou plusieurs objectifs* ».
3. *Conduite* : La conduite correspond au niveau décisionnel du pilotage dont le rôle principal est la mise en œuvre des tâches ordonnancées conformément aux commandes et aux décisions planifiées par le niveau prévisionnel. Elle assure la flexibilité quotidienne pour faire face aux fluctuations du système. Si l'état du système de production ne permet pas d'appliquer correctement ces planifications, une décision peut être prise localement. Si aucune décision locale ne peut remédier au problème, il sera nécessaire de remettre en question les décisions du niveau supérieur.

La conduite peut être décomposée en sous-fonctions dont les principales sont:

- le contrôle: cette fonction assure la cohérence globale du système de pilotage et gère les interactions entre les différents centres de décision.

- la définition et la gestion de l'environnement: gestion de la logistique technique et des configurations.
4. *Commande* : la fonction de commande décode les tâches à exécuter et envoie les commandes au système physique. Elle englobe notamment la commande des équipements de production.

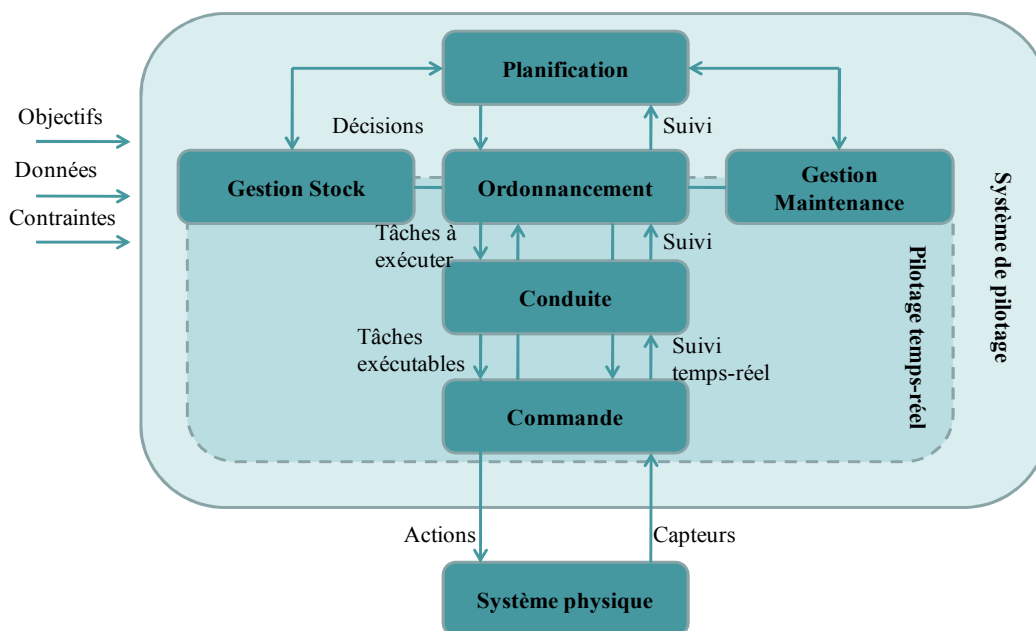


Figure 2- Fonctions d'un système de pilotage à court terme

Dans la suite de notre étude, nous nous intéressons à la fonction « conduite » et nous nous focalisons sur les approches de pilotage hétéarchique. Ces dernières, de par leurs propriétés liées à l'agilité (réactivité, robustesse), peuvent en effet offrir une réponse adéquate à l'ensemble des contraintes que nous avons listées précédemment. Ces approches sont abordées dans la section suivante.

5. Approches de pilotage hétérarchique

Cette section vise à mettre en évidence les avantages potentiels de l'approche de pilotage hétérarchique des systèmes de production.

5.1. Concept d' hétérarchie et architectures de pilotage associées

Depuis la fin des années 1990, des études sur la commande hétérarchique ont été menées au sein de notre équipe de recherche. Un modèle de pilotage a notamment été proposé dans (Trentesaux, 1997) présentant la spécificité d'intégrer l'opérateur humain et utilisant la notion d'intelligence artificielle distribuée.

Au début, seules les ressources de production étaient considérées comme décisionnelles (Trentesaux et al., 1998). Plusieurs travaux, reposant sur des études en simulation, ont mis en évidence les avantages de l'approche hétérarchique par rapport aux démarches d'optimisation statiques dans le cadre de l'allocation dynamique des tâches (Trentesaux et al., 2000).

D'autres travaux plus récents (Sallez et al., 2004), (Berger et al., 2009) ont permis d'élargir ce concept en associant des capacités décisionnelles aux produits.

La notion de graphe d'influence est utilisée pour définir le concept d'hétérarchie et pour présenter les différents modèles de pilotage possibles. Un graphe d'influence est un graphe orienté, composé de sommets correspondant aux différentes entités décisionnelles et d'arcs orientés traduisant une interaction directionnelle de type maître-esclave d'une entité vers une autre. Une entité décisionnelle est un système capable de soutenir un processus de décision. La figure 3 ci-dessous décrit un exemple de graphe d'influence.

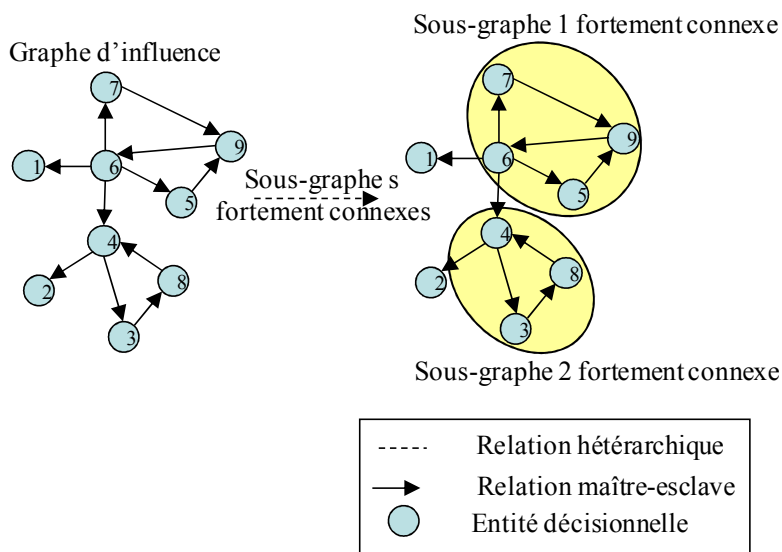


Figure 3- Exemple de graphe d'influence

Une architecture hétérarchique est définie par un graphe fortement connexe dont chaque nœud peut être considéré à la fois comme un maître et comme un esclave, ce qui montre qu'il n'y a pas de hiérarchie. C'est-à-dire qu'un chemin existe entre n'importe quel couple de nœuds (voir figure 4).

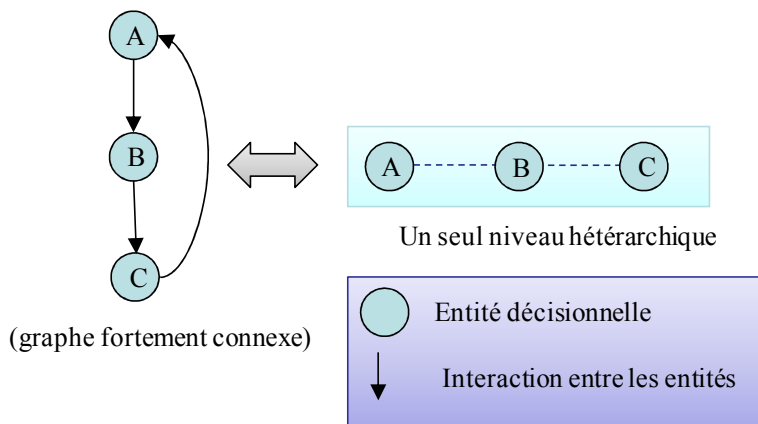


Figure 4- Architecture hétérarchique

La figure 5 décrit les différentes architectures de pilotage : des systèmes de pilotage entièrement hiérarchique jusqu'aux systèmes de pilotages entièrement hétérarchique en passant par le pilotage semi-hétérarchique. Étant donné les différentes façons de distribuer les décisions de contrôle/commande, il est possible de construire une typologie inspirée par (Diltis et al., 1991).

Le souhait d'utiliser les relations hiérarchiques lors de la conception a conduit à la classe I d'architecture de pilotage. Le désir d'utiliser les relations hétérarchiques a conduit à des architectures de pilotage de classe III. Les architectures de pilotage de classe II (semi-hétérarchiques) se situent au milieu intégrant à la fois des relations hiérarchiques et hétérarchiques. Une architecture de contrôle est de classe II si son graphe d'influence n'est pas fortement connexe (c'est à dire pas de classe III), tandis qu'au moins un sous-graphe est fortement connexe (c'est à dire, pas de classe I) (voir figure 3).

Une architecture typique de classe II est un système de pilotage de classe III incorporant un niveau de supervision. Les lecteurs intéressés peuvent consulter (Trentesaux, 2007) pour plus de détails sur cette formalisation.

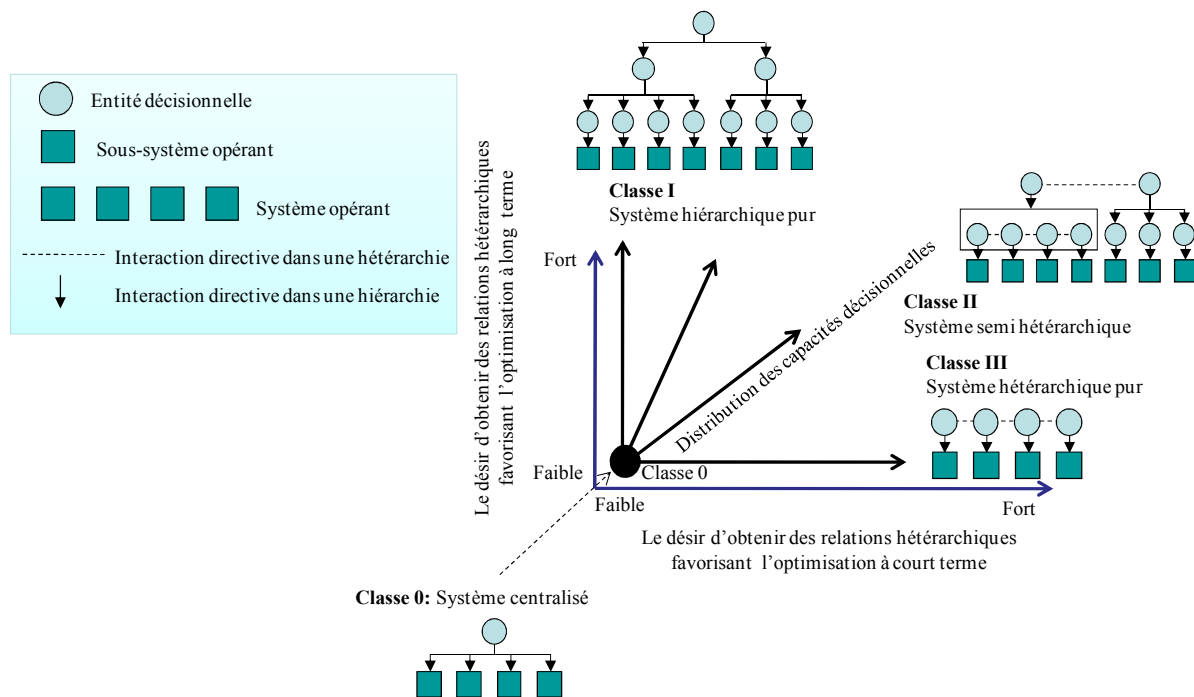


Figure 5- Illustration de la typologie des systèmes de contrôle

Les approches de pilotage hétérarchique deviennent de plus en plus intéressantes pour le contrôle d'un système de production. En effet, les exigences de l'industrie ont évolué depuis des critères de performance traditionnels, décrits en termes d'optimalité statique ou de quasi-optimalité, vers de nouveaux critères de performance, décrits en termes de réactivité, d'adaptabilité et de robustesse (Schreiber (2007) cité dans Sauer (2008)). De plus en plus d'industriels veulent désormais des systèmes de pilotage offrant des solutions satisfaisantes, adaptables et robustes plutôt que des solutions optimales exigeant le respect de contraintes

fortes. Ces industriels sont essentiellement issus des domaines de la haute technologie et de la personnalisation de masse : l'automobile, l'informatique, la téléphonie et les systèmes de communication.

Après cette présentation générale du concept d'hétérarchie, nous nous intéressons aux approches pouvant être adoptées pour le développement d'un système de pilotage hétérarchique.

Selon Bousbia et Trentesaux (2002), les architectures de pilotage hétérarchiques sont principalement inspirées de trois types d'approches de modélisation, définissant un premier axe de caractérisation:

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

Selon notre étude, ces architectures exploitent également plusieurs modalités d'interaction, ce qui définit un second axe de caractérisation:

- contract-net,
- stigmergie,
- blackboard (tableau noir),
- champ de potentiel.

Cette typologie croisée « Approches de modélisation / modalités d'interaction » est utilisée dans la suite de ce document afin de positionner les différentes contributions. Les parties suivantes décrivent au préalable les deux axes de caractérisation précédents.

5.2. Approches de modélisation

5.2.1. Les approches bio-inspirées et bioniques

Les systèmes de production bioniques (SPB) 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) (voir figure 6).

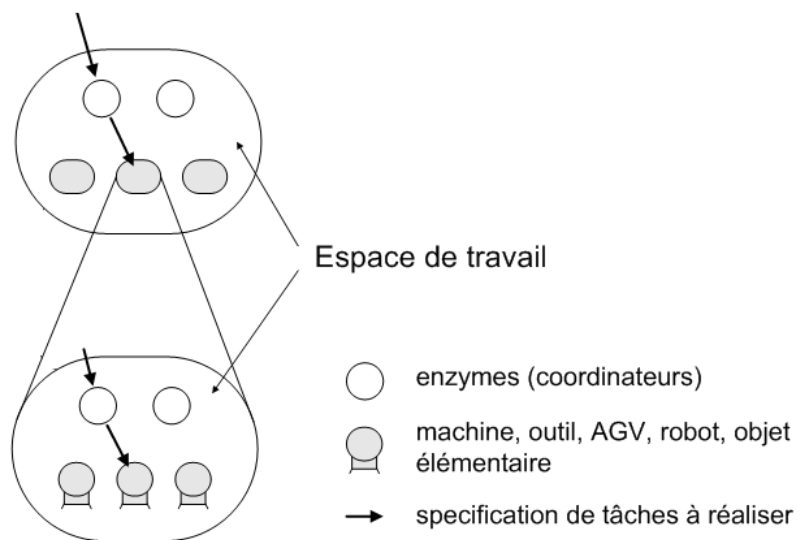


Figure 6- Système manufacturier bionique

5.2.2. Les approches à base d'agents

Plusieurs études ont montré les avantages des approches à base d'agents pour la modélisation des systèmes réactifs. Dans le domaine des systèmes multi-agents, de nombreux travaux de recherche ont examiné le comportement d'un ensemble d'agents autonomes interagissant entre eux et avec leur environnement (Ferber, 1995). Ces recherches ont abouti à des architectures de systèmes multi-agents (SMA) distribuant l'information, la décision et les tâches de contrôle/commande au sein d'un réseau d'entités autonomes, appelés agents (figure 7). L'interaction est un élément clef dans les systèmes multi-agents. Par leurs multiples interactions, les agents sont capables de produire un comportement collectif complexe cohérent par rapport aux objectifs fixés.

Dans ce contexte, les concepts d'agents réactifs et/ou cognitifs permettent de modéliser finement les comportements des entités composant un système de production. Les caractéristiques associées aux agents doivent également refléter les propriétés associées aux différentes entités du système de production telles que l'autonomie, la coopération, la réactivité, l'adaptabilité et la tolérance aux pannes.

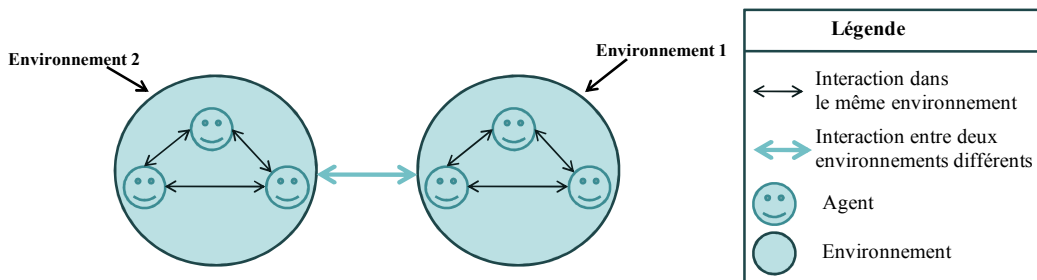


Figure 7- Système multi-agents

5.2.3. L'approche holonique

Les systèmes holoniques ont été proposés par Arthur Koestler (Koestler, 1967). Le principe de cette approche repose sur le fait qu'une entité est considérée comme composée d'autres entités et comme une partie d'un ensemble. Les principes introduits par Koestler ont été appliqués dans des domaines divers, notamment dans le projet international HMS (Holon Manufacturing System) et le projet de l'initiative internationale IMS (Intelligent Manufacturing Systems). Le projet HMS, a défini l'holarchie comme une architecture qui intègre toute la gamme des activités de production. Un HMS est donc un système de production dans lequel les éléments clés (par exemple, matières premières, machines, produits, pièces, AGVs) sont autonomes et coopératifs (figure 8).

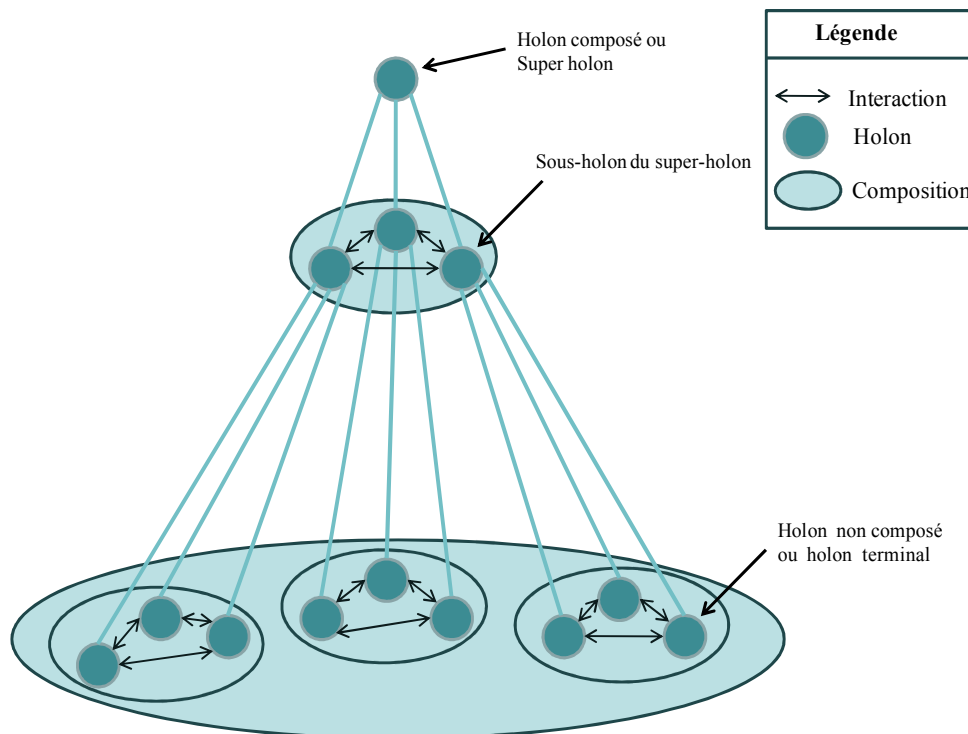


Figure 8- Système holonique

Dans ce contexte, (Van Brussel et al., 1998) ont développé l'architecture de référence PROSA. Quatre types d'holons y sont distingués : ordre, ressource, produit et Staff (Bongaerts, 1998) :

- Un **Holon-Produit** est un holon qui contient les informations nécessaires pour assurer la fabrication d'un produit avec une bonne qualité.
- Un **Holon-Ressource** est un holon constitué d'une partie physique (une ressource de production du HMS) et d'une partie de traitement de l'information qui contrôle cette ressource. Il offre des services de production aux autres holons. Un Holon-Ressource peut être une machine, un outil ou un stock de matières.
- Un **Holon-Ordre** représente l'ordre de fabrication. C'est une entité active responsable de l'exécution correcte et dans les délais d'une demande. Il est responsable du traitement des informations concernant cette demande.
- Un **Holon-Staff** est comme un conseiller pour les autres holons. Fonctionnellement il peut être comparé au plus haut niveau d'un système de contrôle hiérarchique.

5.3. Les modalités d'interaction

Les approches décrites précédemment reposent sur un ensemble d'interactions entre entités. Les différentes modalités d'interaction sont listées ci-après.

5.3.1. Le contract-net

Le protocole contract-net (Smith, 1980) est largement utilisé dans le domaine de *l'Intelligence Artificielle distribuée*. Comme son nom l'indique, ce protocole est basé sur la notion de contrat. Les nœuds peuvent prendre deux rôles liés à l'exécution d'une tâche: gestionnaire ou contractant (entrepreneur). Un gestionnaire est chargé de surveiller l'exécution d'une tâche et de traiter les résultats de celle-ci. Un contractant est responsable de l'exécution réelle de la tâche. Le gestionnaire envoie un appel d'offre à tous les contractants. Les contractants disponibles évaluent les appels d'offre de plusieurs gestionnaires et proposent des enchères pour les offres qu'ils peuvent satisfaire. Les gestionnaires évaluent les enchères reçues et attribuent des contrats aux entrepreneurs qu'ils considèrent comme les plus appropriés. La figure 9 résume le déroulement de ce protocole.

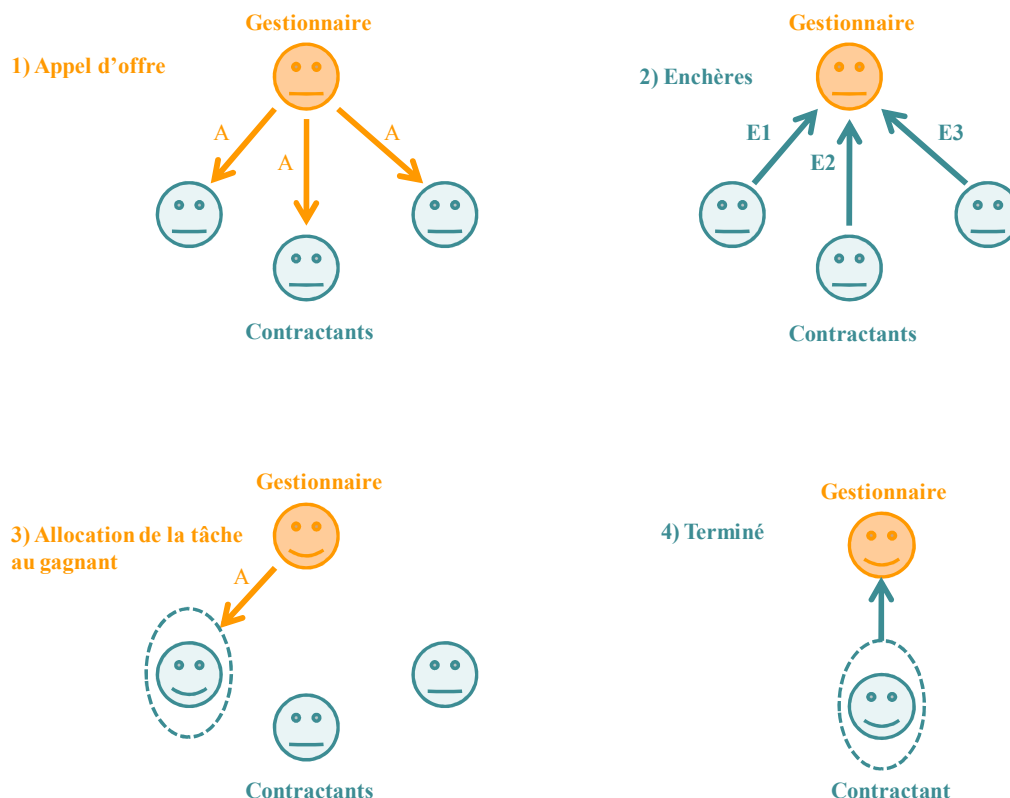


Figure 9- Protocole contract-net

5.3.2. La stigmergie

Le terme "stigmergie" a été introduit pour la première fois par un entomologiste français nommé Grassé (1959). Il a utilisé ce terme pour décrire le mécanisme par lequel les termites assurent leurs tâches collectives.

Ce mécanisme est également utilisé par les fourmis pour marquer un chemin entre la nourriture et le nid (Theraulaz et Bonabeau, 1999). Chaque fois qu'une fourmi se déplace, elle sécrète une substance (phéromone) sur son chemin. Les autres fourmis suivent les chemins établis par leurs prédécesseurs pour chercher de la nourriture et la transporter jusqu'au nid. Elles renforcent ainsi les pistes de phéromone. Au fur et à mesure, un phénomène de renforcement de phéromone apparaît : les trajets menant à la nourriture sont renforcés par le dépôt d'autres phéromones. Un phénomène d'évaporation fait en sorte que les trajets les moins suivis (correspondant aux plus longs), disparaissent peu à peu. Au final, seules les pistes «intéressantes» sont exploitées. Cette approche est illustrée par la figure 10.

Le mécanisme de stigmergie permet ainsi aux différentes entités d'interagir entre elles de façon indirecte via l'environnement.

Ce concept a également donné naissance à un ensemble d’algorithmes d’optimisation (Dorigo et al., 1991), (Dorigo et stultze, 2006) permettant de résoudre de nombreux problèmes dans le domaine de la Recherche Opérationnelle.

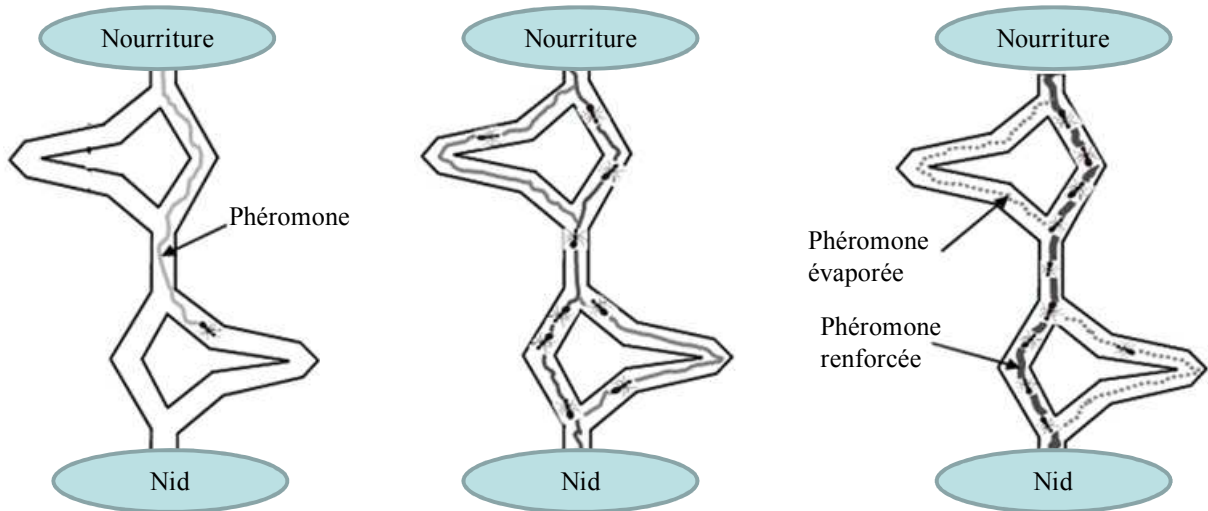


Figure 10- Evolution des phéromones

5.3.3. Le blackboard (tableau noir)

Cette méthode d’interaction entre agents implique nécessairement qu’une information soit échangée dans le but de réaliser de manière coordonnée un ensemble de tâches. Les informations sont échangées indirectement entre les agents via un tableau noir (Blackboard). Chaque agent vient y chercher les informations dont il a besoin et en déposer pour les mettre à la disposition des autres agents (figure 11). Cette approche permet de résoudre des problèmes de coordination, en se basant sur un enrichissement des connaissances respectives des agents (Hayes-Roth, 1985).

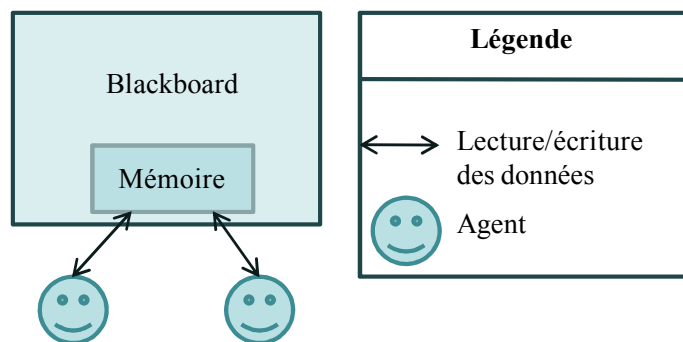


Figure 11- Principe du Blackboard

5.3.4. Les champs de potentiel

La notion de champ de potentiel est utilisée dans les systèmes réactifs pour influencer le comportement d'entités mobiles. Ce concept prend ses racines dans une critique radicale des méthodes classiques de planification de trajectoires dans un environnement incertain. Dans le domaine de la navigation en robotique mobile, les chercheurs ont utilisé ce concept pour programmer des déplacements en temps réel (Khatib, 1985; Barraquand et Latombe, 1989; Ferber, 1995).

La sous section suivante positionne certains travaux de Recherche en utilisant la typologie croisée « Approches de modélisation / modalités d'interaction ».

5.4. Bref état de l'art relatif aux différentes approches de modélisation et d'interaction

Dans cette section, nous présentons quelques travaux dans le domaine de robotique mobile et des systèmes manufacturiers. Ces travaux sont analysés selon notre typologie croisée. Un état de l'art plus complet sur la modalité d'interaction par « champs de potentiel », faisant l'objet de nos travaux de thèse, sera établi dans le chapitre II.

Dans le domaine de la robotique mobile, Arkin et al. (1997) ont étudié des colonies de robots pour résoudre les problèmes d'interaction entre les robots d'un système distribué en se basant sur l'approche bio-inspirée. Ce travail est basé sur les comportements des robots et sur leurs capacités à répondre à diverses demandes et à se déplacer de manière autonome dans l'espace. Le problème principal résolu dans ce travail est le routage des entités.

Toujours dans le même contexte, (Botti et al, 1995) ont utilisé l'approche du "blackboard" pour gérer les interactions entre les agents. Dans ce travail, ils ont montré que, l'envoi d'informations à un agent ou la modification de l'environnement nécessite un comportement de coopération entre les agents afin d'atteindre un objectif global.

Dans le contexte manufacturier, (Vaario et al., 1998) ont utilisé le concept de champ de potentiel pour modéliser les comportements des entités dans les systèmes bioniques. Ils se sont plus particulièrement intéressés à la problématique d'allocation dynamique des tâches parmi un ensemble de ressources. Chaque ressource (machine) génère un champ de potentiel

attractif qui attire les produits transportés par des véhicules de type AGV. Chaque produit capte le champ attractif des différentes machines et se déplace vers la machine qui émet le champ le plus important.

Fu-Shiung Hsieh (2005) a proposé un modèle multi-agents basé sur le protocole contract-net pour gérer les tâches d'un système de production complexe. Il s'est intéressé au gestionnaire chargé de l'attribution des tâches aux agents ressources, agissant comme des candidats potentiels. Chaque opération dans la tâche requiert un certain type de ressource pour son traitement et le coût d'allocation dépend de la tâche et de la ressource concernée. Contract-net est utilisé comme mécanisme support des interactions entre agents. Une approche d'optimisation a été proposée pour trouver une séquence d'exécution réalisable avec un coût minimal.

Chen et Occena (1999) se sont intéressés à la modélisation du processus complexe de conception des produits nécessitant la prise en compte simultanée de différentes connaissances expertes. Ils ont utilisé l'approche de tableau noir (blackboard) afin d'assurer la gestion des différents acteurs intervenant dans le processus de conception.

Dans le domaine de la production, (Ounnar et al., 2008) ont appliqué la protocole Contract-net dans un système holonique afin de résoudre le problème d'allocation des tâches aux ressources. Dans cette étude, les offres ne sont pas directement proposées par les ressources. En effet, les ressources sont gérées par une entité de contrôle. Cette entité analyse l'appel d'offre puis auto-évalue les capacités de la ressource pour la tâche demandée. Ce processus est basé sur une méthode d'aide à la décision multicritère qui prend en considération les caractéristiques techniques de la ressource et ses disponibilités. Le problème principal à résoudre était l'allocation des tâches aux ressources.

Plusieurs chercheurs ont appliqué le concept de stigmergie pour résoudre des problèmes de pilotage de systèmes de production. Par exemple, Brückner (2000) s'inspire des colonies de fourmis, et met en œuvre une approche stigmergique pour gérer le routage des produits au sein d'un système de production. Plus récemment, (Sallez et al., 2009a) a proposé un système de routage dynamique exploitant l'algorithme stigmergique AntNet proposé par (Caro et

Dorigo, 1998). Dans Antnet, des agents mobiles sont utilisés pour mettre à jour en temps réel des tables situées dans l’environnement, représentatives de la fluidité du trafic dans un réseau. Cependant, dans un système de production, il est impossible d'utiliser des produits réels pour explorer le réseau car cela entraînerait un coût prohibitif et des délais de production trop importants. (Sallez et al., 2009a) a adapté le concept de stigmergie en introduisant deux niveaux, un « réel » où se déplacent les vrais produits et un « virtuel » où se déplacent des agents représentatifs des produits. Les entités virtuelles explorent alors un graphe représentatif du système de production à moindre coût.

Les différents travaux cités précédemment ainsi que les problématiques abordées sont résumés dans le tableau Tab.1.

		Approches de modélisation			Problématiques traitées
		Bionique Bio-inspiré	Multi-agents	Holonique	
Approches d'interaction	Contrat-net		(Hsieh, 2005)		Allocation des tâches
				(Ounnar, 2009)	Allocation des tâches
	Stigmergie	(Brückner, 2000)			Routage
		(Sallez et al., 2009a)			Routage dynamique
	Blackboard		(Botti et al., 1995)		Décision commune
			(Chen et Occena, 1999)		Conception des produits
	Champs de potentiel	(Arkin et al., 1997)			Routage
		(Vaario et al. 1998)			Allocation des tâches

Tab. 1 Tableau résumant les différents travaux

6. Contexte scientifique et définition de notre problématique

Après une présentation du contexte scientifique, nous définissons la problématique associée à nos travaux de Recherche.

6.1. Contexte scientifique

Le contexte scientifique dans lequel se situent nos travaux de thèse peut être caractérisé par les points suivants :

- De nombreux travaux de Recherche en Productique ont permis l'émergence de nouvelles architectures de pilotage, telle que l'architecture hétéarchique / non-hiérarchique conduisant à des entités (produits et ressources) plus autonomes, adaptatives et réactives.
- Les technologies de communication récentes (comme RFID, cartes à puce et communication sans fil) ont permis de doter les produits et les ressources de capacités décisionnelles et de communication, leur permettant de réagir adéquatement aux variations de leur environnement (pour faire face aux perturbations rencontrées, par exemple). De nouvelles approches telles que le « contrôle par le produit » (JESA¹ CII² et Projet SCP³) ont ainsi vu le jour.
- Plus généralement, les récents travaux sur l'intelligence ambiante permettent d'immerger les objets dans un environnement réactif et sensible au contexte. Les capacités des objets sont alors mises à disposition des utilisateurs ou d'autres objets dans un contexte donné. Ce concept d'intelligence ambiante permet d'entrevoir un futur proche où les personnes seront assistées dans leurs activités journalières par des technologies distribuées et noyées dans l'environnement. Une définition du concept d'intelligence ambiante est proposée par (Lindwer et al., 2003) : *“Ambient Intelligence is the vision that technology will become invisible, embedded in our natural surroundings, present whenever we need it, enable by simple and effortless interactions, attuned to all our senses, adaptive to users and context and autonomously acting. High quality information and content must be available to any user, any where, any time, and on any device”*.

6.2. Problématique associée à nos travaux

Dans le contexte scientifique défini précédemment, les travaux présentés dans cette thèse se focaliseront sur la phase de fabrication et s'attacheront à proposer une approche de pilotage hétéarchique permettant de résoudre une double problématique :

¹ JESA : *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Volume 43 n°4-5, 2009 Editeurs invités : P.

Pujo, A. Thomas, D. Trentesaux

² CII : *Computer In Industry*, Volume 60 , issue 3, avril 2009, ISSN:0166-3615

³ www.projet-scp.eu/

- l'allocation des tâches (associées aux produits) aux différentes ressources capables de les assurer,
- le routage des produits vers les ressources.

Cette double problématique est omniprésente dans la plupart des systèmes automatisés de production. Cependant dans la plupart des travaux cités précédemment, des approches différentes sont généralement utilisées pour résoudre les deux problèmes. L'allocation des tâches peut par exemple être traitée via une approche de type « contract-net » tandis que la problématique de routage est résolue par une approche stigmergique

Nos travaux visent à mettre en évidence l'intérêt de l'approche à base de champs de potentiel pour une prise en compte conjointe des deux tâches d'allocation et de routage.

7. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons tout d'abord présenté le contexte de plus en plus mouvant dans lequel évoluent actuellement les systèmes de production. Les différentes contraintes associées à ce contexte se traduisent par la nécessité de concevoir des systèmes de production agiles. Dans ce contexte, les approches de pilotage hétéarchiques s'avèrent une réponse intéressante. Nous avons dressé un état de l'art des différentes approches hétéarchiques, dans lequel nous avons différencié les approches de modélisation et les approches d'interaction. Suite à cet état de l'art, nous avons situés nos travaux dans un contexte associant pilotage hétéarchique et intelligence ambiante. Nous nous attachons plus particulièrement à résoudre de façon conjointe la problématique de l'allocation et du routage au sein d'un système de production.

Dans le chapitre suivant, un modèle basé sur le concept de champ potentiel est proposé pour résoudre conjointement les deux problèmes d'allocation et de routage.

CHAPITRE II : CHAMP DE POTENTIEL : ETAT DE L'ART ET PROPOSITION D'UN MODELE POUR L'ALLOCATION ET LE ROUTAGE

1. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter l'approche à base de champs de potentiel sur laquelle repose notre système de pilotage hétérarchique. La notion de champ de potentiel est utilisée pour résoudre conjointement l'allocation dynamique des tâches et le routage dynamique des produits au sein d'un système flexible de production. Cette approche supporte seule l'ensemble des interactions existant entre les différentes entités du système de production (ressources et produits).

La première partie de ce chapitre détaille le concept de champ de potentiel appliqué dans plusieurs contextes. La deuxième partie présente deux catégories de spécifications préliminaires à l'élaboration de notre modèle: l'une relative au contexte applicatif et l'autre relative à l'approche de modélisation. Dans la troisième partie, le modèle de champs de potentiel, sur lequel repose notre approche de pilotage, est présenté.

2. Etat de l'art sur le concept de champ de potentiel

Le mécanisme d'interaction par champs de potentiel repose sur une inspiration physique, dans laquelle des entités propagent des champs de forces dans l'environnement pour s'attirer ou se repousser. Supposons qu'une entité (robot mobile) cherche à atteindre une position précise dans son environnement. Cette position (but) émet un champ attractif alors que les obstacles émettent des champs répulsifs. L'entité se déplacera en combinant l'ensemble des champs perçus. Il remonte le gradient du champ attractif émis par le but tout en évitant les obstacles dans l'environnement (Figure 12).

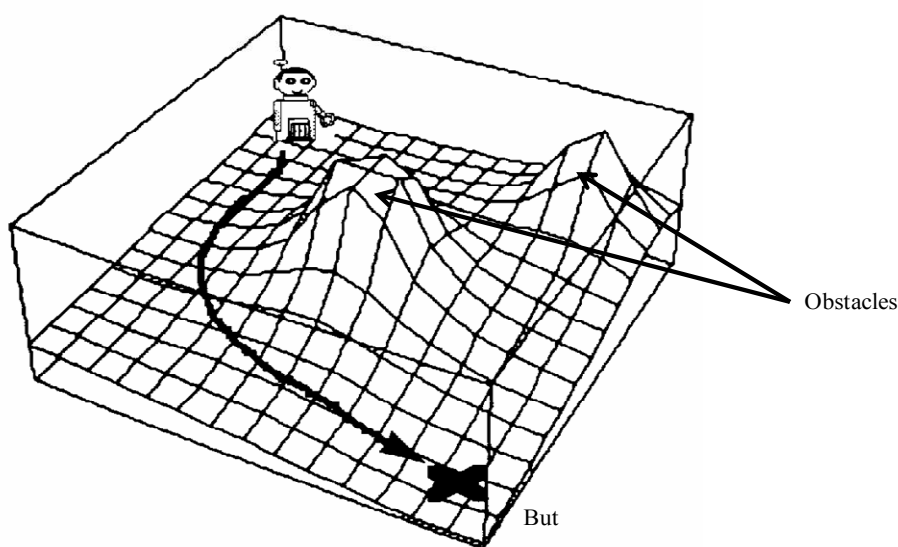


Figure 12- Un robot attiré par son but et repoussé par deux obstacles (Ferber, 1995)

La sous-section suivante décrit quelques exemples d'applications des champs de potentiels dans différents domaines.

2.1. Exemples d'applications des champs de potentiel

Les techniques à base de champs de potentiel ont été couramment utilisées dans des systèmes s'inspirant de phénomènes biologiques. Dans ce contexte, les premières références reviennent à Craig Reynolds (Reynolds, 1987) cherchant à modéliser le comportement de nuées d'oiseaux. Ces derniers coordonnent leurs mouvements, synchronisent leurs changements de direction, en évitant les obstacles et les collisions, tout en utilisant des comportements individuels simples. Ces comportements sont rendus possibles par l'adoption de lois d'attraction et de répulsion.

Pendant les dernières décennies, les champs de potentiels ont également été couramment utilisés dans les systèmes multi-agents réactifs pour déterminer le comportement d'entités mobiles situées dans un espace métrique (Weyns et al., 2006), (Ferber, 1995).

De nombreuses applications ont également vu le jour dans le domaine de la robotique mobile, particulièrement pour la planification en temps réel de trajectoires (Khatib, 1985; Barraquand et Latombe, 1989; Ferber, 1995). Les entités mobiles réactives remontent le gradient du champ de potentiel attractif généré par un objectif tout en tenant compte des champs de potentiel répulsifs émis par les obstacles. Les entités mobiles suivent un champ de potentiel global, résultant de la somme vectorielle des champs attractifs et répulsifs.

Dans le même contexte, (Mamei et al., 2006) ont considéré le cas d'un groupe des robots, répartis dans un environnement, capables de s'orienter et de coordonner leurs mouvements individuels. Pour assurer les différentes interactions entre les robots, ces chercheurs ont utilisé le concept de champ potentiel. Les robots sont équipés de capteurs (par exemple de caméras) leur permettant d'acquérir de l'information sur leur environnement. En absence de moyen de communication directe, ils coordonnent leurs mouvements par détection des mouvements des autres robots. Les robots modélisent leur environnement et le comportement des autres robots en termes de champs de potentiel. Un robot détectant un obstacle avec sa caméra représente l'obstacle sous la forme d'un champ répulsif, dont la force augmente avec les dimensions perçues de l'obstacle. Si un robot émet un champ attractif, les autres robots sont attirés et se dirigent vers ce robot. Si tous les robots émettent un champ répulsif, les robots ont tendance à se disperser dans l'environnement, assurant ainsi une plus grande couverture pour explorer l'environnement.

Une autre référence dans le contexte de la navigation de robots mobiles (Jagannathan et al., 1994) utilise les méthodes de champ de potentiel pour contrôler des véhicules autonomes mobiles avec des bras manipulateurs embarqués. Une boucle de contrôle externe utilise la théorie des champs de potentiel pour générer des trajectoires exemptes de tout obstacle. Les champs de potentiel fournissent naturellement l'intelligence nécessaire à la résolution en ligne des conflits.

Le concept de champs de potentiel a également été utilisé pour résoudre le problème de positionnement de ressources dans un environnement continu. Moujahed et al. (2007) ont utilisé une approche à base d'agents réactifs pour résoudre les problèmes de positionnement d'un ensemble de « *facilities* » de façon à satisfaire au mieux les demandes susceptibles d'apparaître dans l'environnement. Une des études de cas décrites consistait à positionner des arrêts de bus sur le réseau de transport de la ville de Belfort. Les arrêts de bus sont les « *facilities* » à positionner. Ils sont placés de sorte que la distance moyenne parcourue par les passagers est réduite au maximum. Chaque agent « arrêt de bus » est modélisé via un champ de potentiel défini par son rayon d'attraction. Les auteurs ont supposé que la valeur du rayon d'attraction est la distance maximale tolérée par les passagers. Au-delà de cette distance, les passagers ne sont pas intéressés par cet arrêt de bus.

Dans un contexte de production manufacturière, Vaario et al. (1998) ont utilisé le concept de champs de potentiel pour assurer la répartition dynamique des produits entre un ensemble de ressources. Dans leur travail de recherche, chaque machine génère un champ de potentiel de façon à attirer des produits transportés par des véhicules à guidage automatique (AGV). Chaque produit capte le champ attractif cumulé des machines et se déplace vers la machine présentant le plus fort potentiel d'attraction.

Ueda et al. (2001) ont appliqué ce concept à un système de production de type line-less, dans lequel les produits se déplacent librement, supportés par des AGVs, et sont pris en charge par des robots montés sur des plates-formes mobiles. Le concept de système line-less est proposé afin de concevoir des systèmes flexibles capables de faire face dynamiquement aux perturbations (internes et externes) de l'environnement de production. Ce système de production a été imaginé par Ueda pour une application de soudage dans le domaine de la production automobile.

Breton et al. (2004) ont proposé une approche multi-agents pour résoudre les problèmes de routage d'une flotte d'AGVs bidirectionnels. Ils ont considéré un AGV comme un agent essentiellement réactif dont le but est d'atteindre son nœud destination. L'approche proposée utilise les champs de potentiel pour assurer le routage et éviter les obstacles. Chaque AGV est un agent se déplaçant dans son environnement, sans aucun moyen de communiquer avec les autres. Il dispose de connaissances minimales : sa position et la position de sa destination dans

l'environnement. Le déplacement élémentaire d'une position à une position adjacente est implémenté suivant le principe de remontée d'un gradient. Chaque AGV calcule une valeur de gradient pour les positions adjacentes et choisit aléatoirement une destination parmi les positions offrant une valeur de gradient maximale.

Weyns et al. (2008) ont également appliqué le concept de champ de potentiel pour le guidage d'AGVs. Les agents de transport (produits à transporter) émettent des champs de potentiel pour attirer les AGVs. Toutefois, pour éviter que plusieurs AGVs se dirigent vers le même agent de transport (et pour éviter les collisions), les agents AGVs émettent des champs répulsifs.

La partie suivante propose une analyse des travaux cités ci-dessus.

2.2. Analyse

Le tableau Tab.2 récapitule les travaux précédents.

	Entité attirée	Entité attractive	Entité repulsive	Problème à résoudre
Mamei et al., (2006)	Robot	Robot	Obstacle	Répartition des robots dans un environnement
Jagannathan et al., (1994)	Véhicule		Obstacle	Les conflits entre les véhicules
Moujahed et al., (2007)	Passager	Arrêt de bus		Problème de positionnement
Vaario et al., (1998)	Produit	Ressource		Répartition des produits
Ueda et al., (2001)	Produit	Robot		Routage des produits
Breton et al., (2004)	AGV	Destination demandée		Routage des AGVs bidirectionnels
Weyns et al., (2008)	AGV	Agent de transport	AGV	Routage des AGVs

Tab. 2 Tableau des domaines applicatifs

Dans chacune des études citées précédemment, les champs de potentiel sont modélisés de façon très simple à l'aide d'une courbe décrivant l'évolution du champ attractif en fonction de la distance euclidienne. L'attractivité est inversement proportionnelle à la distance euclidienne

entre l'entité « attirée » et le centre d'attraction. Plus la distance est petite, plus l'attraction est importante (voir Figure 13).

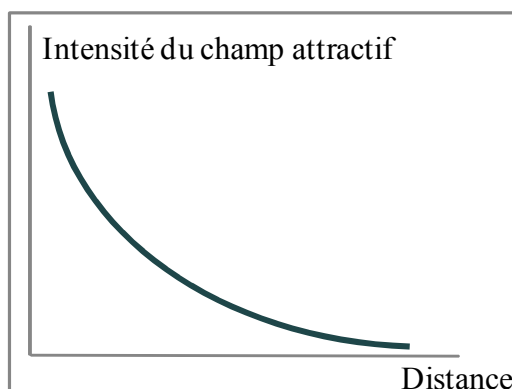


Figure 13- Variation du champ de potentiel

La figure 14 illustre l'utilisation des champs de potentiel faite par certains auteurs cités dans l'état de l'art dans le cadre d'un système de production comportant trois ressources (R_1 , R_2 et R_3) :

- R_1 est capable d'offrir un service S_1 . R_2 est capable d'offrir un service S_2 et enfin R_3 est capable d'offrir les services S_1 et S_3 .
- Chaque ressource émet un champ de potentiel attractif (en 2D) pour chaque service qu'elle est capable d'offrir.
- Le produit P_1 pénètre dans le système avec une liste de services à obtenir (S_1 , S_2 et S_3).
- Il se dirige vers la ressource R_1 , émettant la plus grande valeur de champ de potentiel pour le service S_1 .

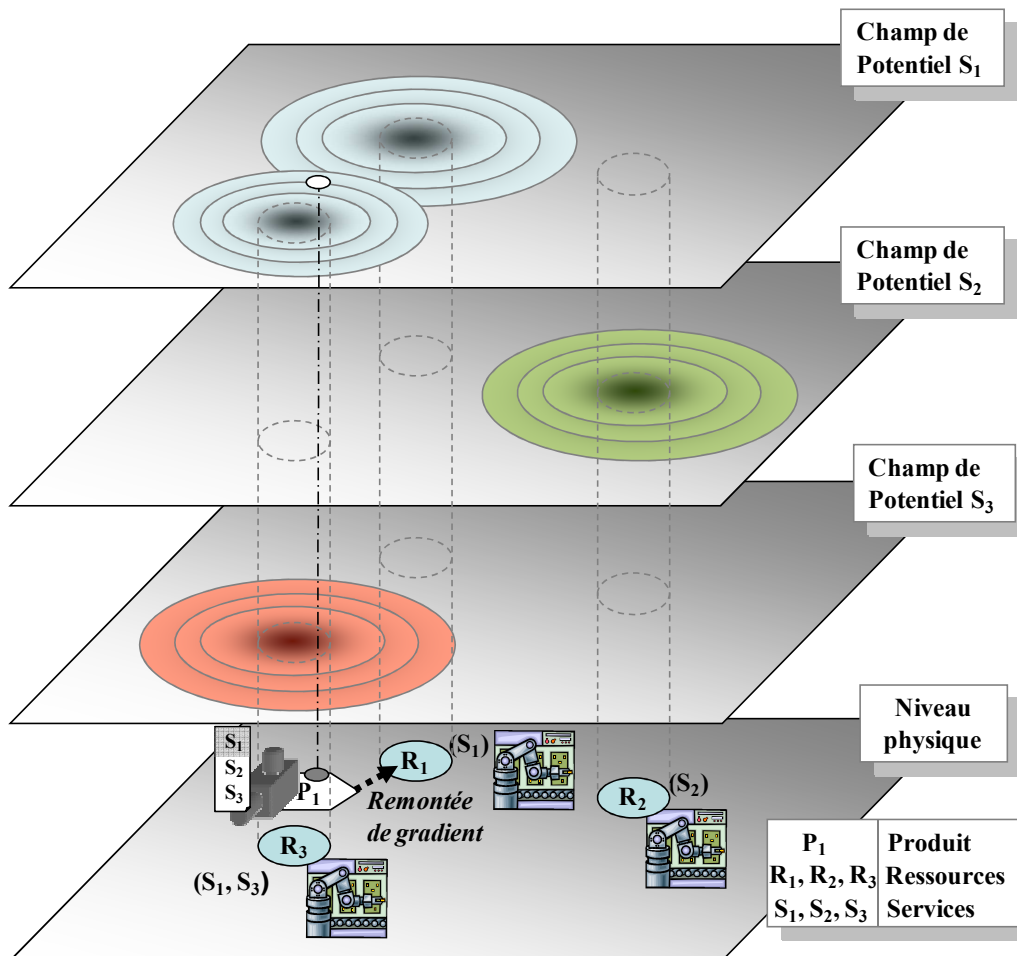


Figure 14- Interaction entre les entités en 2D

2.3. Synthèse

Par comparaison avec d'autres types d'interactions hétérarchiques (par exemple la stigmergie ou le protocole contract-net), l'approche par champs de potentiel est moins usitée pour le pilotage des systèmes de production. La raison principale est liée à la topologie de l'environnement dans lequel les entités évoluent. Intuitivement, les champs de potentiel sont émis dans toutes les directions (2D), tandis que dans les systèmes de production, les produits sont acheminés par des systèmes de transport en 1D, interdisant ainsi toute transposition directe. En outre, dans la plupart des applications (coordination des agents, allocation de ressources, positionnement d'entrepôts en logistique), les auteurs font de la distance entre l'entité mobile attirée et la source d'attraction le seul critère d'évolution du champ. Ils ne prennent pas en compte les temps de transport ou le taux de charge des ressources, entraînant ainsi des comportements sous-optimaux et une baisse des performances globales du système.

Les caractéristiques des champs de potentiel classiquement utilisés se révèlent donc trop limitatives et ne correspondent pas à la complexité inhérente à un système de production.

La partie suivante détaille les spécifications associées à l'élaboration de notre modèle de champ de potentiel.

3. Spécifications associées au modèle de champ de potentiel

Dans cette section, deux catégories de spécifications, préliminaires à l'élaboration de notre modèle, sont introduites : l'une concerne le contexte applicatif et l'autre est relative à l'approche de modélisation par « champs de potentiel ».

3.1. Contexte applicatif

- Le système de production est composé d'entités fixes et d'entités mobiles. Les entités fixes sont des ressources de production ayant une fiabilité limitée. Les pannes et les tâches de maintenance prédictive et/ou curative devront donc être prises en compte. Les ressources sont capables de fournir un ou plusieurs services, avec des temps de production différents. Les entités mobiles sont des produits correspondant aux différents ordres de fabrication possibles. Chaque produit dispose d'une liste de services à obtenir. Une ou plusieurs ressources sont susceptibles d'offrir ces services. Le temps opératoire pour un service donné et pour un type de produit donné est supposé être le même sur toutes les ressources. La file d'attente de chaque ressource, de capacité finie, est régie par une règle FIFO. (Cette spécification est due à des considérations technologiques liées à la cellule flexible utilisée pour les expérimentations réelles).
- Le réseau de routage est modélisé par un graphe fortement connexe. Le graphe est composé :
 - de nœuds de service, où sont situées les ressources,
 - de nœuds décisionnels (divergents) où les produits choisissent quel arc de routage emprunter,
 - d'arcs de routage que les produits empruntent pour se déplacer d'un nœud à un autre (sans nécessité de prise de décision),
 - de nœuds convergents permettant de relier des arcs de routage (là encore, aucune décision n'est nécessaire).

Une boucle permet aux produits de transiter dans le système de production pour atteindre n'importe quelle ressource. Cette boucle de routage est appelée "boucle de référence" et peut être utilisée par des produits attendant qu'une ressource critique soit disponible. Elle ne contient aucun nœud service (ressource) mais uniquement des nœuds décisionnels et convergents.

Le système de transport est supposé être d'une capacité limitée (par exemple, nombre limité de places sur les tronçons de convoyage) et avoir une fiabilité limitée (temps de transport variables dus à des ralentissements, pannes et / ou opérations de maintenance interdisant l'utilisation de certains arcs).

- Les entités mobiles dans le système de production sont des produits « actifs ». Un produit « actif » est un produit capable de communiquer, de s'adapter à des perturbations affectant son environnement, et de prendre des décisions afin de satisfaire ses objectifs.

Le concept de produit « actif » sera abordé en détails dans le prochain chapitre.

3.2. Approche de modélisation

Trois types d'entités doivent être modélisés :

1. Les ressources, localisées sur les nœuds services.
2. Les produits, devant obtenir des services auprès des différentes ressources,
3. L'environnement, lieu où sont placées les entités (ressources, produits), supportant les champs attractifs émis par les ressources.

Les choix suivants ont été effectués:

- Pour réduire le plus possible le comportement myopique (Trentesaux, 2009) du système de pilotage, les ordres de fabrication ("ce qu'il faut produire et quand le livrer") sont sensés être fournis par un système ERP assurant une optimisation à long terme. Ce système ERP instaure une hiérarchie avec les systèmes totalement hétérarchiques d'ordonnancement et de routage ("qui exécute quoi") utilisant les champs de potentiel. La dynamique des interactions entre ces deux niveaux hiérarchiques peut, par exemple, être supportée par un système "Manufacturing Execution System" (MES). Cette problématique ne sera pas détaillée plus avant dans cette thèse.

- Les ressources émettent un champ attractif pour chaque service qu'elles sont susceptibles d'offrir. Si une ressource propose plusieurs services, elle émet alors un vecteur de champs de potentiel.
- Les champs de potentiel sont conçus pour prendre en considération la charge de travail, la disponibilité des ressources et les types de services qu'elles sont capables de fournir. Ils prennent également en compte la topologie du graphe de transport et les temps de déplacement réels entre les produits et les ressources candidates.
- Le produit capte l'ensemble des champs et les filtre pour ne s'intéresser qu'aux champs correspondant au service qu'il désire obtenir. Il remonte alors le gradient correspondant au champ attractif le plus élevé.

La section suivante présente le modèle de champs de potentiel, sur lequel s'appuie l'approche réactive permettant de résoudre conjointement les problèmes d'allocation et de routage dynamique.

4. Modèle de champs de potentiel proposé

L'approche contract-net résout classiquement les problèmes d'allocation de ressources, mais ne prend pas en compte les problèmes de routage (Trentesaux, 2009). En utilisant une approche à base de champs de potentiel, les problèmes d'allocation et de routage peuvent être résolus conjointement. Cette section comporte deux sous-sections principales. La première présente le modèle de champs de potentiel utilisé dans notre travail. La seconde décrit le comportement des produits au sein du système de production.

4.1. Modèle associé à l'approche hétérarchique utilisant les champs de potentiel

4.1.1. Modélisation des produits

Soit $P = \{P_i, i = 1 \dots NP\}$ l'ensemble des produits qui transitent dans un système de production pour obtenir une liste de services appartenant à l'ensemble $S = \{S_k, k = 1 \dots NS\}$. Soit $TYPE = \{T_l, l = 1 \dots NT\}$ l'ensemble des différents types de produits disponibles.

Chaque produit P_i est défini par :

- son type, $TYP(P_i) \in TYPE$,
- la liste ordonnée de services à obtenir, $LS(P_i) = \{S_i^k, k = 1 \dots LL_i\}$ (selon son type), où LL_i est le nombre de services associés à P_i et $S_i^k \in S$,
- le service courant $SC(P_i) \in LS(P_i)$ que le produit P_i tente d'obtenir dans sa liste de services. Les services précédents de la liste sont sensés avoir déjà été obtenus, et les suivants sont supposés être obtenus prochainement.

4.1.2. Modélisation des champs de potentiel associés aux ressources

Soit $R = \{R_j, j = 1 \dots NR\}$ l'ensemble des ressources localisées sur les nœuds services. Chaque ressource émet des champs de potentiel attractif en 1D correspondant aux différents services qu'elle est capable d'offrir. Ces champs sont émis selon la topologie du système de production utilisé (voir l'exemple de la Figure 17). La valeur du champ diminue avec la distance et se propage dans la direction opposée au sens de déplacement des produits.

Les produits prennent les décisions d'allocation et de routage sur des nœuds spécifiques (nœuds décisionnels D_i), correspondant aux divergences sur le graphe de transport. Comme vu précédemment, les champs de potentiel sont filtrés par le produit.

$F(D_i, R_j, S_k)_t$ désigne la valeur du champ de potentiel émis par R_j pour le service S_k pour attirer un produit localisé sur un nœud décisionnel D_i à l'instant t . La formule du champ de potentiel est indépendante du type du produit, car les ressources ne savent pas à destination de quel produit elles émettent leurs champs.

La valeur du champ attractif capté sur un nœud décisionnel D_i dépend de l'attractivité de la ressource R_j qui offre le service S_k à l'instant t et tient également compte de la distance (spatiale / temporelle) séparant D_i de la ressource R_j .

- L'attractivité de la ressource à l'instant t $AT(R_j, S_k)_t$

Ce premier paramètre prend en compte : la qualité d'un service S_k sur la ressource R_j , la charge de travail de la ressource et sa disponibilité (par exemple, si elle peut être indisponible suite à une panne ou à une opération de maintenance). Ce paramètre à l'instant 0 correspond à la valeur maximale du champ de potentiel attractif émis par R_j . L'attractivité évoluera ensuite dans le temps selon la charge de travail de la ressource.

○ Qualité de service

$Q(R_j, S_k)_t$ désigne la qualité associée au service S_k , offert par la ressource R_j à l'instant t . Plus cette valeur est grande, plus la ressource est attractive.

○ Disponibilité de la ressource

$D(R_j)_t$ est une valeur booléenne, cette valeur est égale à 1 si la ressource est disponible à l'instant t , sinon elle vaut 0 (par exemple, en cas de panne ou d'opérations de maintenance). Afin d'éviter tout blocage, cette valeur est mise à 0 si la capacité maximale de la file d'attente est atteinte.

○ Charge de travail courante de la ressource

Soient $LFA(R_j)$ la longueur maximale de la file d'attente, $NFA(R_j)_t$ le nombre de produits dans la file d'attente à l'instant t , $FA^i(R_j)$ le $i^{\text{ème}}$ produit dans la file d'attente et $FA^0(R_j)$ le produit en cours de traitement ;

La charge de travail actuelle d'une ressource dépend de deux paramètres:

- le temps restant $T_{RES}(R_j, FA^0(R_j))_t$ pour achever le service courant du produit $FA^0(R_j)$ à l'instant t sur R_j ,
- la charge de travail associée aux différents produits présents dans la file d'attente.

La formule de calcul de l'attractivité peut alors s'exprimer comme suit :

$$AT(R_j, S_k)_t = \frac{Q(R_j, S_k)_t \cdot D(R_j)_t}{1 + \sum_{f=1}^{NFA(R_j)_t} T_{OP}(TYP(FA^f(R_j)), SC(FA^f(R_j))) + T_{RES}(R_j, FA^0(R_j))_t}$$

Où T_{OP} représente le temps opératoire pour un service S_k fourni par la ressource R_j .

• Diminution du champ attractif avec la distance

L'attractivité du champ de potentiel émis par une ressource R_j décroît en fonction de la distance séparant le nœud décisionnel D_i (où se trouve le produit) et la position de la

ressource. Plusieurs solutions existent pour assurer la décroissance de ce champ, et utilisent principalement des fonctions exponentielles, linéaires ou inverses.

Dans le cadre de la thèse, une fonction linéaire a été utilisée. L'influence des différents types de décroissance sera étudiée dans une future étude (après expérimentation réelle) afin de déterminer plus précisément l'impact sur la performance globale.

Sur la figure 15, les doubles lignes bleues indiquent la fluctuation dans le temps de l'attractivité d'une ressource R_j offrant un service S_k . A l'instant t_0 , $AT(R_j, S_k)_{t_0} = D(R_j, S_k)_0$, car R_j est disponible et $LFA(R_j)_{t_0} = 0$. A l'instant $t_1 > t_0$, R_j est chargée (i.e. des produits sont présents dans sa file d'attente) et son attractivité diminue en conséquence. A l'instant $t_2 > t_1$, la valeur de l'attractivité devient nulle car R_j devient indisponible (suite à une opération de maintenance par exemple). A l'instant t_3 , R_j est de nouveau disponible et son attractivité dépend bien sûr de sa charge de travail. Chaque courbe bleue de la figure 15 décrit la décroissance du champ de potentiel attractif émis par la ressource R_j pour le service S_k en fonction de la distance d .

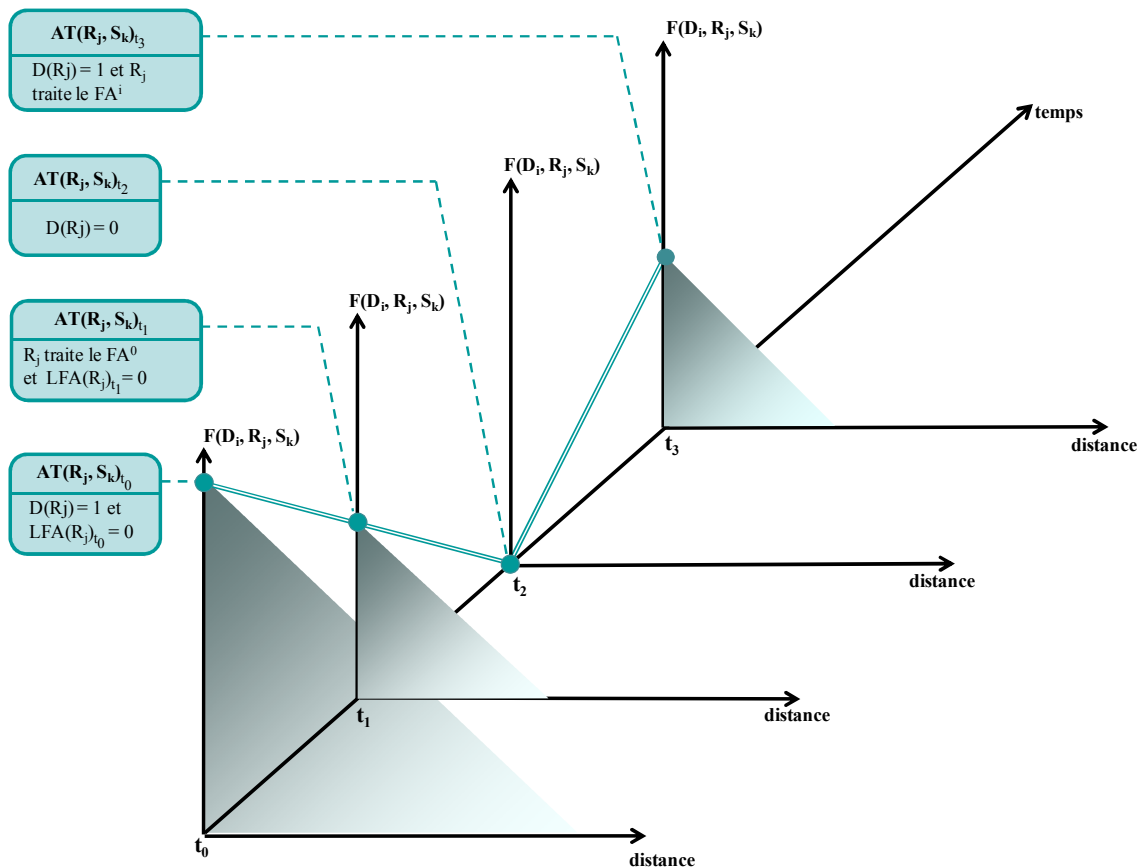


Figure 15- Evolution de l'attractivité de Rj avec le temps

Cette distance est fondamentalement spatiale, mais elle est associée à une valeur temporelle pour deux raisons : D'abord, une vitesse de déplacement constante étant associée à chaque produit, le temps de transport est directement proportionnel à la distance à parcourir. Deuxièmement, les temps de transport évoluent en fonction de la charge réelle du réseau de transport et de sa disponibilité (embouteillage sur un arc par exemple). Néanmoins, la distance physique sera utilisée pour définir les valeurs initiales de la fonction décroissante. Pour ce faire, le réseau de transport étant décrit par un graphe fortement connexe, la distance réelle entre deux points n'est pas la distance euclidienne, mais s'exprime comme la somme des longueurs des arcs reliant ces deux points. La figure 16 présente un exemple de calcul d'une telle distance ; la distance entre le nœud de départ A et le nœud de destination E, est exprimée par $d(A, E) = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$, où d_i est la longueur de chaque arc parcouru.

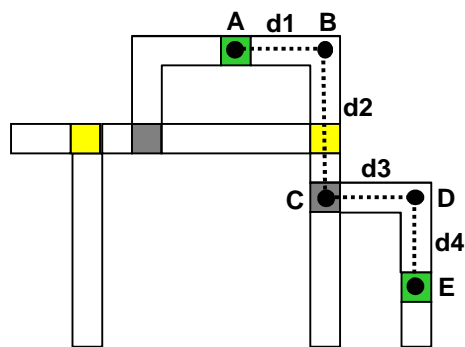


Figure 16- Un exemple de la distance calculée

Une valeur positive étant associée à chaque arc, la distance réelle séparant deux points peut être calculée par un algorithme d'optimisation (par exemple, l'algorithme de Dijkstra). Soit $D = \{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n\}$, l'ensemble des nœuds décisionnels. La matrice de distances à l'instant t s'exprime comme suit :

$$M(d_{ij})_t = \begin{matrix} & R_1 & \dots & R_j & \dots & R_{NR} \\ D_1 & \left(\begin{matrix} d_{11} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1NR} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_i & \begin{matrix} d_{i1} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{iNR} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_n & \begin{matrix} d_{n1} & \dots & d_{nj} & \dots & d_{nNR} \end{matrix} \end{matrix} \right) \end{matrix}$$

où $(d_{ij})_t$ est le temps de transport « minimal courant » entre le nœud décisionnel D_i et la ressource R_j à l'instant t . Cette matrice est mise à jour grâce aux mesures réelles des temps de transport. La mise à jour de cette matrice provoque également la mise à jour automatique des champs attractifs sur chaque nœud décisionnel D_i .

En utilisant les notations précédentes, la relation ci-dessous illustre une possible formalisation du champ de potentiel émis par une ressource R_j , et capté par un produit situé sur un nœud décisionnel D_i cherchant à satisfaire un service S_k à l'instant t . Cette relation tient compte de la distance entre D_i et R_j de façon linéaire :

$$F(D_i, R_j, S_k)_t = AT(R_j, S_k)_t - (d_{ij})_t$$

4.1.3. Choix de la ressource

Soit un produit courant P_C cherchant à obtenir le service courant $SC(P_C)$ (correspondant au service S_k) dans sa liste de services. En arrivant sur un nœud décisionnel D_i , le produit doit prendre une décision d'allocation et de routage afin de se diriger vers la ressource la plus appropriée. La décision repose sur l'intensité des différents champs de potentiel attractifs captés au nœud D_i . Étant donné que chaque ressource émet plusieurs champs simultanément (un pour chaque service offert), le produit applique un filtre pour sélectionner uniquement les champs correspondant au service S_k souhaité. Selon l'une de nos spécifications, le temps opératoire (pour un service précis et pour un type de produit donné) est identique pour toutes les ressources et rend donc inutile sa prise en compte dans le processus de prise de décision.

La ressource est choisie en retenant la valeur maximale de F à l'instant t via la relation suivante :

$$F^*(S_k) = \max_{R_j} (F(D_i, R_j, S_k)_t)$$

Ce choix est fait d'une façon déterministe selon la règle suivante:

$$R^* = \arg \left| \max_{R_j} (F(D_i, R_j, S_k)_t) \right|$$

La figure 17 reprend le principe du champ 2D de la figure 14 en l'appliquant à un graphe 1D représentant le réseau de transport du système de production. Dans cet exemple, trois ressources émettent des champs de potentiel correspondant aux différents services offerts en tenant compte de la topologie du réseau : R_1 (service S_1), R_2 (service S_2), R_3 (services S_1 et S_3). Un produit « actif » (ayant des capacités décisionnelles) entre dans le système avec une liste ordonnée de services (S_1 , S_2 et S_3). Ce produit sélectionne le premier service S_1 de sa liste et commence son déplacement pour détecter un champ qui correspond au service sélectionné. Arrivé à un nœud décisionnel, il capte deux champs relatifs à S_1 , l'un émis par R_1 , l'autre émis par R_3 . Le produit se dirige finalement vers la ressource R_1 qui émet le plus fort champ attractif.

Les services étant ordonnés, le produit est obligé de suivre l'ordre de la liste. Si la séquence des services change dans la liste, le principe de recherche des services reste inchangé : le produit se dirige toujours vers la ressource ayant la plus forte attraction pour le service en cours. Cependant, il n'opérera pas le même choix dans l'ordre des ressources qu'il visitera. En d'autres termes, le produit n'est pas obligé de choisir toujours les mêmes ressources, ni les

mêmes chemins pour satisfaire sa liste de services. Au final, le même produit sera obtenu indépendamment des choix effectués par celui-ci, mais avec des délais de réalisation variables.

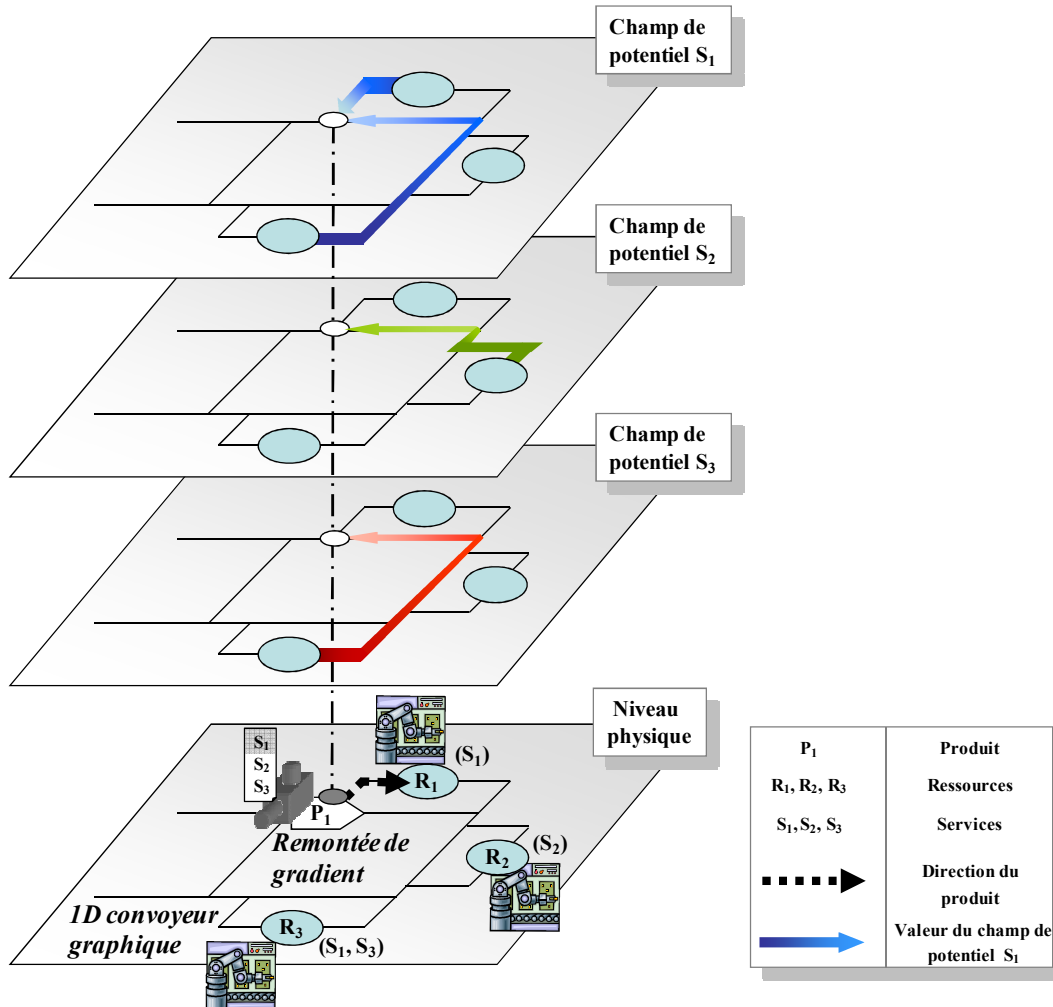


Figure 17- Champs émis par des ressources pour des services spécifiques en 1D

Le comportement associé à un produit peut être représenté par un graphe d'état détaillé dans la sous-section suivante.

4.2. Comportement associé au produit

Le comportement associé au produit est modélisé à l'aide d'un réseau de Petri (David et Alla, 1989). La figure 18 présente le comportement nominal du produit et met en évidence les étapes suivantes :

- Étape 1 : Après son introduction dans le système de production (chargement), le produit doit obtenir tous les services contenus dans une liste ordonnée de services. A ce stade de la production, le service courant se trouve être le premier service de la liste.
- Étape 2 : Le produit recherche un nœud service capable de satisfaire le service courant. Pour atteindre un tel nœud, le produit se déplace vers un nœud décisionnel où il pourra décider quelle direction prendre. Pour effectuer ce choix, le produit capte les valeurs des champs de potentiel au niveau du nœud décisionnel et les filtre selon le type de service demandé.
- Étape 3 : Si aucune ressource ne peut fournir le service demandé, le produit sur un nœud décisionnel ne capte aucun champ. Le produit est alors contraint de choisir le nœud suivant qui lui permettra d'atteindre la boucle de référence. L'aiguillage du produit vers la boucle de référence permet d'éviter certaines situations de blocage. Le produit reste sur cette boucle jusqu'à détection du champ de potentiel approprié, signifiant qu'au moins une ressource est disponible pour le service demandé.
- Étape 4 : Le produit cherche à atteindre le nœud service émettant le champ attractif le plus important.
- Étape 5 : Une fois le nœud service atteint, si la ressource localisée sur le nœud est occupée, le produit entre dans la file d'attente. Il y reste jusqu'à ce que la ressource soit disponible. Le produit entre alors dans une phase de traitement et obtient le service désiré.
- Étape 6 : Après obtention du service courant, le produit cherche à satisfaire le prochain service dans sa liste, et le processus reboucle sur l'étape 2.
- Étape 7 : Lorsque tous les services de la liste ont été obtenus, le produit fini se déplace vers la sortie du système de production (déchargement).

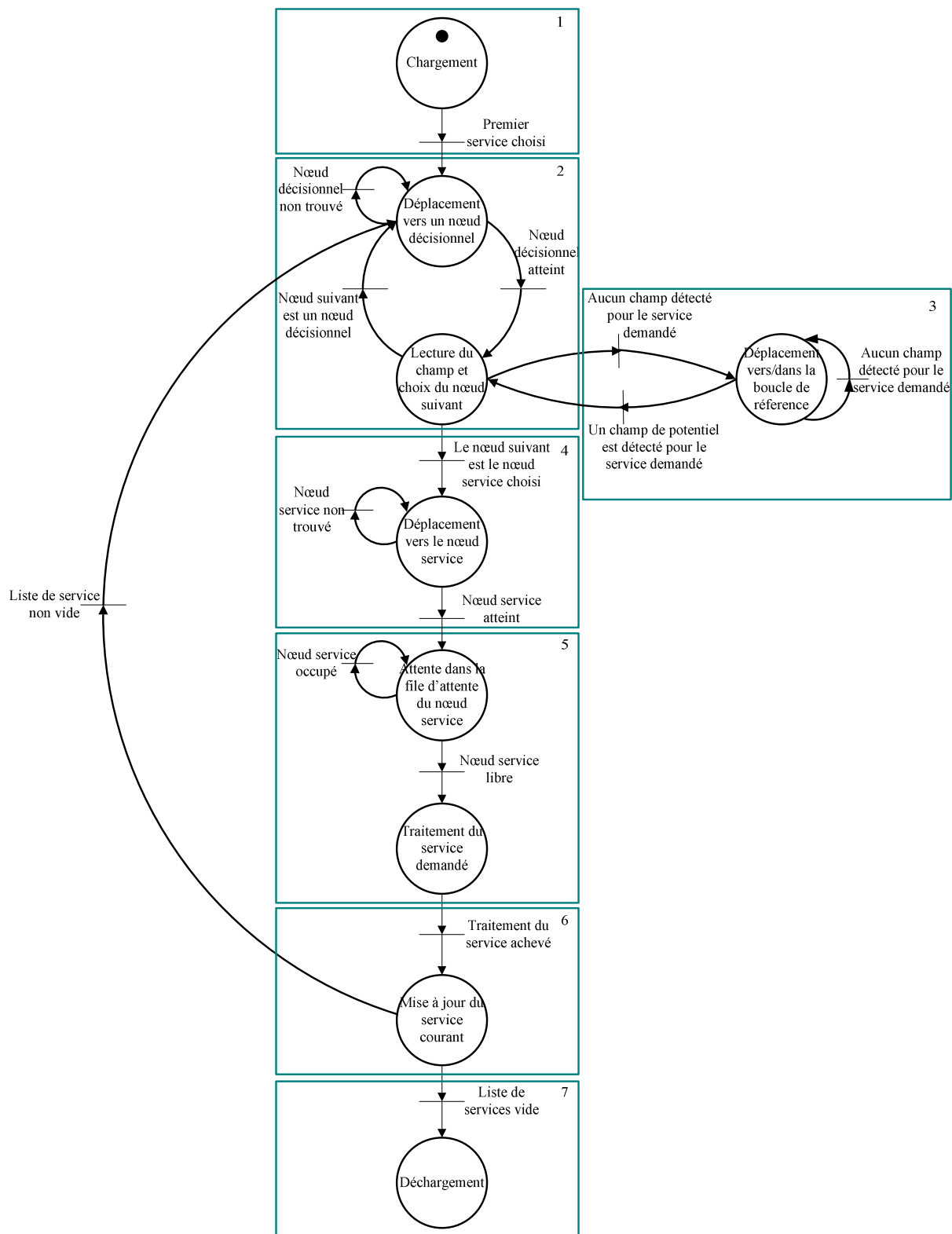


Figure 18- Comportement associé au produit

En complément à la figure 18 décrivant le comportement nominal du produit, le tableau Tab. 3 décrit son comportement dégradé. Certains types de défaillances et de pannes courantes dans un système de production y sont répertoriés.

Type de défaillance		Comportement du produit
La ressource tombe en panne, sans produit dans sa file d'attente ou en cours de traitement	Seule cette ressource est capable de satisfaire le service demandé	Le produit demandant le service se déplace vers (ou reste sur) la boucle de référence jusqu'à détection du champ correspondant (comportement par défaut du produit)
	D'autres ressources sont capables de satisfaire le service demandé	Le produit cherche l'une de ces ressources (fonctionnement naturel selon l'approche du champ de potentiel)
La ressource tombe en panne pendant qu'elle traite un produit		Le produit attend jusqu'au la réparation de la ressource
Le shuttle transportant le produit tombe en panne		Le produit reste bloqué jusqu'à la réparation du shuttle
Une perturbation affecte un tronçon spécifique du convoyeur	C'est un chemin obligé pour atteindre la ressource demandée	Si le produit est déjà sur ce tronçon, il reste bloqué
	D'autres chemins sont possibles pour atteindre cette ressource	Le produit choisit un chemin alternatif (fonctionnement naturel selon l'approche par champ de potentiel)

Tab. 3 Liste de défaillances avec comportements du produit correspondant

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle basé sur les champs de potentiel, permettant de traiter conjointement les problématiques d'allocation et de routage au sein d'un système de production. Ce modèle prend en compte des perturbations (ralentissements, blocages) au niveau du routage et des indisponibilités au niveau des ressources (pannes, opérations de maintenance).

Cette approche présente de nombreux avantages (qui seront validés dans les scénarii de simulation du chapitre IV) :

- les différentes entités (produits ou ressources) peuvent être facilement ajoutées ou supprimées du système,
- la mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de traitements fastidieux,
- un nombre croissant d'entités ne complexifie pas les interactions de manière importante, contrairement aux approches par négociations.

Cependant, comme de nombreuses approches « réactives », elle présente l'inconvénient de ne pas être optimale. En effet, plusieurs produits requérant le même service peuvent se voir attirer vers une même ressource, alors qu'un seul pourra réellement être servi. Appliquée de manière très directe, cette méthode peut entraîner des déplacements inutiles des produits, d'où une prévisible baisse de performances du système de production. Dans le cadre de nos futurs travaux, il conviendra donc d'élaborer un mécanisme plus subtil d'allocation, associant attraction des produits par les ressources et répulsion des produits entre eux.

Comme indiqué dans les spécifications de la section 3.1, l'approche « champs de potentiel » nécessite que les produits soient « actifs ». Les produits jouent en effet un rôle capital dans l'approche que ce soit dans le processus d'allocation des ressources ou dans le processus de routage. Cette notion d'activité, tendant à associer au produit des capacités d'interaction avec l'environnement et des capacités décisionnelles, est détaillée dans le chapitre III suivant.

CHAPITRE III : PROPOSITION D'UN MODELE DU PRODUIT ACTIF

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une approche de pilotage hétérarchique exploitant les champs de potentiels. Cette approche nécessite que les produits soient capables de « ressentir » leur environnement et de supporter un processus décisionnel pour choisir la ressource la plus pertinente et pour ensuite se diriger vers elle.

Comme suggéré dans le chapitre I, les travaux présentés dans cette thèse se situent dans un contexte scientifique associant hétérarchie et intelligence ambiante. Dans ce dernier domaine, des travaux menés au sein de notre équipe tentent à faire émerger le concept de produit « actif » (Sallez et al., 2009b), (Sallez et al., 2010). Nous préférons utiliser le vocable « actif » que le terme « intelligent » pour bien marquer la différence avec un produit classique vu comme une entité « passive », ne faisant que « subir » des traitements de la part des ressources sans jamais pouvoir interagir avec elles.

Le présent chapitre sera consacré à la présentation d'un modèle de produit « actif » reposant sur le concept d'augmentation. Dans une première partie, nous proposons une typologie permettant de positionner les travaux de l'état de l'art sur les produits « actifs/intelligents »,

réalisé dans la deuxième partie. Une analyse de l'état de l'art nous permet de dégager les spécifications d'un produit « actif ». La troisième partie détaille notre modèle de produit « actif », reposant sur le concept d'augmentation.

2. Typologie du produit actif/intelligent

Afin de positionner les travaux de recherche s'intéressant au produit actif/intelligent, nous proposons une typologie prenant en compte les différentes phases du cycle de vie du produit. Plusieurs travaux de recherche (Lemoigne, 1994), (Zbib et al., 2008) et (Meyer et al., 2009) ont introduit des classifications permettant d'analyser les différents types de produits actifs/intelligents.

Dans un contexte général, (Le Moigne, 1994) a décrit l'objet tout au long de son cycle de vie, de l'objet totalement passif à l'objet auto-finalisé. Il a montré qu'un objet « actif » est 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).

Zbib et al. (2008) ont proposé une typologie du produit « actif » basée sur trois axes. Le premier axe représente le cycle de vie du produit et ses différentes phases: conception, fabrication, utilisation et recyclage. Le deuxième axe concerne le type de données embarquées au sein du produit. Le troisième reprend de manière simplifiée la dimension systémique définie par (Le Moigne, 1994).

Dans le même contexte, un travail plus récent (Meyer et al., 2009) a proposé une typologie utilisant trois axes décrivant respectivement le degré, la localisation et le niveau d'agrégation de l'intelligence associée au produit.

Nous synthétisons les différents points de vue présentés dans ces trois propositions afin d'élaborer une classification plus complète. Les différentes caractéristiques du produit actif/intelligent sont analysées selon quatre axes :

1. Degré d'intelligence: Cet axe est structuré en cinq classes permettant de prendre en compte le niveau d'activité / d'intelligence associé à un produit:

Produit passif "PPF": la première classe est représentative d'un produit physique identifié et s'avère très répandue dans le monde industriel. Ce type de produit est automatiquement identifié via un identifiant unique (ID) ne contenant que des données statiques (référence fournisseur ou référence de l'ordre de fabrication). Ce produit est qualifié de « passif » puisqu'il ne peut que répondre aux requêtes de lecture (issues de demandeurs de services). Il ne peut envoyer de requêtes dans son environnement de sa propre initiative.

Produit informationnel "PIL": cette classe est représentative d'un produit physique identifié équipé d'une mémoire pouvant être lue et écrite pour enregistrer des données dynamiques. Ce produit contient donc un ensemble d'informations dynamiques utiles lors du cycle de vie du produit à des fins de traçabilité par exemple.

Produit déclencheur "PDR": cette classe concerne un produit qui est capable d'envoyer un signal dans son environnement. Il peut par exemple avertir son utilisateur en cas d'événement concernant son état interne tel qu'un dépassement de date de péremption. Si ce produit est capable d'envoyer des messages dans son environnement, il n'est pas à même de supporter un réel processus décisionnel. Nous considérons d'un produit peut être qualifié d' « actif » à partir cette classe.

Produit décisionnel "PDL": dans cette quatrième classe, le produit est représenté par un produit physique identifié doté de capacités décisionnelles. Ce produit a une capacité de traitement de l'information et il est capable de participer à des processus décisionnels et/ou de prendre des décisions lui-même concernant son propre « destin » au cours de son cycle de vie. Ce produit peut être considéré comme un demandeur et fournisseur de services vis-à-vis des entités présentes dans son environnement (Cea Ramirez et Bajic, 2005).

Produit acteur physique "PAP": cette classe représente le niveau d'activité le plus élevé pouvant être associé au produit. Ce type de produit hérite des fonctionnalités de la classe précédente, mais est également équipé de capteurs et d'actionneurs intégrés lui permettant d'interagir directement avec son environnement.

2. Localisation de l'intelligence : lorsque le produit est « actif », cela ne signifie pas nécessairement que l'intelligence est embarquée dans celui-ci. Deux cas peuvent être alors identifiés:

Intelligence distante "ID": L'intelligence du produit se trouve déportée en dehors du produit physique. C'est une situation très couramment rencontrée dans le domaine industriel. Par exemple, le produit est relié à une unité de traitement externe dans laquelle un agent spécialisé gère le processus décisionnel concernant le produit (Meyer et al., 2009).

Intelligence embarquée "IE": le produit physique contient une unité de traitement capable de supporter le processus décisionnel.

3. Niveau d'agrégation de l'intelligence : cette dimension introduite par (Meyer et al., 2009) traite de l'agrégation de l'intelligence dans les produits. Deux catégories peuvent être distinguées :

Item intelligent "II": Le produit ne gère que ses propres informations, notifications et / ou décisions. S'il contient d'autres composants, ceux-ci ne peuvent pas être distingués comme des objets intelligents.

Conteneur intelligent "CI": Le conteneur intelligent ne gère pas seulement les informations, les notifications et / ou décisions pour lui-même, mais il est également « conscient » des composants qu'il contient. Un produit « actif » peut alors être considéré comme étant récursivement composé d'autres produits « actifs » ou de produits passifs terminaux. Un produit passif est quant à lui uniquement composé d'éléments terminaux (matière première, composants basiques). Cette dimension d'agrégation de l'intelligence peut être décrite selon une approche holonique comme l'illustre la figure 19.

Cette approche holonique s'avère particulièrement utile dans des domaines applicatifs, où de nombreux produits « actifs » sont susceptibles d'interagir entre eux, tel que dans des processus d'assemblage par exemple.

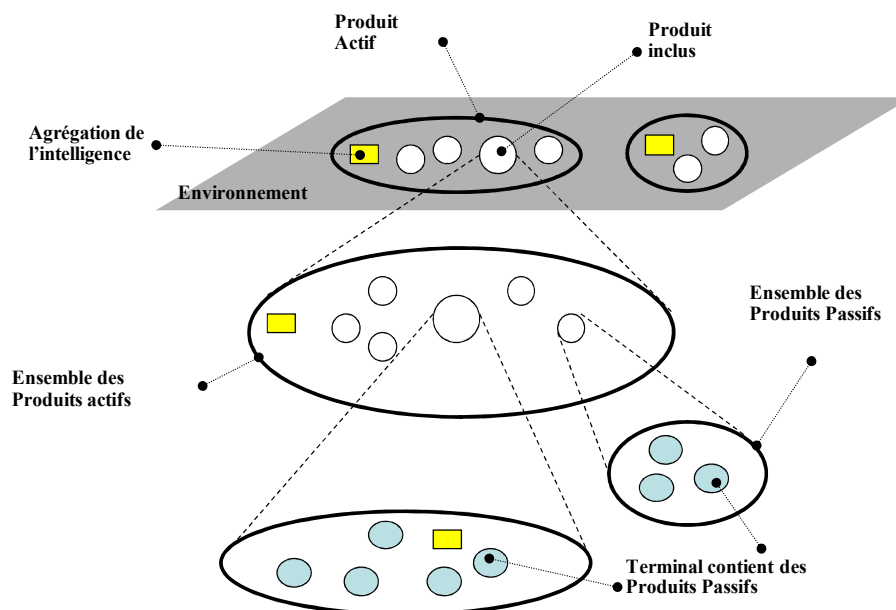


Figure 19- Approche holonique pour le produit actif (Zbib et al., 2008)

4. Cycle de vie : Cet axe reprend les différentes phases du cycle de vie du produit (conception, fabrication, distribution, utilisation et recyclage). Nous illustrons ci-dessous quelques applications possibles du produit « actif » pour les différentes phases. Une présentation plus détaillée est disponible dans (Sallez et al., 2010).

La phase de conception "C": Le produit (à l'état de maquette virtuelle) peut revêtir un rôle « actif » lors de cette phase en cadencant les différents processus de conception selon l'état d'avancement de l'étude (Malherbe et al., 2007). Les concepteurs exploitent également les retours d'expérience issus des phases du milieu de vie des produits (par exemple, les modes d'utilisation) et de la phase de fin de vie (par exemple, les conditions de démontage et de recyclage) afin d'apporter des améliorations aux futures générations de produits.

La phase de fabrication "F": lors de cette phase, le paradigme de « Système contrôlé par le produit » (Pannequin et al., 2009) peut être considéré comme une réponse à la personnalisation de masse. Cette phase sera plus particulièrement détaillée dans l'état de l'art de la prochaine section.

La phase de distribution "D": la capacité d'un produit "actif" à fournir des informations sur son état et à capter des informations sur son environnement peut être utilisée pour améliorer la sécurité dans le stockage ou les activités de distribution (Dobre et al., 2009). Cette capacité est bien évidemment également utilisée pour enrichir les informations de traçabilité.

La phase d'utilisation "U": le produit "actif" peut supporter des fonctions d'auto-diagnostic utiles pour mener des opérations de maintenance prédictive et pour accroître ainsi la disponibilité du produit et réduire les temps de maintenance (Jun et al., 2007).

La phase de recyclage "R" : les gestionnaires de cette phase obtiennent des informations plus précises sur les produits, issues des phases antérieures du cycle de vie, permettant ainsi d'optimiser le recyclage en connaissant par avance l'état des produits (Parlikad et al., 2007).

La figure 20 résume la classification proposée. Elle est utilisée pour positionner les différents travaux de l'état de l'art de la partie suivante.

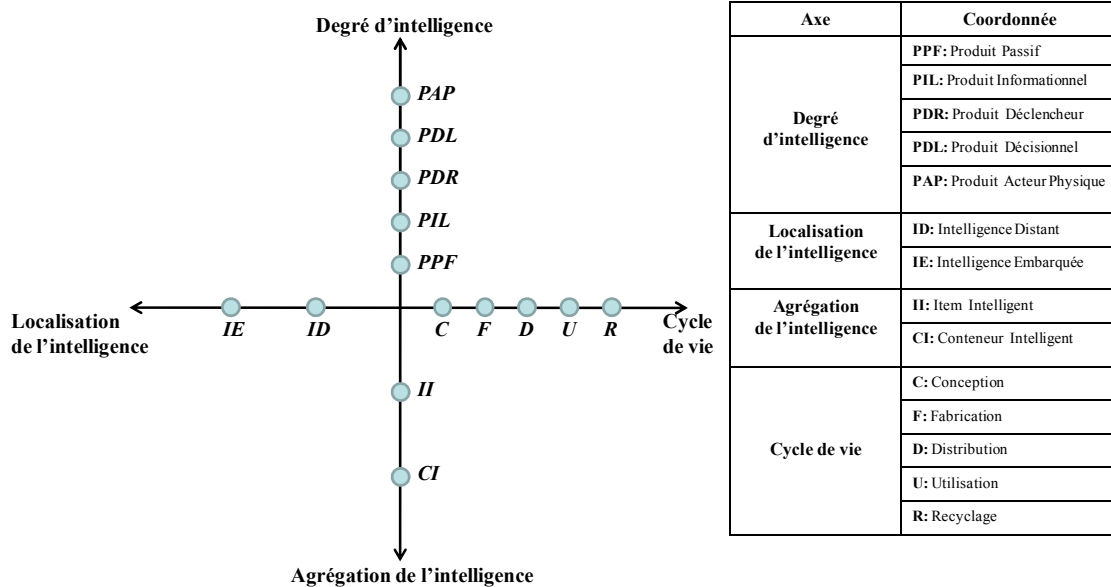


Figure 20- les différents axes de notre typologie

3. Etat de l'art sur les produits actifs/intelligents dans le domaine manufacturier

De nombreux travaux de recherche s'intéressent à la notion d'intelligence ou d'activité associée au produit tout au long du cycle de vie (de la conception jusqu'au démantèlement) (Jun et al., 2007), (Terzi et al., 2008).

Cette section présente les différentes définitions de produits intelligents/actifs recensées dans la littérature portant sur les systèmes manufacturiers. 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.

3.1. Différents concepts du produit intelligent/actif

Dans le contexte manufacturier, (Brun Picard et al., 1997) ont utilisé le terme de « produit actif » dans le cadre du pilotage d'un système manufacturier, dans lequel les entités autonomes coopèrent et coordonnent leurs actions pour atteindre leurs objectifs. Dans ce contexte, chaque entité est capable de communiquer, de décider, et de négocier avec les ressources pour répondre à ses besoins. La figure 21 illustre le produit actif proposé par de Brun Picard.

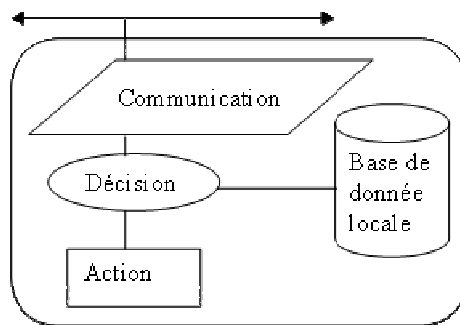


Figure 21- Produit actif (Brun picard et al., 1997)

La capacité décisionnelle associée au produit permet de coordonner ses actions avec celles des autres entités afin de faire face à des événements inattendus. Le module de communication assure les échanges d'information entre les entités. La base de données représente l'accès à l'information locale associée à chaque produit. La figure 22 montre le positionnement de ce type de produit "actif" vis-à-vis de notre typologie.

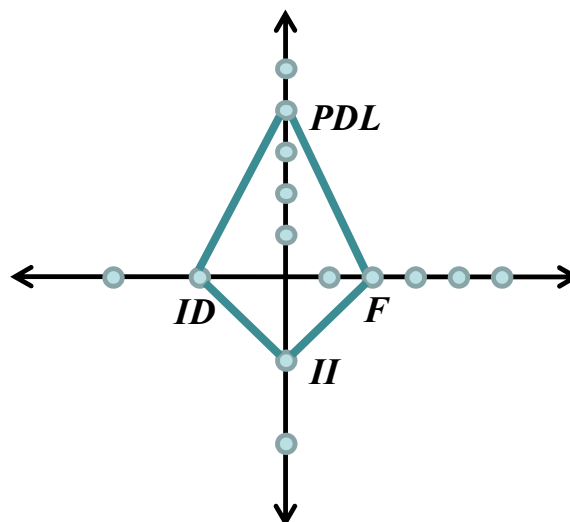


Figure 22- Positionnement du produit actif

Dans le même contexte manufacturier, (McFarlane et al., 2002) ont défini un produit informationnel "*Intelligent product*" comme une représentation physique et informationnelle d'un objet présentant les caractéristiques suivantes :

- il possède une identification unique ;
- il est capable de communiquer efficacement avec son environnement ;
- il peut mémoriser ou stocker des données le concernant ;
- il dispose d'un langage de communication pour transmettre ses caractéristiques et ses « besoins » pendant son cycle de vie ;
- il est capable de participer à des processus décisionnels ou de prendre des décisions appropriées relatives à son propre « destin ».

McFarlane a identifié deux niveaux d'*Intelligent Product* :

1. Produit informationnel

Un produit informationnel possède la capacité de surveiller, d'analyser et de raisonner au sujet de son état actuel ou futur.

2. Produit décisionnel

C'est un produit informationnel avec la capacité d'influencer son « destin » par des prises de décision. La figure 23 présente un *intelligent product* sous la forme d'un produit identifié communiquant avec un agent décisionnel distant.

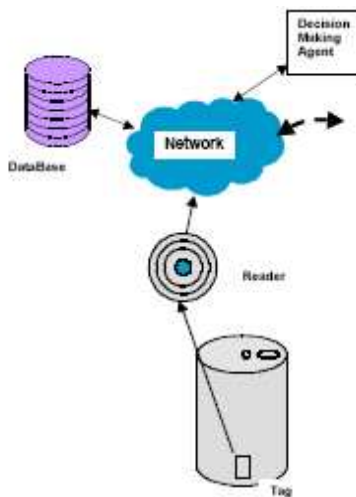


Figure 23- Produit intelligent avec un agent de décision (McFarlane et al., 2002)

Les deux types de produits définis par Macfarlane sont positionnés sur la figure 24.

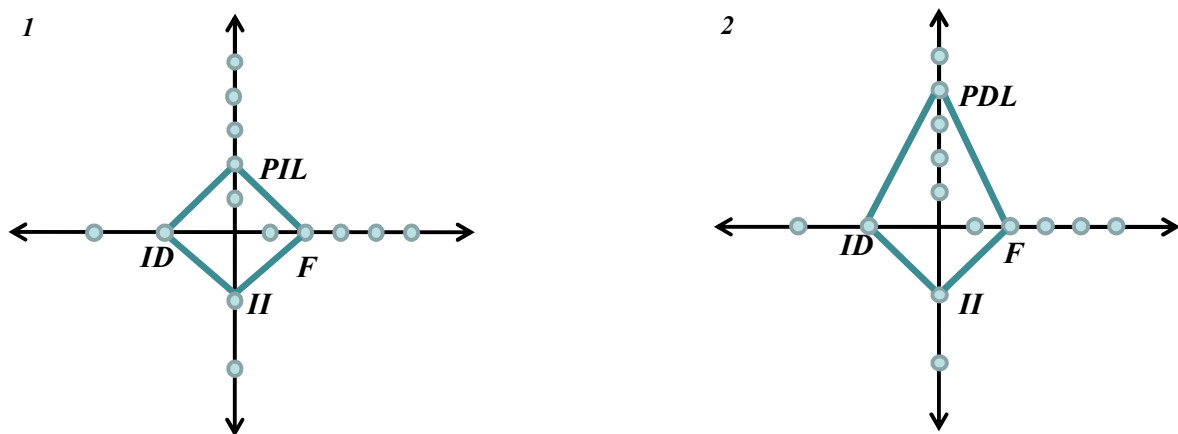


Figure 24- Positionnement du Produit Informationnel de Macfarlane

Toujours dans le contexte manufacturier, Bajic (2004) a défini un « objet communicant » comme un objet physique qui est capable de communiquer avec son environnement, ses utilisateurs et d'autres objets ou entités. Bajic (2004) a également distingué quatre catégories d'objets:

1. Objet porteur des données

Le but de ce type d'objet est de stocker des données minimales qui sont ensuite accessibles par des ressources externes. Ce type est implémenté avec la technologie du code barre et de la radiofréquence pour assurer l'échange d'informations et une identification automatique.

2. Objet pointeur vers un système d'information

Cet objet est identifié avec un système RFID (*Radio Frequency IDentification*) qui l'aide à pointer vers un système d'information (ex : page web). Dans ce système d'information une image virtuelle représente l'objet. L'objet physique ne peut agir de façon directe sur les autres entités.

La Figure 25 fournit un exemple d'objet communicant reposant sur un objet physique A identifié par un système RFID et géré par la machine A. La représentation virtuelle de l'objet A se trouve sur une étiquette électronique et sur une base de données située à distance. La machine A assure l'accès à la représentation informationnelle de l'objet via une base de données accessible par Internet.

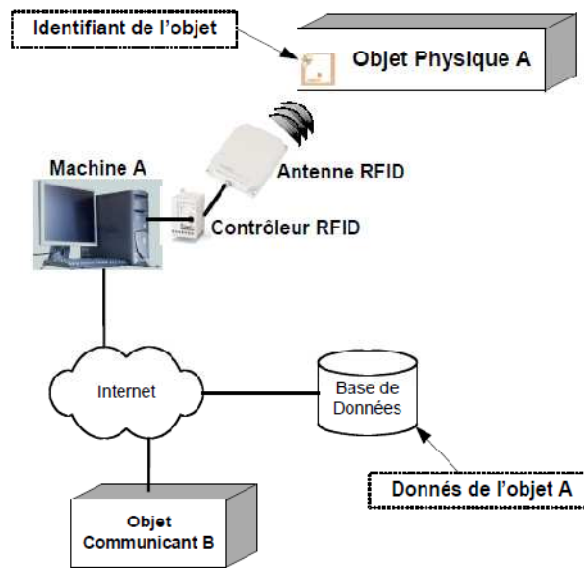


Figure 25- Objet pointeur vers un système d'information (Bajic, 2004)

3. Objet fournisseur et demandeur des services

L'objet est un fournisseur lorsqu'il offre des services aux acteurs et un demandeur lorsqu'il demande des services aux acteurs. Cet objet a un double rôle : il est passif lorsqu'il répond aux ordres (fournisseur), et actif lorsqu'il génère une requête (demandeur). La Figure 26 illustre le mécanisme assuré par ce type d'objet.

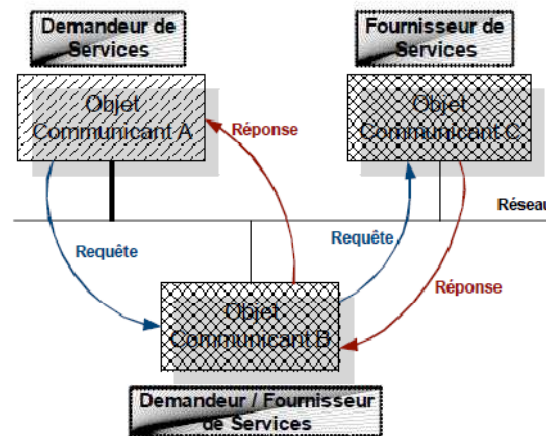


Figure 26- Objet demandeur et fournisseur des services (Bajic, 2004)

4. Objet communicant sensitif

Des capteurs sont intégrés dans l'objet, lui permettant d'acquérir de l'information sur son environnement. L'objet est également capable de communiquer avec d'autres entités et de traiter de façon autonome des données locales. A titre d'exemple, la figure 27 montre une *mediacup* qui est une tasse à café dotée de toutes les capacités qui caractérisent un objet

communicant sensible: traitement de l'information, interaction avec l'environnement physique à travers des capteurs et communication avec d'autres objets via une communication sans fil (Beigl et al., 2001).



Figure 27- Mediacup (Beigl et al., 2001)

La figure 28 montre la localisation des quatre catégories de produit définies par Bajic.

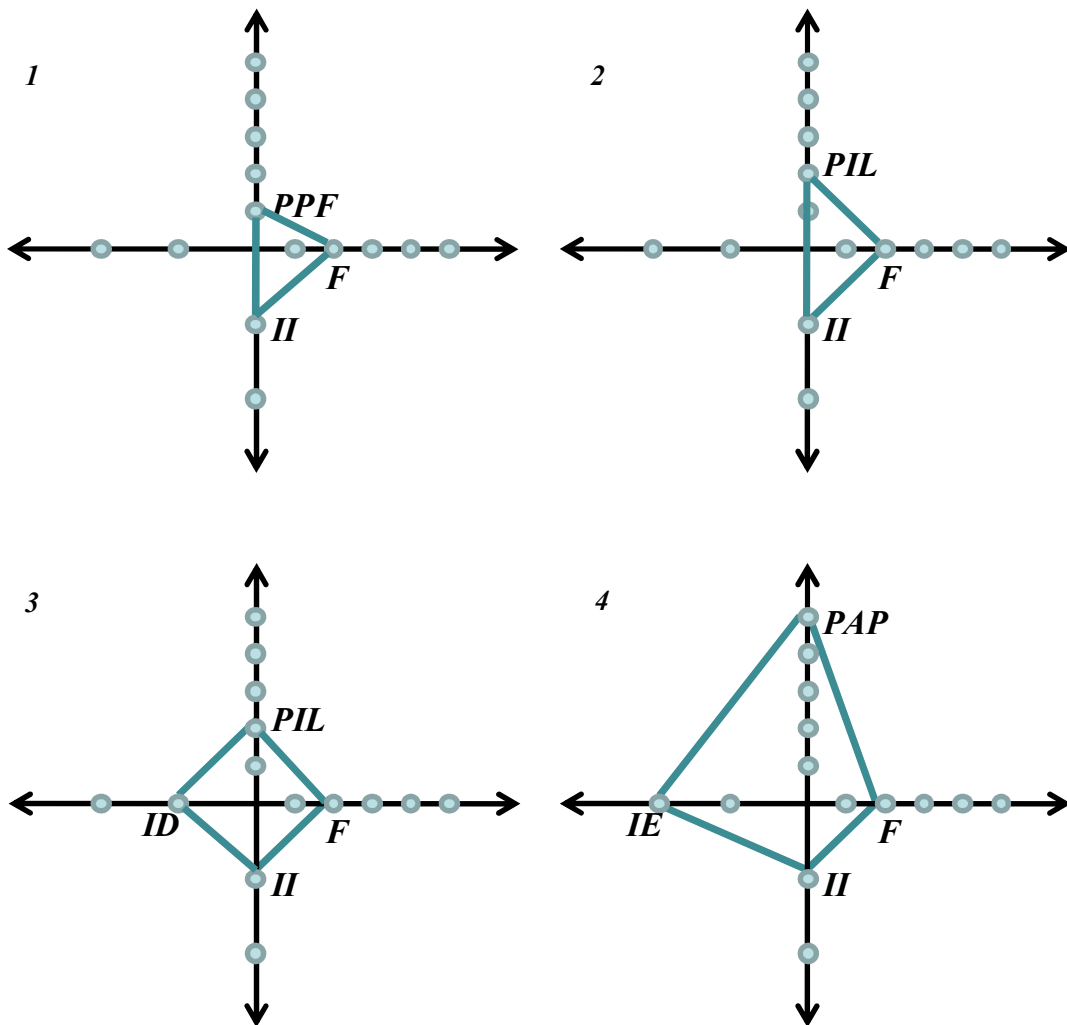


Figure 28- Représentation des objets communicants (Bajic, 2004)

Des travaux de Recherche plus récents (Cea Ramirez, 2006 ; Dobre et Bajic, 2008) ont enrichi les propositions initiales de Bajic.

Dans la phase de fabrication, Cea Ramirez (2006) décrit un objet communiquant comme un objet composé d'une partie physique et d'une partie informationnelle, avec des capacités de mémorisation, de communication et de prise de décision. Cet auteur a proposé trois types d'objets communicants (passif, actif et actif unifié) exploitant les fonctionnalités de dispositifs UPnP (*Universal Plug and Play*).

La figure 29 montre le classement des produits actifs définis par Cea Ramirez.

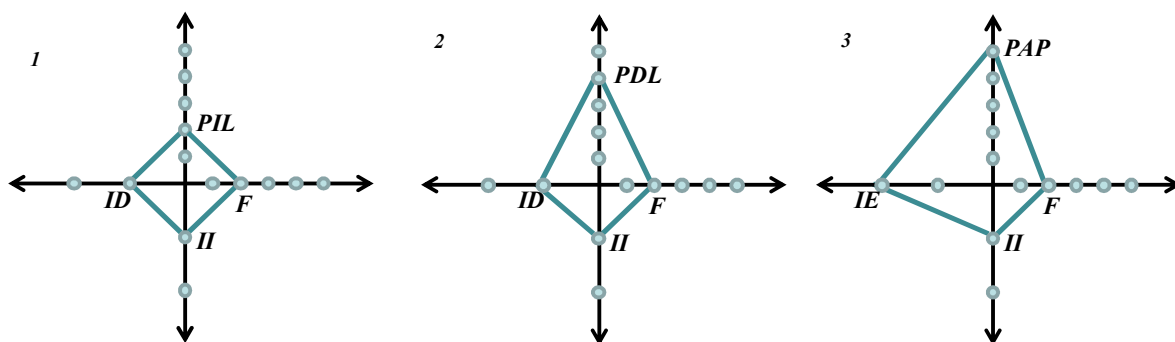


Figure 29- Objets communicants de Cea Ramirez

Dans la phase d'utilisation, Dobre et Bajic (2008) ont également fait évoluer le concept d'objet sensible en phase d'utilisation. Ils ont appliqué le principe du produit « actif » au stockage de produits chimiques dangereux. La figure 30 présente le produit comme un objet autonome capable de recueillir les données provenant de son environnement et de les traiter.



Figure 30- Produit actif dans un environnement d'intelligence ambient (Dobre et Bajic, 2008)

En cas d'une menace environnementale (température trop élevée par exemple), ce produit envoie un signal pour avertir la personne responsable de la sécurité. Lorsque les produits sont proches, ils sont également capables de communiquer entre eux, de s'échanger des informations. Cette caractéristique permet la détection d'éventuelles incompatibilités entre produits. Cet ensemble d'interactions entre produits et entre produit et environnement permet de créer un dispositif de sécurité active. La figure 31 positionne cette application selon notre typologie.

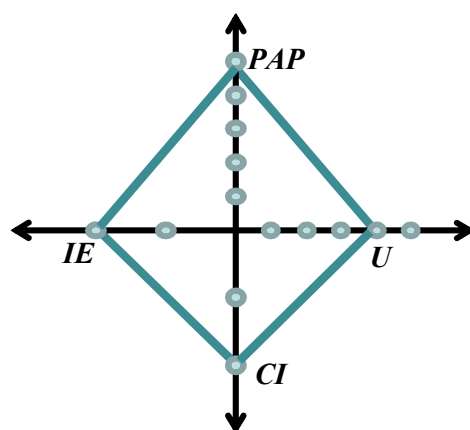


Figure 31- Positionnement du produit « actif » défini par Dobre

3.2. Synthèse de l'état de l'art

En se référant à l'état de l'art précédent, plusieurs faits méritent d'être soulignés :

- la signification du terme « intelligent » peut différer fortement d'un auteur à un autre. Nous pouvons en conclure qu'il n'existe pas de définition bien stable de la notion de produit « intelligent/actif » et que la plupart des définitions reconnues sont axées sur une technologie ou une phase spécifique du cycle de vie du produit.
- Si de nombreuses applications s'intéressent aux produits comportant des données statiques embarquées, très peu exploitent le potentiel des données dynamiques et/ou de traitements embarqués sur le produit.
- Enfin, aucun des auteurs cités ne propose un modèle adapté à la fois au contexte de la fabrication et à celui de l'exploitation des produits, et plus généralement à l'ensemble du cycle de vie.

Par la suite, nous présentons un ensemble de spécifications indispensables à l'élaboration d'un modèle générique de produit « actif ».

3.3. Spécifications

Afin de répondre aux critiques précédentes, le modèle du produit « actif » doit présenter les propriétés suivantes:

- il doit être suffisamment générique pour être utilisable dans n'importe quelle phase du cycle de vie du produit, de la conception jusqu'au recyclage. Par conséquent, il doit être capable de faire face aux différentes phases d'avancement du produit (c'est-à-dire, la maquette, le produit non opérationnel, le produit opérationnel, le produit en exploitation et le produit recyclé).
- il doit être récursif pour 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 durant plusieurs phases de cycle de vie successives,
- il doit être indépendant de la technologie.

Sur la base de ces spécifications, nous proposons dans la partie suivante un modèle de produit « actif » utilisant le concept d'augmentation.

4. Notre proposition de produit « actif »

4.1. Concept de produit « actif »

Nous considérons qu'un produit « actif » est un produit capable d'identifier son état, de comparer son état avec un état désiré et lorsque certaines conditions sont remplies, de déclencher un signal et/ou de transmettre des informations.

Bien sûr, d'autres activités plus complexes peuvent également être considérées (par exemple, la mémorisation, l'apprentissage et la négociation), mais l'activité minimale à notre point de vue est la capacité à déclencher un signal et à exprimer un besoin. Par exemple, un produit « actif » dans la phase de fabrication devrait être capable de demander un service d'assemblage; un produit « actif » dans la phase de distribution devrait être capable de déterminer s'il peut être transporté sans aucun risque dans son environnement ; un produit « actif » dans la phase d'utilisation devrait être capable de prévoir les dysfonctionnements à court terme et d'en informer son utilisateur. La figure 32 résume les principales

caractéristiques du produit « actif », et montre qu'un produit actif est capable de déclencher une demande à un système support, sensé lui fournir le service dont il a besoin.

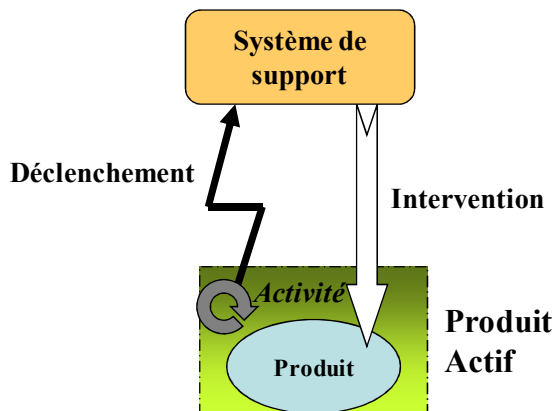


Figure 32- Vue schématique du "produit actif"

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

4.2. Système cible

Le système cible dispose d'un ensemble de fonctions primaires permettant de fournir des services à un ou plusieurs utilisateurs. Pour exister et continuer d'exister, le produit a également besoin de fonctions secondaires en complément aux fonctions primaires. Les objectifs de ces fonctions secondaires sont les suivants :

- assurer que \sum^C soit bien conçu, fabriqué, livré, entretenu et enfin recyclé;
- améliorer les critères de performance associés aux fonctions primaires.

Toutes les fonctions primaires sont censées être intégrées et gérées au sein du « système cible ». Les fonctions secondaires quant à elles ne sont pas nécessairement intégrées dans le « système cible » et peuvent être prises en charges par le système de soutien \sum^S .

Notations des fonctions:

- F^{int} : ensemble de toutes les fonctions internes,
- F_{pri}^{int} : ensemble des fonctions internes et primaires supportées par \sum^C ,
- F_{sec}^{int} : ensemble des fonctions internes et secondaires supportées par \sum^C ,

- F^{ext} : ensemble des fonctions externes supportées par Σ^S .

Evidemment, $F^{int} = F_{pri}^{int} \cup F_{sec}^{int}$.

La figure 33 représente la répartition de ces fonctions.

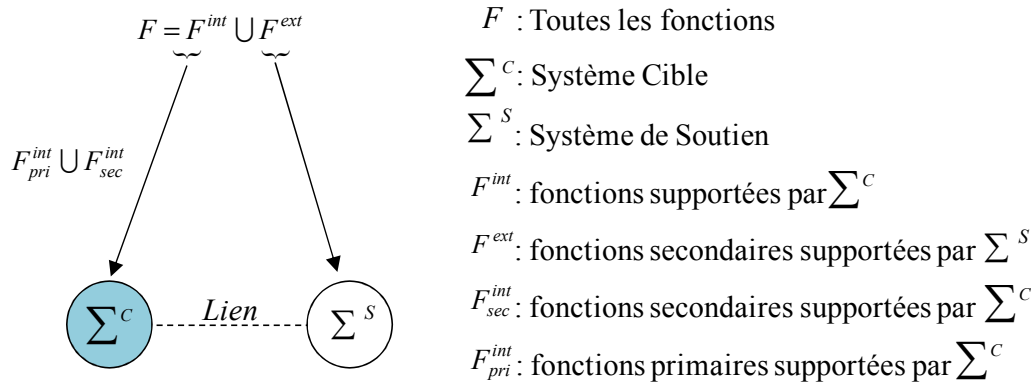


Figure 33- Représentation des fonctions, système cible et système de soutien

Il existe un lien entre les deux systèmes Σ^C et Σ^S . Ce lien peut être informationnel, physique ou temporel. La technologie RFID est un exemple de lien possible. Dans ce système, l'identifiant qui se trouve sur le tag est physiquement associé à Σ^C , un autre dispositif distant (système de traitement externe) prend en compte cet identifiant lors du lancement de procédures nécessitant le traitement de données relatives à Σ^C . Dans cet exemple, le tag RFID intégré sur Σ^C et le dispositif distant, peuvent être considérés comme des sous-systèmes de Σ^S . Le lien entre le tag et Σ^C est physique et le lien entre le tag et le système de traitement des données est informationnel.

Notre approche de modélisation consiste à supporter certaines fonctions secondaires externes automatiquement (sans intervention humaine) sur un système particulier, appelé système d'augmentation et noté Σ^{SA} .

La section suivante décrit ce système d'augmentation.

4.3. Notion de système d'augmentation

Le système d'augmentation \sum^{SA} est conçu pour supporter l'activité basique de déclenchement d'événement introduite dans la section 4.1 ainsi que des activités plus complexes telles que la communication, la mémorisation et/ou le traitement d'informations.

Un système « cible augmenté » est le résultat de l'embarquement de \sum^{SA} dans \sum^C (Figure 34). L'ensemble de fonctions secondaires externes supportées par \sum^{SA} est noté F^A . Le reste des fonctions secondaires externes notées $F^{\bar{A}}$ sont supportées par le système de soutien externe noté \sum^{S_A} . La relation $F^{ext} = F^A \cup F^{\bar{A}}$ existe toujours, et $\sum^S = \sum^{SA} + \sum^{S_A}$.

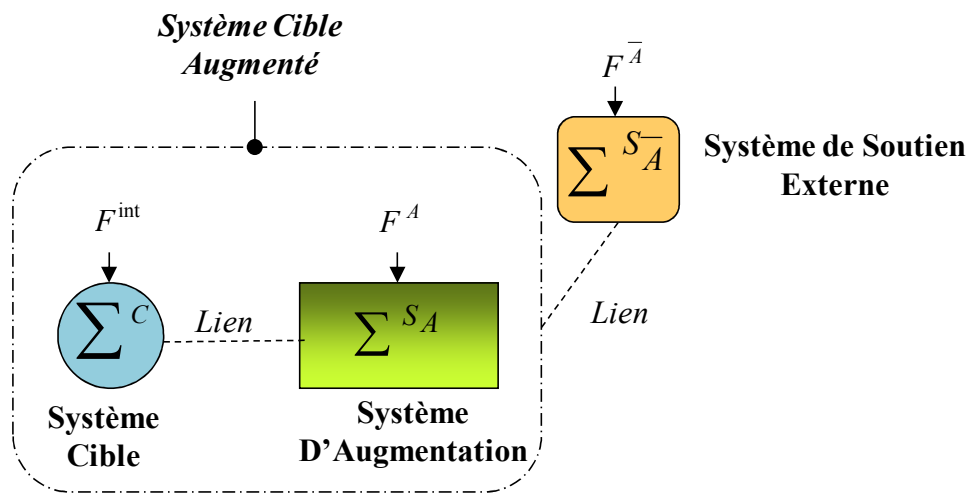


Figure 34- Représentation du système cible augmenté, du système d'augmentation et du système de soutien externe

Une vue organique du système cible augmenté est présentée ci-après et décrit précisément la façon dont les fonctions peuvent être prises en charge par le système d'augmentation \sum^{SA} .

4.4. Vue organique du système cible augmenté

Immergé au sein de plus grands systèmes, \sum^{SA} influence et est influencé par ces systèmes. \sum^{SA} interagit avec d'autres systèmes et contribue à l'amélioration de la performance du système auquel il appartient. \sum^{SA} prend également en charge les fonctions F^A associées à

une ou plusieurs phases du cycle de vie. \sum^{SA} est composé de deux sous-systèmes: \sum_{inf}^{SA} and \sum_{phy}^{SA} , supportant respectivement les processus informationnels et physiques.

Cette proposition de \sum^{SA} est proche des caractéristiques bien connues de l'approche holonique défini par Koestler (Koestler, 1967). \sum^{SA} peut en effet être considéré comme un Holon composé des parties informationnelles et physiques.

La figure 35 présente un exemple d'architecture de système d'augmentation. Comme défini précédemment, le système cible augmenté est l'agrégation de \sum^C et \sum^{SA} . Dans le cas général, \sum^C est également composé de deux sous-systèmes: \sum_{inf}^C dans le domaine informationnel et \sum_{phy}^C dans le domaine physique.

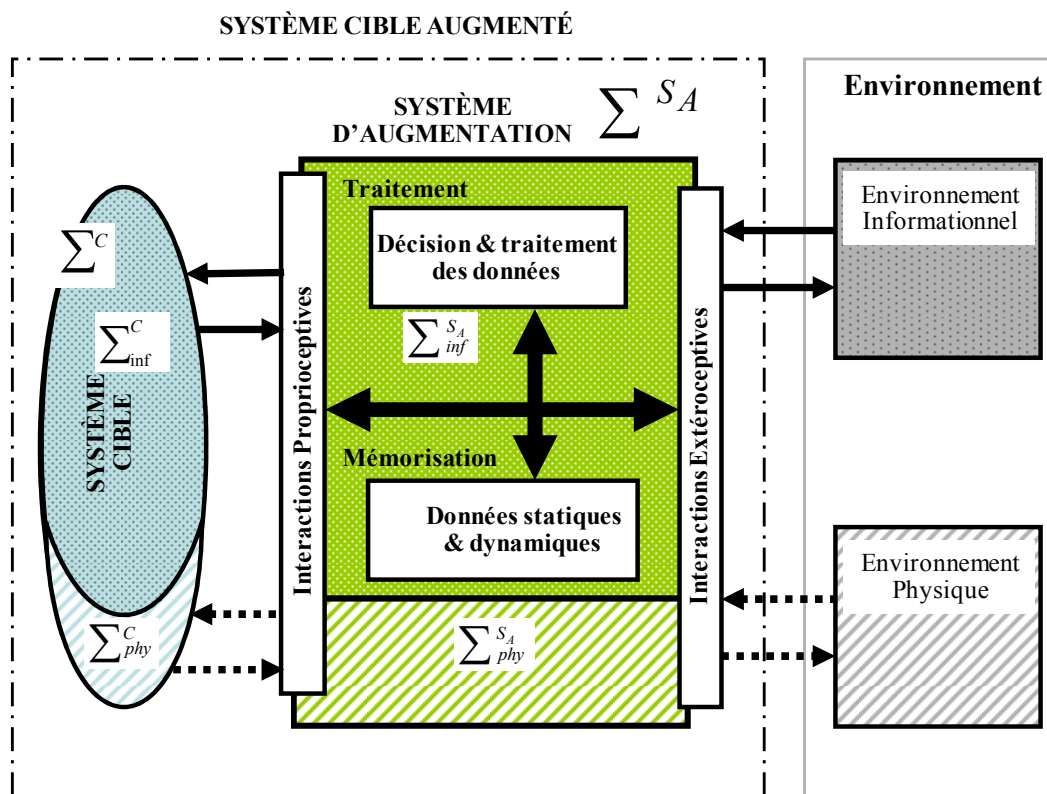


Figure 35- Système d'augmentation et Système cible augmenté

Dans ce modèle architectural, le système d'augmentation \sum^{SA} est composé de trois blocs fonctionnels : mémorisation, traitement et interactions :

- Mémorisation : ce bloc traite des données statiques (lecture seule) et des données dynamiques (lecture / écriture). A titre d'exemple, dans le contexte manufacturier, l'identificateur (*ID*) d'un produit fait partie des données statiques, alors que la liste de services à obtenir auprès des ressources fait partie des données dynamiques.
- Traitement : ce bloc assure le traitement de données et/ou supporte un traitement décisionnel. Un exemple de traitement de données peut être une procédure qui collecte et synthétise des informations pour assurer la traçabilité de \sum^C .

Le traitement décisionnel implique des actions plus symboliques. Il permet par exemple d'assurer l'allocation dynamique des ressources, l'apprentissage des meilleures routes pour l'acheminement de \sum^C ou l'adaptation aux perturbations (dans la phase de fabrication).

- Interactions : deux types d'interactions peuvent être identifiés, soit entre le système d'augmentation \sum^{SA} et le système cible \sum^C , soit entre le système cible augmenté et les autres entités \sum^{S_i} dans l'environnement informationnel et /ou physique.

Le premier type est appelé interaction *proprioceptive* et implique, par exemple, la surveillance de l'état physique de \sum^C (ex. la température, la pression, la résistance mécanique) par \sum^{SA} .

Le deuxième, appelé interaction *extéroceptive*, peut impliquer une interaction physique ou informationnelle. Un exemple d'interaction physique est l'utilisation de capteurs pour déterminer certaines caractéristiques de l'environnement (température par exemple). L'interaction informationnelle assure la communication du système augmenté avec d'autres systèmes \sum^S qui assurent sa fabrication par exemple.

Pour gérer sa propre évolution, un système augmenté peut utiliser à la fois l'information embarquée dans son \sum^{SA} et les informations qu'il glane dans son environnement informationnel (en interrogeant une base de données à distance, par exemple).

4.5. Approches d'implémentation du système d'augmentation

Deux approches sont possibles pour l'implémentation du système d'augmentation : soit \sum^{SA} est totalement embarqué dans \sum^C , soit \sum^{SA} est « distant ».

4.5.1. Système d'augmentation embarqué

Dans cette approche d'implémentation, les deux sous systèmes physique et informationnel de Σ^{SA} sont embarqués dans Σ^C . Ces implémentations sont notés respectivement : $(\Sigma_{inf}^{SA})_{emb}$ et $(\Sigma_{phy}^{SA})_{emb}$. Toutes les fonctions F^A sont embarquées. Dans cette approche, Σ^{SA} est autonome. $(\Sigma_{phy}^{SA})_{emb}$ prend en charge les interactions proprioceptives physiques.

Σ^{SA} et Σ^C sont reliés par un lien informationnel. La figure 36 montre ce type d'implémentation.

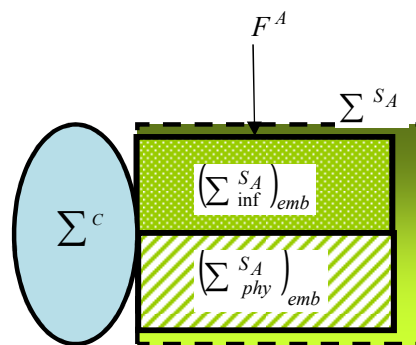


Figure 36- Implémentation embarqué du système d'augmentation

4.5.2. Système d'augmentation « distant »

Dans cette approche d'implémentation, seuls le sous système physique de Σ^{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 Σ^{SA} se trouve à distance. Le système informationnel de Σ^{SA} est implémenté avec $(\Sigma_{inf}^{SA})_{emb}$ (qui supporte un sous ensemble de F^A) et avec $(\Sigma_{inf}^{SA})_{dis}$ (qui supporte le reste des fonctions de F^A). Une synchronisation informationnelle (flèche en zigzag dans la figure 37) est donc nécessaire entre ces deux sous-systèmes $(\Sigma_{inf}^{SA})_{emb}$ et $(\Sigma_{inf}^{SA})_{dis}$. Une perte de synchronisation conduit à des problèmes lors la réalisation de certaines fonctions de F^A .

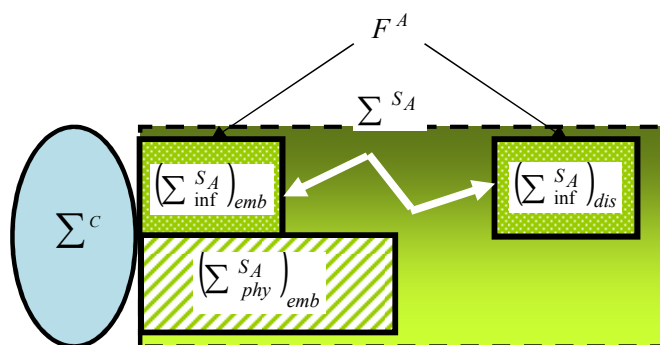


Figure 37- Implémentation du système d'augmentation à distance

Un exemple typique d'une telle implémentation est un dispositif RFID constitué d'une composante informationnelle (tag RFID) intégrée à Σ^c et d'autres composantes informationnelles intégrées à un système de traitement distant.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une typologie utilisée ensuite pour positionner les différentes notions de produit « actif/intelligent » cités dans l'état de l'art. Ensuite, nous avons proposé un modèle de produit « actif » basé sur le concept de système d'augmentation.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à valider notre modèle de champ de potentiel par simulation. Lors des différents scénarii de simulation, nous exploiterons pleinement les capacités décisionnelles du produit « actif » afin de résoudre conjointement les problèmes d'allocation dynamique de ressources et de routage.

Notre modèle de produit « actif » sera également implémenté réellement dans le chapitre V, en adoptant une solution embarquée $(\Sigma_{inf}^{S_A})_{emb}$.

CHAPITRE IV : VALIDATION PAR SIMULATION DE L'APPROCHE DE PILOTAGE

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation de l'approche par « champs de potentiel » proposée dans le chapitre II.

Comme présenté dans le chapitre précédent, les produits utilisés pour la validation sont des produits « actifs » de classe 4 (*Produit décisionnel "PDL"*). Nous considérons aussi que l'intelligence associée au produit est embarquée (conformément à l'implémentation réalisée dans le chapitre V). La figure 38 ci-après positionne ce type de produit « actif » selon notre typologie. Ce type de produit sera nommé « PDL_IE » (*Produit Décisionnel avec Intelligence Embarquée*) dans le reste de la thèse.

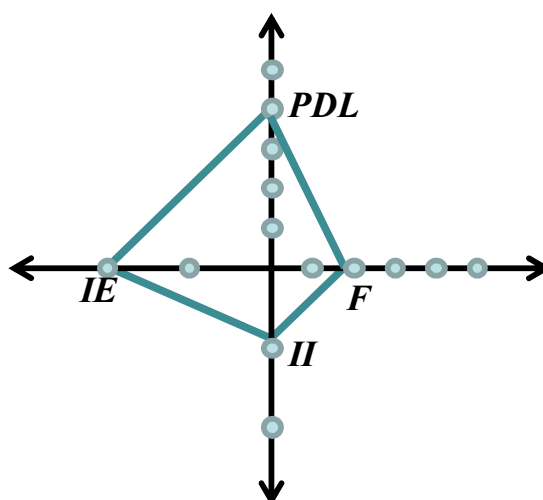


Figure 38- Positionnement du produit « PDL_IE »

La validation par simulation sera réalisée en utilisant l'environnement de développement multi-agents Netlogo, décrit dans une première partie.

Une deuxième partie présente une étude de cas antérieure, basée sur l'utilisation du mécanisme contract-net, et détaille notre modèle Netlogo. L'étude de cas constituera un benchmark permettant de comparer les deux approches de pilotage « champs de potentiel » et « contract-net ».

Plusieurs scénarii de simulation sont présentés dans la troisième partie et l'analyse des résultats met en évidence les avantages de l'approche par champs de potentiel.

2. Environnement de simulation

Le modèle de champs de potentiel proposé est naturellement distribué, ce qui signifie qu'il n'y a aucun traitement ou stockage d'informations centralisé. Cette propriété a influencé l'adoption d'un environnement de développement multi-agents, offrant les outils adéquats de modélisation des entités et de leurs interactions.

2.1. Netlogo

Notre choix d'outil de simulation s'est porté sur la plate-forme Netlogo (Wilensky, 1999). Cette plate-forme est en effet facile à appréhender, inclut un langage de programmation dédié bien documenté et dispose d'une interface graphique élégante. Elle s'avère un outil très efficace pour le prototypage rapide de systèmes multi-agents réactifs.

Cet environnement de développement multi-agents repose principalement sur trois entités de base :

- Les Tortues : ce sont des agents mobiles, munis de capacités décisionnelles, se déplaçant et interagissant avec leur environnement.
- Les Patches : ils constituent l'environnement cellulaire sur lequel se déplacent les tortues.
- L'Observateur : il offre une vue « extérieure » du monde constitué par les patches et les tortues. Il permet une analyse du comportement du collectif d'entités.

Dans cet environnement de simulation, tous les agents « tortues » fonctionnent en parallèle sur une grille de patches (c'est à dire, un monde cellulaire), et chaque agent « tortue » peut lire et modifier certains des attributs associés aux patches existants dans sa proximité. Les règles de comportement associées aux agents permettent de décrire les interactions agents-environnement, indispensables pour la validation de notre modèle de champs de potentiel.

2.2. Interface graphique du simulateur

L'interface graphique est divisée en trois parties :

- une première partie présente le modèle graphique associé au monde cellulaire des patches,
- une deuxième partie contient les différents outils (boutons, indicateurs...) permettant à l'utilisateur d'interagir avec le modèle,
- une troisième partie permet de visualiser le déroulement des différentes procédures.

La figure suivante (Figure 39) montre un exemple d'interface NetLogo.

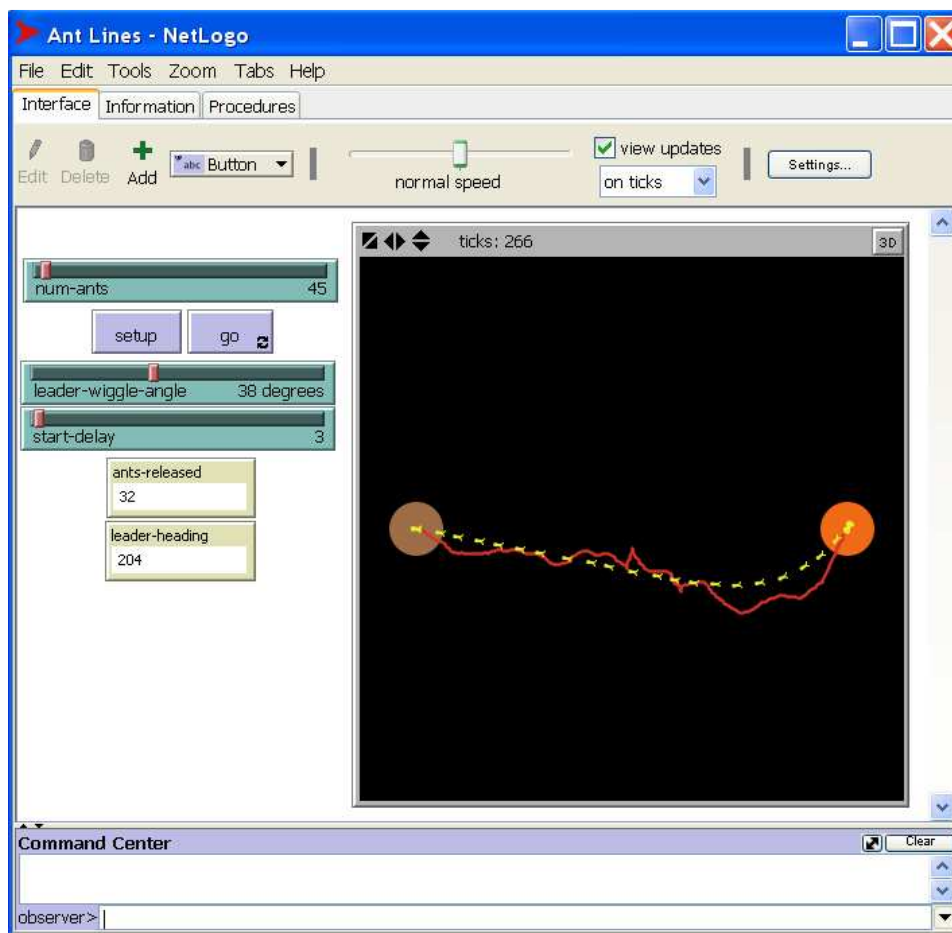


Figure 39- Interface Netlogo

3. Etude de cas

Pour illustrer les caractéristiques de notre modèle, nous comparons les résultats de notre approche à ceux obtenus lors d'une étude antérieure menée dans notre laboratoire (Trentesaux et al., 2000). Cette étude utilisait une approche d'allocation dynamique concurrente basée sur le mécanisme contract-net.

3.1. Benchmark (Trentesaux et al., 2000)

Cette étude de référence est basée sur un modèle de gestion des ressources (RME : Resource Management Entity) incorporant un système décisionnel et un système d'information. Elle utilise une simulation multi-agents dans laquelle les produits et les ressources négocient sur la base du mécanisme contract-net pour optimiser l'allocation dynamique des tâches. Le système de routage est simplifié : le temps de transport n'est pas pris en compte ou est considéré comme constant. Dans ce benchmark, les ressources sont les seules entités décisionnelles. Les

produits sont des entités ayant un ensemble de services à satisfaire mais ne disposent d'aucune capacité décisionnelle.

Ce benchmark a été choisi pour deux raisons :

- Premièrement, il exploite le mécanisme contract-net, couramment utilisé pour résoudre les problèmes d'allocation dans un contexte de pilotage hétérarchique, permettant ainsi une comparaison pertinente de nos résultats.
- Deuxièmement, il utilise comme cadre applicatif, la cellule flexible du pôle AIP-Priméca de Valenciennes qui est également utilisée pour nos expérimentations réelles.

3.2. Description détaillée du cas d'étude

3.2.1. Description de la cellule flexible de production

La cellule flexible de production faisant l'objet de notre étude est composée de 6 postes de travail (ressources) positionnés autour d'un système de transport flexible utilisant la technologie Montrac (Montech, 2010). Ce système monorail utilise des navettes auto-propulsées pour assurer le transport des produits sur les tronçons reliant les différents postes de travail.

La cellule flexible, illustrée figure 40, comporte les nœuds suivants:

- $n_1, n_6, n_9, n_{12}, n_{17}, n_{22}$ et n_{25} (en blanc) sont les nœuds services/ressources (où les services peuvent être obtenus). Chaque PDL_IE est introduit dans le système de production par le nœud intitulé "Poste de chargement".
- $n_3, n_5, n_8, n_{11}, n_{14}, n_{16}, n_{19}, n_{21}, n_{24}, n_{27}$ et n_{29} (en gris) sont les nœuds divergents, équipés de transferts permettant d'aiguiller les navettes vers la direction choisie. Ces nœuds sont les nœuds décisionnels, où les champs attractifs sont perçus par les produits.
- les autres transferts convergents, permettant de relier deux tronçons, ne sont pas pris en compte dans le processus décisionnel.

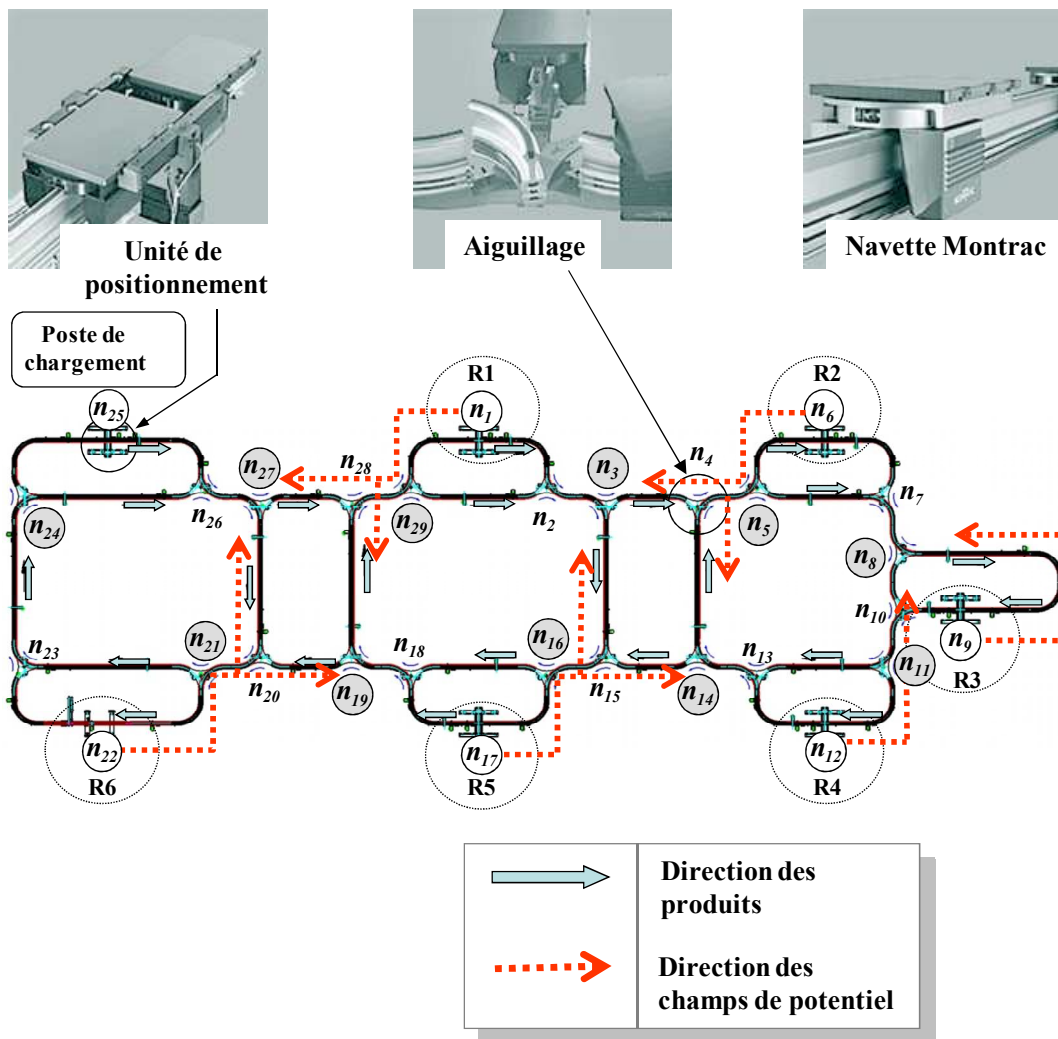


Figure 40- Topologie de la cellule flexible

3.2.2. Données expérimentales

Les données expérimentales présentées ci-après sont reprises du benchmark défini par Trentesaux et al. (2000).

- **Données d'entrée associées aux ressources et aux services**

- Ensemble de services possibles : $S = \{S_k, k = 1..NS\}$ avec $NS = 3$.
- Ensemble de ressources : $R = \{R_j, j = 1..NR\}$ avec $NR = 6$.
- Services offerts :
 - La ressource R_1 est capable d'exécuter le service S_1 ,
 - Les ressources R_2 et R_3 sont capables d'exécuter le service S_2 , et
 - Les ressources R_4 , R_5 et R_6 sont capables d'exécuter le service S_3 .

- Capacité maximale de la file d'attente de chaque ressource : $LFA(R_j) = 3, \forall j = 1,6$.
- Valeur initiale de la qualité de service $Q(R_j, S_k)_0 = \lambda$, où λ est une valeur positive qui permet aux champs de potentiel d'être émis le plus largement possible afin de couvrir la totalité de la cellule flexible. Ce paramètre λ doit être affiné après expérimentation réelle. Pour nos premiers essais en simulation, il a été réglé à une valeur élevée positive arbitraire ($\lambda = 40\ 000$). Pour toutes les ressources, la valeur de Q est donnée par la matrice suivante:

$$Q(R_j, S_k)_0 = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 \\ R_1 & \left(\lambda & 0 & 0 \right) \\ R_2 & \left(0 & \lambda & 0 \right) \\ R_3 & \left(0 & \lambda & 0 \right) \\ R_4 & \left(0 & 0 & \lambda \right) \\ R_5 & \left(0 & 0 & \lambda \right) \\ R_6 & \left(0 & 0 & \lambda \right) \end{matrix}$$

- **Données d'entrée associées aux produits**

- Ensemble des différents types des produits : $TYPE = \{T_l, l = 1..NT\}$, avec $NT = 30$.
- Nombre maximal de produits pour le benchmark de référence : $NP = 30$ ordres de fabrication. Dans ce benchmark, un seul produit est associé à chaque ordre de fabrication.
- Liste des services associée à chaque produit $P_i : LS(P_i) = \{S_i^k, k = 1..LL_i\}$, $LL_i = 3$ et $S_i^k \in S$.
- Temps opératoire $T_{OP}(T_l, S_k)$ associé à chaque type de produit et indépendant de la ressource. Le tableau Tab. 4 ci-après présente l'ensemble des temps opératoires utilisés dans le benchmark.

T ₁	List de services S ₁ -S ₂ -S ₃	T _{OP} (T ₁ ,S ₁)	T _{OP} (T ₁ ,S ₂)	T _{OP} (T ₁ ,S ₃)
1	1-2-3	5	28	10
2	2-3-1	20	11	12
3	3-1-2	18	11	14
4	1-2-3	9	19	23
5	3-1-2	18	10	14
6	2-3-1	15	26	15
7	2-1-3	29	10	10
8	1-3-2	10	15	18
9	2-1-3	14	22	29
10	3-2-1	27	17	9
11	1-2-3	25	11	30
12	2-1-3	14	7	35
13	1-3-2	18	38	23
14	1-2-3	6	20	38
15	2-3-1	18	43	5
16	3-2-1	35	21	8
17	1-3-2	7	35	16
18	2-3-1	12	30	10
19	3-2-1	37	22	13
20	2-3-1	18	32	6
21	1-2-3	7	15	37
22	2-1-3	18	15	32
23	1-2-3	9	12	32
24	3-2-1	27	13	8
25	1-3-2	9	13	28
26	1-2-3	8	17	21
27	3-2-1	25	10	9
28	2-1-3	19	13	21
29	1-2-3	14	31	21
30	3-1-2	26	11	13

Tab. 4 Données d'entrée (pour la simulation)

• **Données de sortie**

A la fin de chaque simulation, le makespan C (i.e. la date de fin de la fabrication du dernier PDL_IE dans le système de production) est déterminé.

• **Événements / Perturbations simulés**

- Le premier type d'évènement simulé correspond à une remise en service d'une ressource indisponible suite à une panne ou à une opération de maintenance. Aucune tâche ne peut être effectuée sur cette ressource depuis le début de la simulation jusqu'au moment de la remise en service.
- Le second type d'évènement (perturbation) simulé correspond à l'arrêt d'une ressource (suite à une panne ou pour une opération de maintenance).

3.3. Modèle Netlogo

La figure 41 présente le modèle NetLogo associé à la cellule et reprend la topologie décrite par la figure 40. Les trois types de nœuds (service, décisionnel et convergent) sont représentés sur ce modèle. Les nœuds service (patches en vert) sont les ressources responsables de

l'émission de champs de potentiel en direction des PDL_IE. Ces derniers sont modélisés par les tortues, représentées sur la figure par des flèches orange.

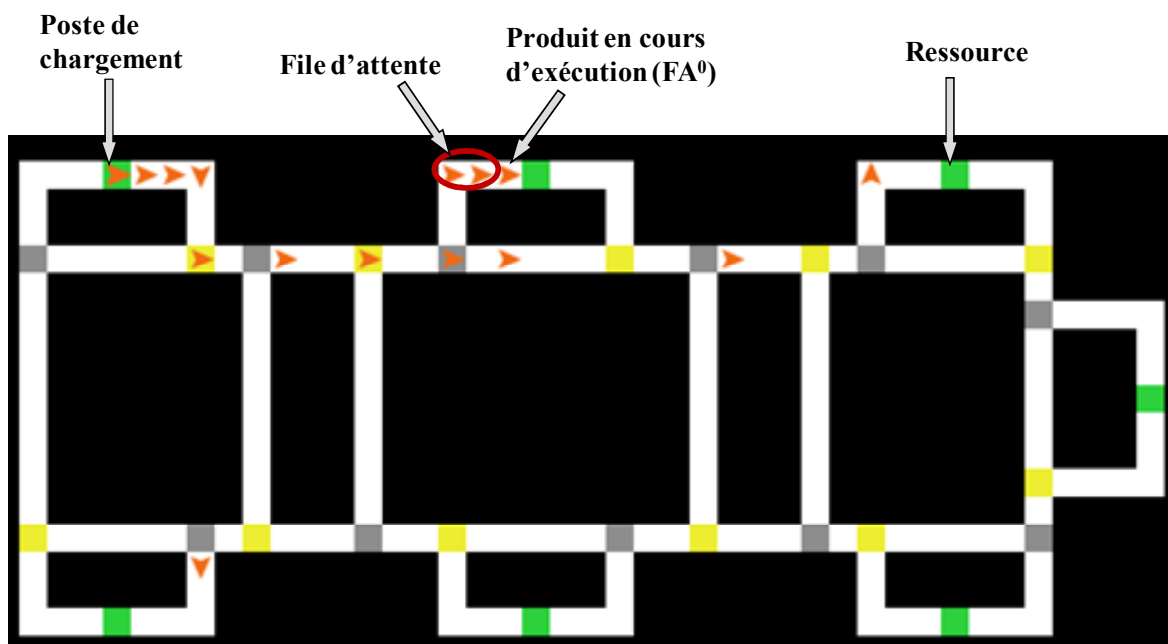


Figure 41- Le modèle NetLogo du FMS utilisé

Les variables et paramètres de simulation, ainsi que l'interface « utilisateur » du simulateur, sont détaillés ci-après.

3.3.1. Modélisation des nœuds

Les variables et les paramètres principaux associés à un nœud sont les suivants :

- le type de nœud (1 = nœud convergent, 2 = nœud décisionnel, 3 = nœud service),
- la qualité des services offerts (Q) sur un nœud service,
- la valeur des champs de potentiel pour les différents services captés sur le nœud,
- l'identificateur associé au PDL_IE en cours de traitement sur le nœud service,
- la longueur de la file d'attente d'un nœud service.

La figure 42 illustre le cas d'un nœud service.

patch -2 17	
pxcor	-2
pycor	17
pcolor	65
plabel	"
plabel-color	9.9
num_node	1
type_node	1
neighbours	0
nb_neighbours	0
dir	[1]
quality	40000
attractiveness	[40000, 0, 0]
num_product	1
num_resource	1
queue_length	0
remaining_time	0

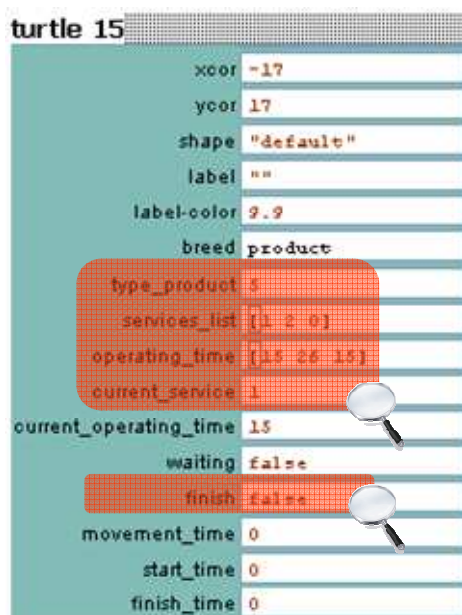
Figure 42- Variables et paramètres d'un nœud service

3.3.2. Modélisation du produit

Les variables et les paramètres principaux associés à un PDL_IE sont les suivants:

- le type de produit,
- la liste des services à obtenir,
- le temps opératoire associé à chaque service,
- le service courant à obtenir,
- l'état de complétude du produit («finish » = true ou false). Lorsque tous les services ont été obtenus dans la liste, «finish» prend la valeur true.

Un exemple de variables et paramètres, associés à un PDL_IE, est fourni par la figure 43.



turtle 15	
xcor	-17
ycor	17
shape	"default"
label	""
label-color	9.9
breed	product
type_product	5
services_list	[1 2 0]
operating_time	[15 26 15]
current_service	1
current_operating_time	15
waiting	false
finish	false
movement_time	0
start_time	0
finish_time	0

Figure 43- Variables et paramètres associés à un produit

3.3.3. Interface « utilisateur »

Notre interface de simulation est présentée à la figure 44. Une applet est disponible à l'url: <http://www.univ-valenciennes.fr/sp/potential-field>.

Le bouton "GO" est utilisé pour charger le réseau et exécuter la simulation alors que le switch "Stop!" permet d'arrêter la simulation.

Plusieurs switches sont disponibles pour paramétrer notre étude expérimentale:

- "Operating_time_factor " permet de régler l'importance relative accordée au temps du transport dans la simulation,
- "perturbe" permet de définir un système de production perturbé (R2 et R4 sont considérées en cours de maintenance dès le début de la simulation),
- "Breakdown_R2" et "Breakdown_R4" permettent de mettre respectivement en panne les ressources R2 et R4 durant la simulation.

"Number_products" permet d'afficher le nombre de PDL_IE en cours de traitement dans la cellule flexible et "Clock" permet l'affichage du temps de simulation (en unités de temps simulés).

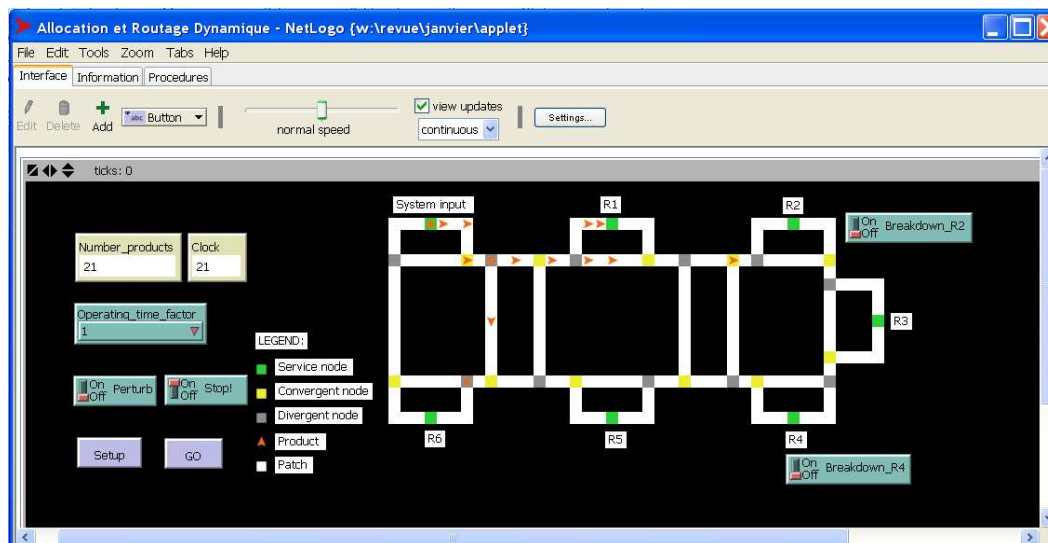


Figure 44- Interface de simulation

3.4. Limitation de la comparaison avec le Benchmark de référence

Avant d'examiner les résultats de la simulation, deux limites de comparaison avec le benchmark de référence doivent être soulignées :

3.4.1. Introduction des produits dans le système de production

Étant donné que dans le benchmark, tous les PDL_IE sont disponibles à la date 0, il n'est pas souhaitable dans notre simulation d'utiliser un système ERP. En effet, la planification optimale générée par ce dernier viendrait biaiser les résultats et ne permettrait pas une comparaison cohérente avec les résultats du benchmark.

3.4.2. Temps de transport

Dans l'étude de référence, les temps de transport sont considérés nuls ou constants. Toutefois, dans NetLogo, l'annulation des temps de transport est malaisée et n'est pas cohérente avec l'approche par champs de potentiel. En conséquence, afin d'être cohérent avec le cas de référence, l'influence des temps de transport a dû être réduite au maximum. La solution adoptée consiste à multiplier les temps opératoires dans NetLogo par un coefficient α donné, pour rendre négligeables les temps de transport. Bien évidemment, le makespan obtenu devra être divisé par ce coefficient α pour assurer la cohérence de la comparaison.

4. Résultats expérimentaux avec Netlogo

Deux scénarii du benchmark ont été retenus et trois autres ont été ajoutés. Pour les trois premiers scénarii, différents critères de performance ont été analysés : optimalité, robustesse, évolution et réalisme du comportement.

Comme expliqué dans la section 3.4., un coefficient $\alpha = 10$ a été utilisé pour minimiser les temps de transport dans les trois premiers scénarii. Par conséquent, toutes les valeurs de temps dans les figures 45, 46 et 47 doivent être divisées par ce coefficient.

4.1. Les scénarii étudiés

4.1.1. Scénario n°1 : Optimalité

En se basant sur le benchmark de référence, six simulations différentes ont été effectuées, en augmentant à chaque fois le nombre d'ordres de fabrication: simulation n°1 (5 ordres de fabrication), simulation n°2 (10 ordres de fabrication), simulation n°3 (15 ordres de fabrication), simulation n°4 (20 ordres de fabrication), simulation n°5 (25 ordres de fabrication), et simulation n°6 (30 ordres de fabrication).

La figure 45 montre le diagramme de Gantt obtenu pour la simulation n°6. Pour chacun des diagrammes de Gantt présentés, l'axe des abscisses représente le temps (en unités de temps de simulation (U.T.)) et l'axe des ordonnées représente les six ressources.

La valeur du makespan pour cette simulation est égale à 3380 U.T. mais doit être divisée par le coefficient α pour pouvoir être comparée aux résultats du benchmark. Cette figure indique clairement que la ressource R_1 est surchargée, car elle est la seule à offrir le service S_1 . L'utilisation des ressources R_2 et R_3 est équilibrée pour le service S_2 . Il en est de même pour les ressources R_4 , R_5 et R_6 en ce qui concerne le service S_3 .

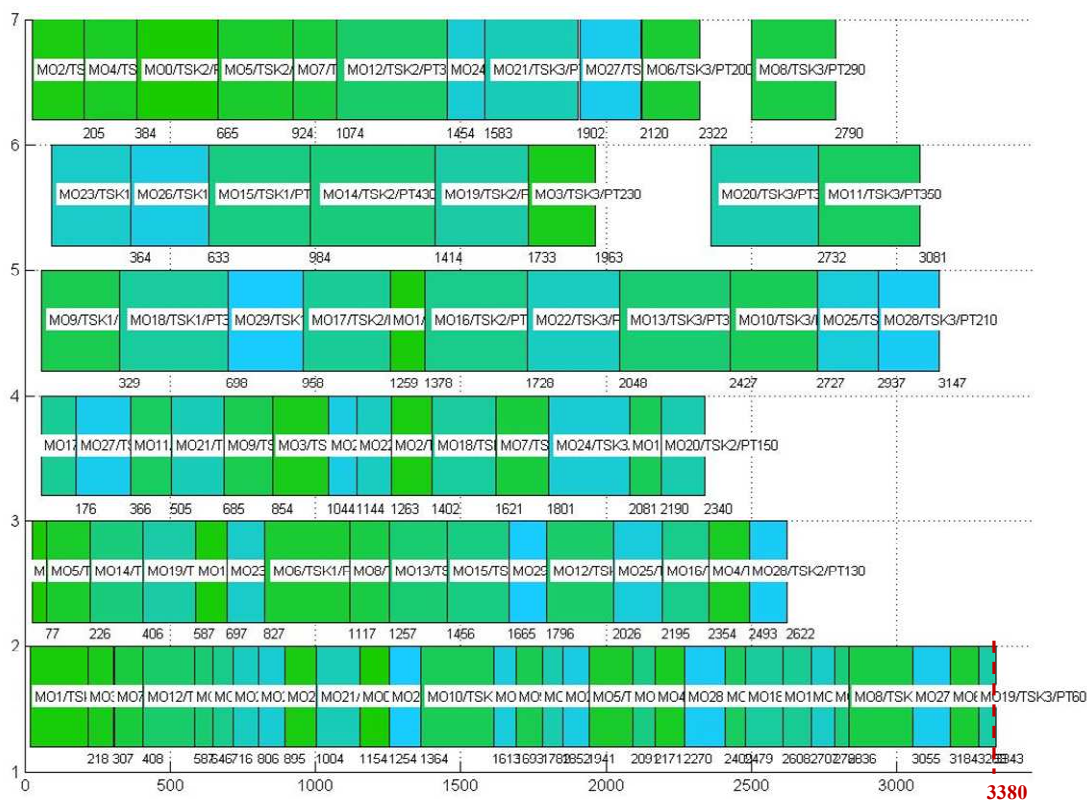


Figure 45- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°1 (simulation n°6)

Le tableau Tab. 5. récapitule les valeurs du makespan pour les différentes simulations.

Nombre d'ordres de fabrication	Makespan		Pourcentage d'amélioration
	Protocole contract-net [Trentesaux et al., 2000]	Approche champ de potentiel	
5	82	80	2%
10	150	129	14%
15	235	210	11%
20	280	255	9%
25	250	325	-
30	380	338	11%

Tab. 5 Valeur de makespan pour les 6 simulations

La plupart des valeurs du makespan obtenues via notre approche par champs de potentiel sont meilleures que celles obtenues par l'approche contract-net, à l'exception de la simulation n°5. Dans (Trentesaux et al., 2000), la diminution importante du makespan pour la simulation n°5 s'explique par une situation particulière. Par un heureux hasard de pré-affectation des ordres de fabrication, tous les PDL_IE ont été traités sans aucun retard. En fait, même si tous les ordres de fabrication sont disponibles à la date 0, ils entrent dans le système de production

l'un après l'autre. L'ordre d'introduction des ordres de fabrication semble avoir été particulièrement efficace, même en absence de toute stratégie.

4.1.2. Scénario n°2 : Robustesse face à une indisponibilité des ressources dès le début de la production

La robustesse peut être évaluée en autorisant ou en interdisant le fonctionnement de certaines ressources. Comme dans le scénario précédent, le coefficient $\alpha = 10$ est appliqué.

La figure 46 illustre une situation pour laquelle les ressources R_2 et R_4 sont indisponibles au début de la simulation (par exemple, elles sont arrêtées pour une opération de maintenance). Elles deviennent de nouveau disponibles respectivement aux instants 100 U.T. et 200 U.T. L'indisponibilité de ces deux ressources implique logiquement une augmentation de la valeur du makespan (3930 U.T.). Cette dernière est ensuite logiquement divisée par le même coefficient α pour aboutir à une valeur de 393 U.T., que l'on peut comparer à la valeur 407 U.T. obtenue dans le benchmark utilisant l'approche contract-net.

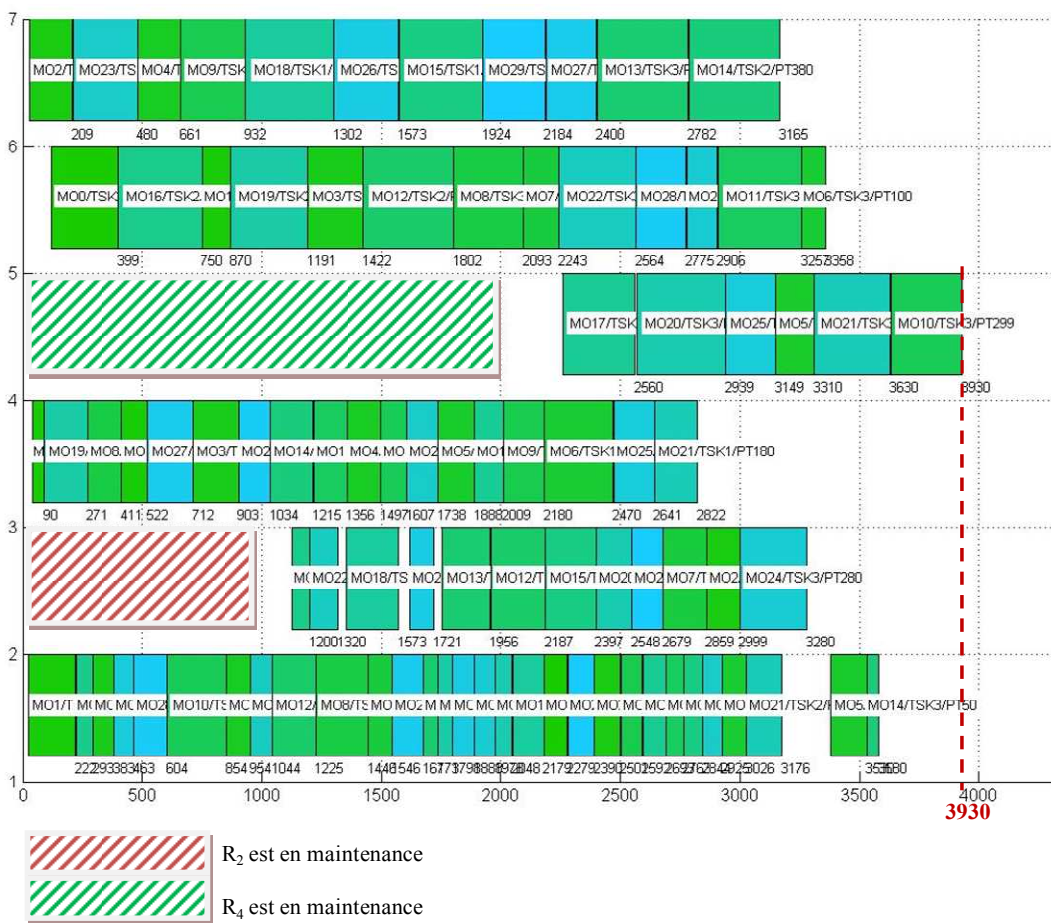


Figure 46- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°2

4.1.3. Scénario n°3 : Comportement évolutif et réaliste

Ce scénario n'a pas été réalisé dans le benchmark. Pour rendre la simulation plus complète, et pour tester l'efficacité de l'outil de simulation, un nombre de produits plus important est traité (90 produits). Ce niveau de complexité n'a pas été pris en charge dans le benchmark pour éviter une surcharge des communications requises pour la mise en œuvre du protocole contract-net. Les résultats de simulation de la figure 47 montrent que l'accroissement du nombre de produits est facilement supporté par l'approche par champs de potentiel.

Dans ce scénario, les temps opératoires ont également été multipliés par $\alpha = 10$.

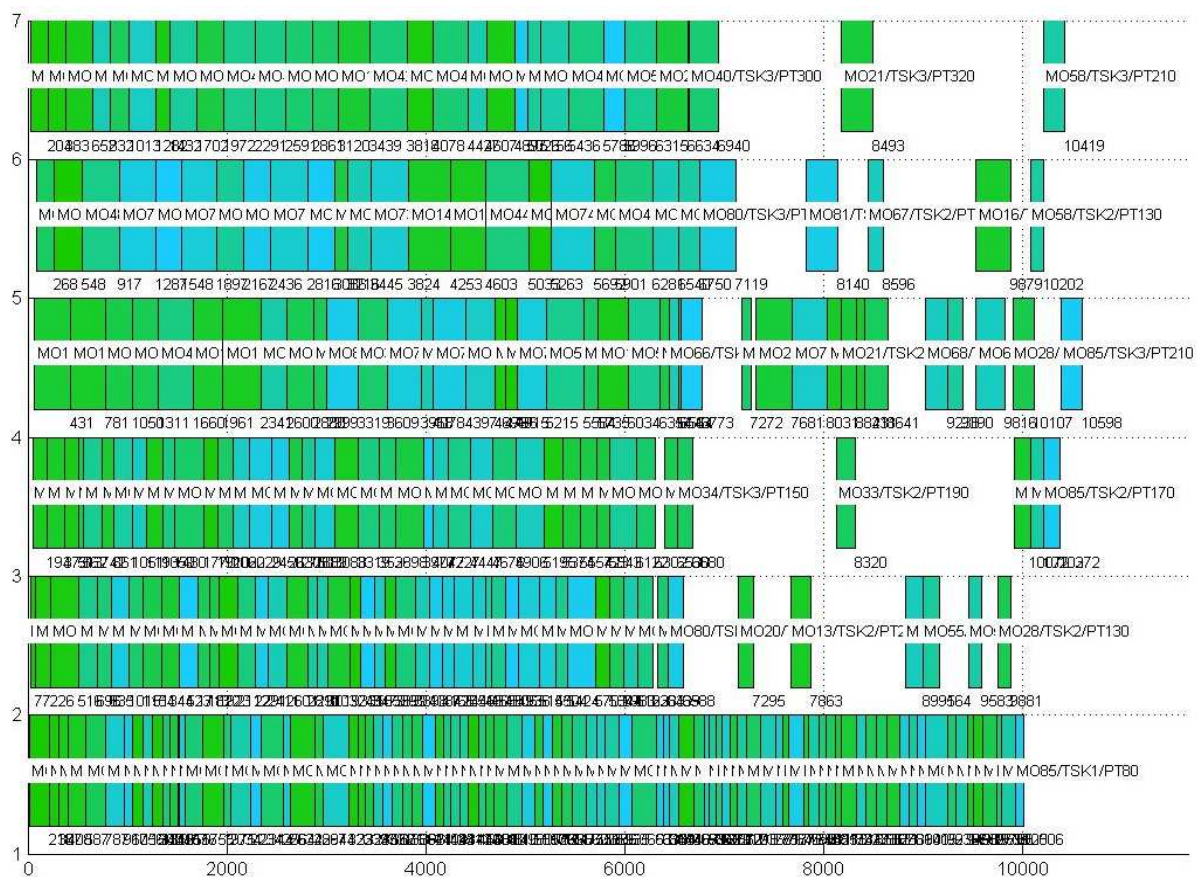


Figure 47- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°3

4.1.4. Scénario n°4 : Impact du temps de transport

Le scénario n°4 n'a pas été réalisé dans le cadre du benchmark. Contrairement à l'étude de référence pour laquelle les temps de transport ont été maintenus à des valeurs constantes pour chaque déplacement entre deux ressources, notre outil de simulation prend en compte les temps de transport de manière plus réaliste afin de déterminer le makespan. La figure 48

présente le makespan obtenu pour la production de 30 ordres de fabrication, avec un coefficient $\alpha = 1$. La valeur obtenue (370 U.T.) est à comparer avec la valeur obtenue dans le cadre du scénario n°1 (338 U.T.). La faible différence (moins de 10%) est due au fait que de nombreux PDL_IE ont été transportés en temps masqué pendant que les ressources effectuaient les traitements.



Figure 48- Diagramme de Gantt obtenu pour le scénario n°4 (avec les temps de transport)

Pour analyser l'impact du temps de transport sur le makespan, quatre simulations ont été effectuées avec différentes valeurs de α (pour 30 ordres de fabrication).

La figure 49 montre l'évolution du makespan en fonction du coefficient α . La diminution de ce dernier donne plus d'importance aux temps de transport. Comme expliqué précédemment, le faible accroissement de la valeur du makespan est dû à l'exécution en parallèle des tâches de transport et des tâches de traitement sur les ressources.

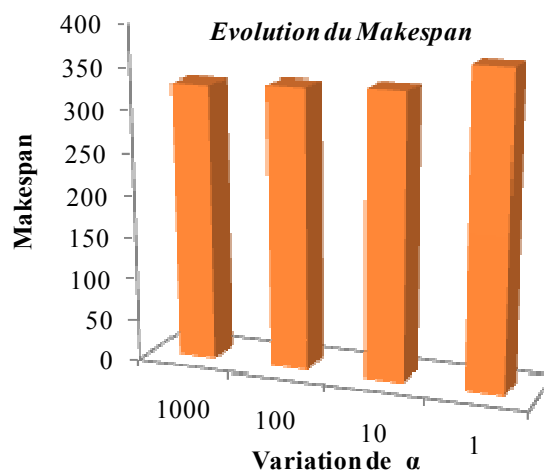


Figure 49- Evolution du makespan selon les valeurs du coefficient α

4.1.5. Scénario n°5 : Robustesse face à une indisponibilité des ressources en cours de production

Le scénario n°2 a permis de tester notre approche dans le cas où les ressources R_2 et R_4 sont indisponibles en début de simulation suite à une panne ou à une opération de maintenance. La figure 50 décrit le diagramme de Gantt obtenu suite à un scénario plus complexe dans lequel R_2 et R_4 sont disponibles au début de la simulation, et deviennent respectivement indisponibles aux instants 162 (U.T.) et 216 (U.T.). Ces deux ressources redeviennent disponibles respectivement aux instants 224 (U.T.) et 252 (U.T.). Dans cette simulation, les temps de transport ont également été pris en compte.

De façon toute à fait normale, l'indisponibilité des ressources R_2 et R_4 implique une augmentation de la valeur du makespan (382 U.T.).

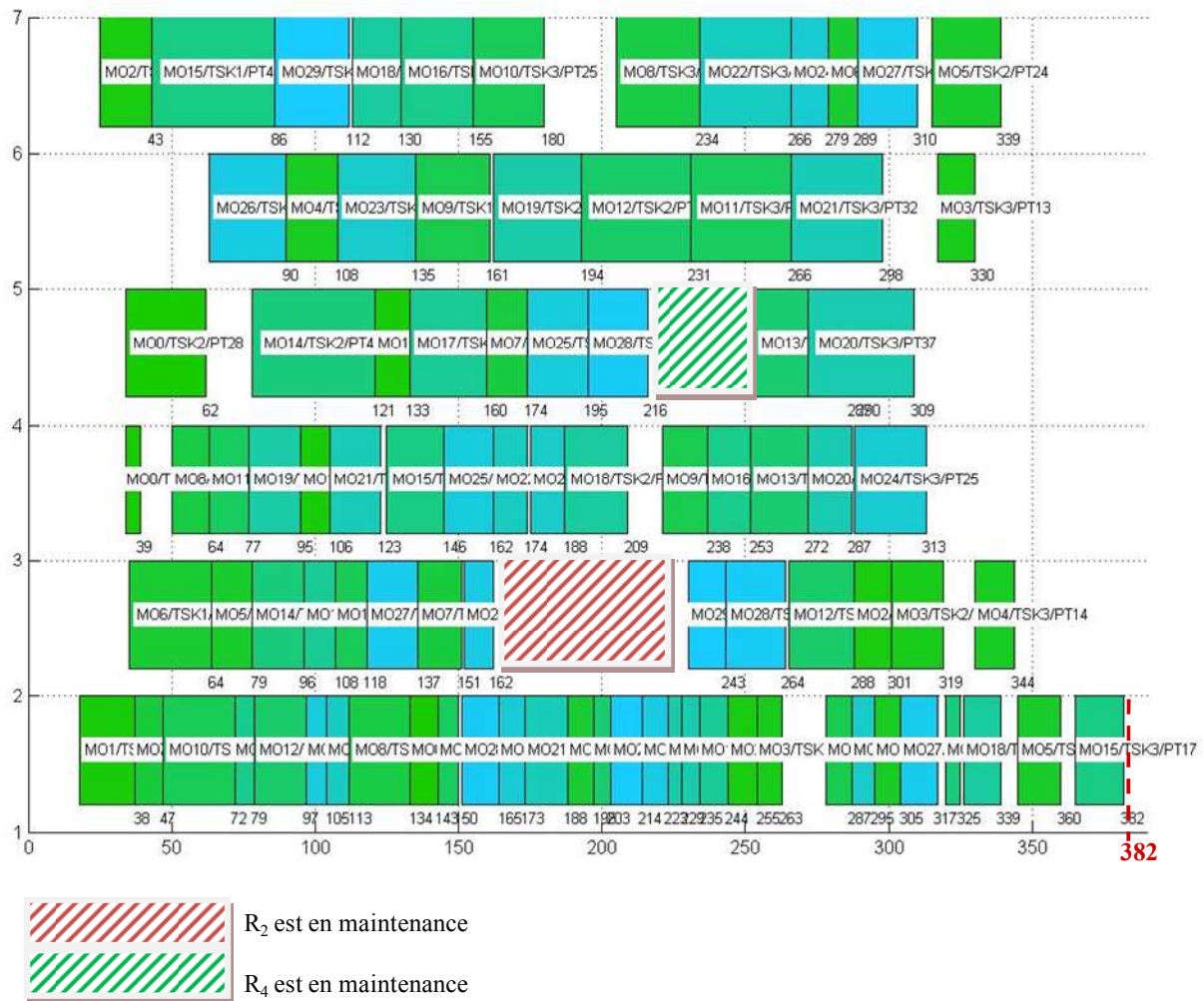


Figure 50- Diagramme de Gantt obtenu pour le scenario n°5

4.2. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus prouvent que l'approche de pilotage par champs de potentiel présente bien les caractéristiques de réactivité et de robustesse attendues.

Dans notre approche, les produits utilisés sont capables de percevoir le niveau de perturbation de l'environnement et de s'adapter vis à vis de la demande de production courante. Les décisions prises sont locales ce qui augmente la scalabilité de l'approche et la robustesse des PDL_IE aux perturbations, comme nous pouvons le constater sur les diagrammes de Gantt. La prise en compte des perturbations au niveau des ressources (ou la réintégration de ces dernières) se fait de manière « naturelle » de part le mécanisme de champ de potentiel qui ne nécessite pas de dialogue direct entre entités.

Cependant, ces résultats proviennent d'une expérimentation sur une étude de cas unique. Pour pouvoir les généraliser, il convient d'envisager :

- de poursuivre les expériences sur ce modèle avec d'autres paramètres (d'autres types d'ordres de fabrication, des temps opératoires dépendant de la ressource),
- d'utiliser d'autres critères de performance que le simple makespan, tels que le temps d'attente moyen d'un PDL_IE dans une file d'attente ou sur la boucle de référence,
- d'appliquer l'approche sur d'autres cas d'étude.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, notre approche par champs de potentiels a été validée en simulation à l'aide de l'environnement de développement multi-agents Netlogo.

La cellule flexible du pôle AIP-Priméca à Valenciennes a servi de cas d'étude, et une précédente étude a été utilisée comme benchmark. Les résultats obtenus par notre approche ont pu être comparés à ceux obtenus en utilisant une approche de pilotage hétérarchique à base de contract-net.

Cette comparaison a permis de souligner les avantages de notre approche en termes de réactivité et de robustesse (Zbib et al., 2009), (Zbib et al., 2010).

Afin de conforter les résultats obtenus par simulation, une validation par une mise en œuvre réelle sur la cellule flexible du pôle AIP-PRIMECA à Valenciennes est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V : IMPLEMENTATION DE L'APPROCHE DE PILOTAGE

1. Introduction

Ce chapitre présente l'implémentation réelle de l'approche de pilotage par champs de potentiel décrite dans le chapitre II et validée par simulation dans le chapitre précédent. Cette approche, assurant la réactivité et la robustesse d'un système flexible de production, nécessite l'emploi de produits autonomes dotés de capacités décisionnelles appelés « PDL_IE » (*Produit Décisionnel avec Intelligence Embarquée*).

Ce chapitre confirme les atouts de l'approche par champs de potentiel au travers d'une application réelle et en comparant les résultats obtenus avec ceux obtenus par une approche hétérarchique concurrente exploitant le mécanisme contract-net.

La première partie présente la cellule d'assemblage flexible du pôle AIP PRIMECA à Valenciennes constituant notre contexte expérimental et fait le point sur les différentes instrumentations.

La deuxième partie détaille l'implémentation des deux approches de pilotage concurrentes. Les résultats des différentes expérimentations sont enfin décrits et analysés dans une troisième partie.

2. Présentation de la cellule flexible

Comme décrit dans le chapitre précédent, la cellule flexible du pôle AIP-Priméca de Valenciennes s'articule autour d'un réseau flexible de convoyage où les PDL_IE sont acheminés par des shuttles autopropulsés (Montech, 2010). Des transferts permettent d'aiguiller les PDL_IE vers les différents postes de travail (Figure 51).

Les PDL_IE, circulant dans cette cellule, sont obtenus par l'ajout d'un système d'augmentation au produit passif. L'instrumentation utilisée pour implémenter ce type de produit « actif » est détaillée dans la sous-section suivante.

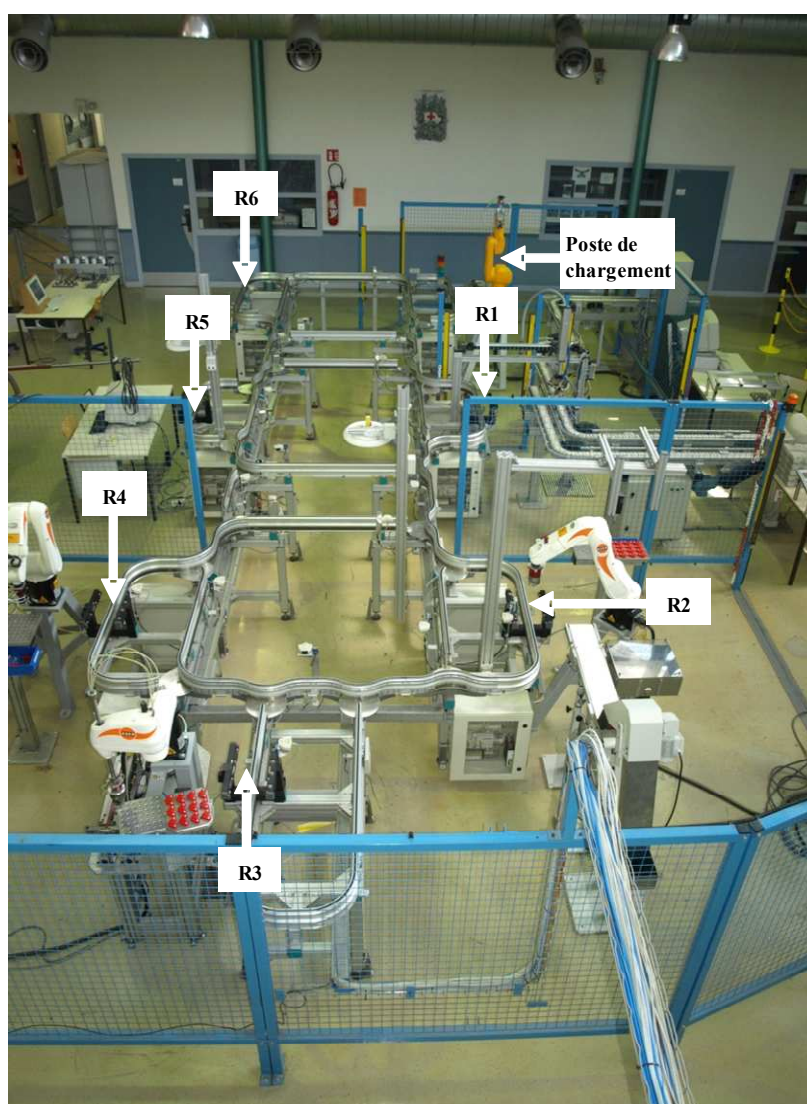


Figure 51- La cellule d'assemblage flexible

2.1. Instrumentation du produit actif de type PDL_IE

Dans notre implémentation, le produit passif a été transformé en PDL_IE par l'ajout d'un système d'augmentation embarqué lui apportant capacités de traitement et capacités décisionnelles. Ce système d'augmentation est basé sur un EeePC (équipé d'un système de communication infrarouge IrDA et d'un système d'exploitation Windows XP facilitant la mise en œuvre des fonctionnalités inhérentes à la classe 4). Ce choix d'équipement offre la puissance de traitement adéquate et des interfaces graphiques conviviales permettant de suivre le processus d'assemblage d'un produit (voir Figure 52).

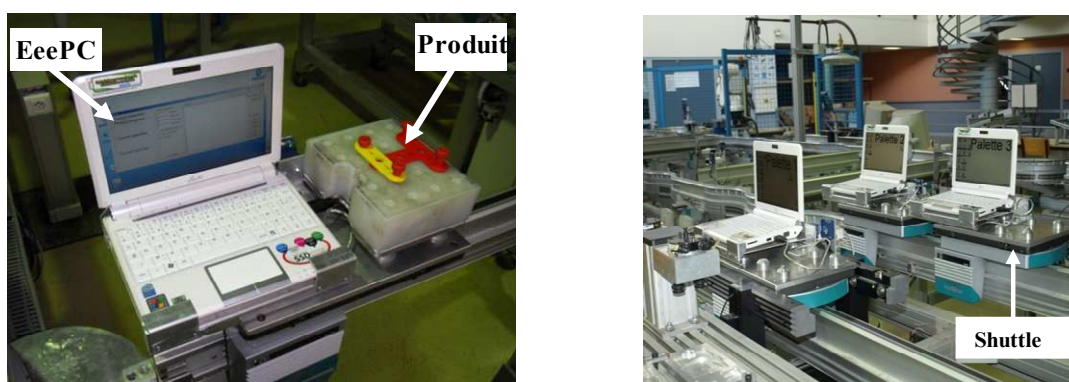


Figure 52- Instrumentation associée à un produit « actif »

2.2. Instrumentation des nœuds

La cellule est composée de trois types de nœuds :

- les nœuds services où différents services peuvent être obtenus. Ils constituent les nœuds destinations possibles.
- les nœuds de transferts divergents, utilisés pour aiguiller les shuttles sur les rails choisis. La décision de routage est prise en exploitant les informations disponibles à ces emplacements.
- Les nœuds de transferts convergents ne sont pas pris en compte. Ils sont uniquement utilisés pour relier des rails convergents, et aucune prise de décision n'est requise.

L'instrumentation des nœuds décisionnels (nœuds divergents) et des nœuds services (ressources) s'effectue à l'aide de contrôleurs Wago 750-841 (Wago, 2010). Ces contrôleurs sont appropriés pour l'implémentation d'architectures de pilotage hétérarchiques en raison de leur capacité de traitement et de leur petite taille. En outre, ils disposent d'une interface Ethernet intégrée de sorte que les interactions nœud-nœud

puissent être effectuées via cette technologie de communication. Cependant, le produit ne pouvant utiliser directement la technologie Ethernet, il doit se connecter au réseau via une communication infrarouge IrDA (ESB-301 système Clarinet (Clarinet System, 2010)).

La technologie infrarouge a été choisie en raison de:

- sa faible consommation d'énergie pour un taux de transfert élevé (plus de 100KB/sec);
- sa faible portée, ce qui permet la localisation géographique des nœuds pour le PDL_IE;
- son mode de communication physique basée sur la lumière, qui est naturellement robuste au bruit électromagnétique souvent présent dans une ambiance industrielle.

La figure 53 montre la disposition des différents contrôleurs Wago et des points de connexion IrDA sur la cellule.

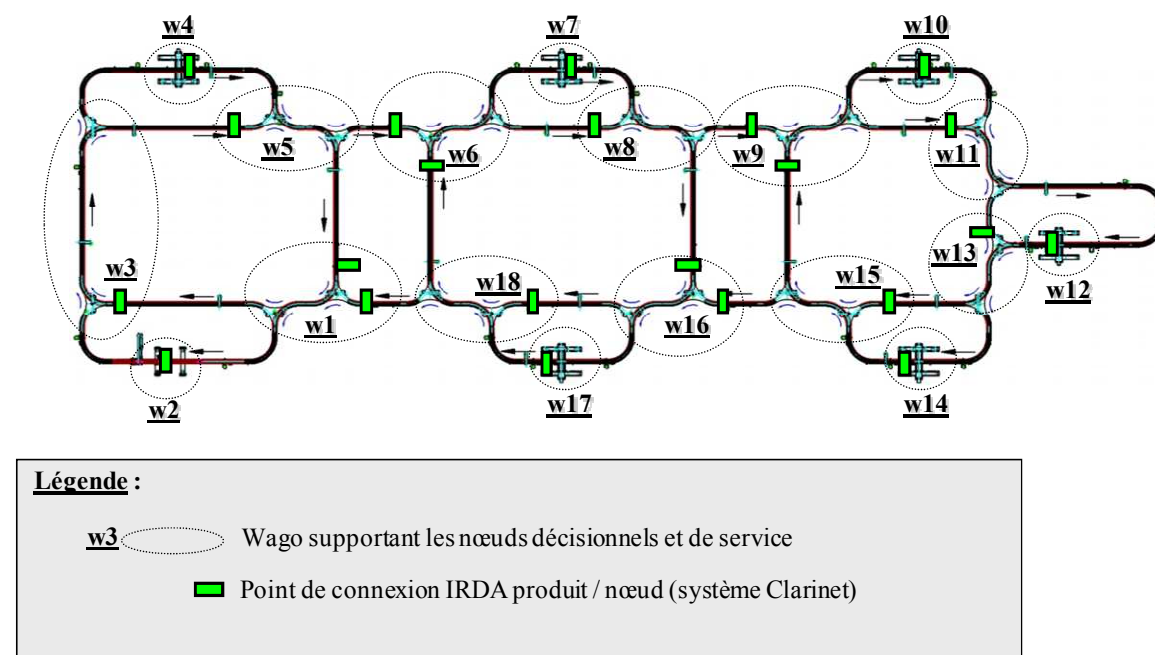


Figure 53- Distribution des différents Wagos

L'implémentation des deux approches de pilotage (par champs de potentiel et par mécanisme contract-net) est détaillée dans la partie suivante.

3. Implémentation des approches sur la cellule

Les deux approches de pilotage concurrentes du chapitre précédent sont implémentées afin de pouvoir valider les résultats obtenus par simulation.

3.1. Approche par « champs de potentiel »

Comme on a pu le voir dans les chapitres précédents, notre approche repose essentiellement sur des interactions entre les produits et leur environnement. Dans ce contexte, la figure 54 détaille la séquence des interactions entre les PDL_IE et les contrôleurs de nœuds décisionnels.

Lorsqu'un PDL_IE arrive sur un nœud décisionnel, une série d'étapes s'enchainent :

1. L'EeePC associé au PDL_IE envoie au nœud la nouvelle distance (en unités de temps) mesurée depuis le précédent nœud traversé.
2. Le contrôleur de nœud met à jour sa matrice de distance avec les nouvelles données reçues, puis il met à jour les champs de potentiel et les propage vers les nœuds qui le précèdent.
3. L'EeePC lit la matrice de champs de potentiel sauvegardée dans le contrôleur. Il filtre la matrice pour extraire uniquement les champs relatifs au service courant de sa liste de services.
4. L'EeePC choisit le chemin menant à la ressource émettant le plus fort champ de potentiel et informe le contrôleur de son choix.
5. Le contrôleur du nœud décisionnel commande le transfert qui permet d'aiguiller le shuttle dans la direction choisie.

Comme explicité dans le chapitre II, si aucune ressource ne peut fournir le service demandé par l'EeePC, le PDL_IE se dirige vers la « boucle de référence » afin d'éviter toute situation de blocage. Il reste sur cette boucle jusqu'à ce que l'EeePC détecte de nouveau un champ de potentiel correspondant au service demandé, ce qui signifie qu'au moins une ressource est disponible pour satisfaire ce service.

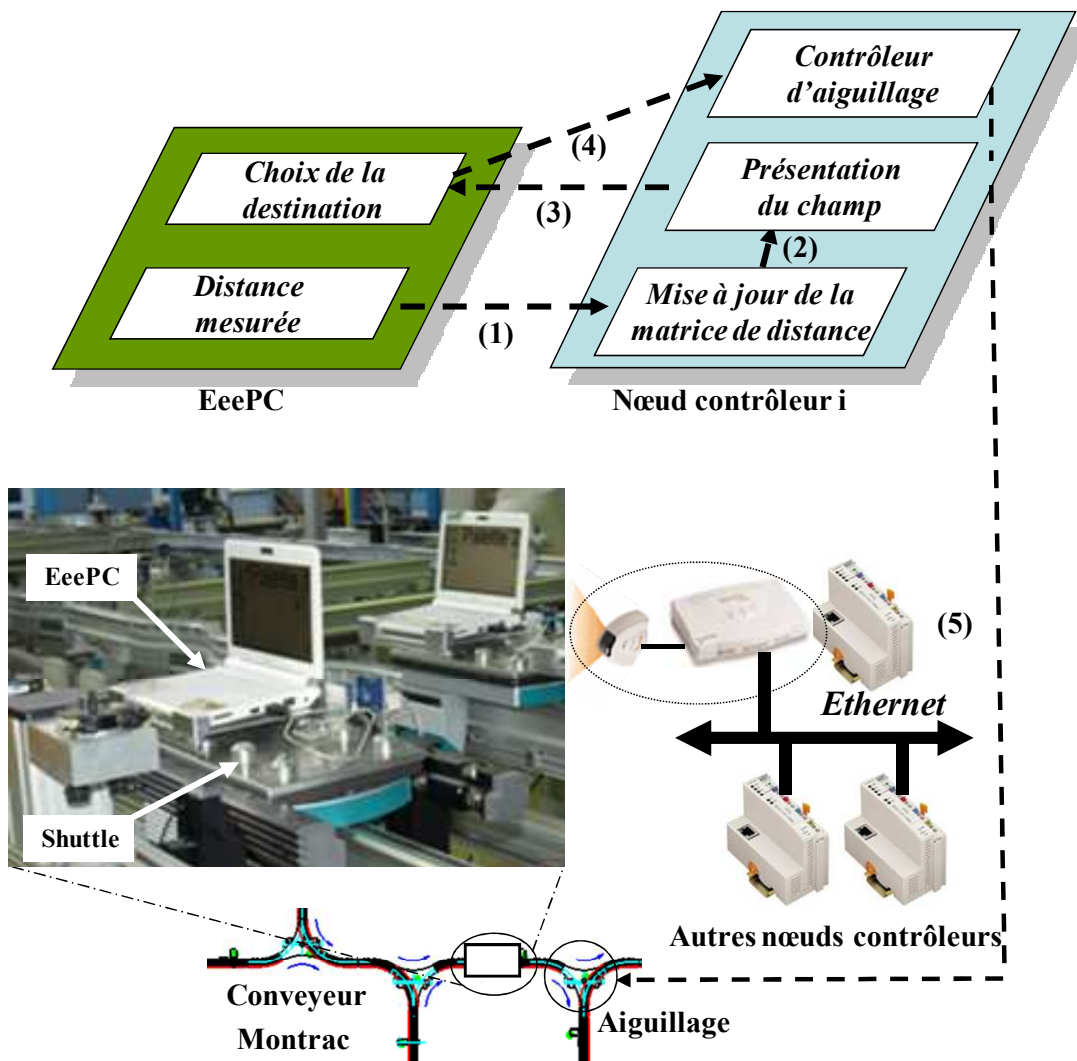


Figure 54- Communication produit/nœud

L'architecture de notre système de commande est détaillée sur la Figure 55 (seuls les Wago's w3 et w4 sont présentés). Dans cette figure, trois acteurs différents peuvent être identifiés :

- le PDL_IE relié au réseau via la connexion Ethernet/IrDA;
- le contrôleur de ressource Wago w4, qui génère les champs de potentiel, gère la ressource et le système de bridage du produit et
- le contrôleur de nœud décisionnel Wago w3, qui propage les champs de potentiel et commande le transfert.

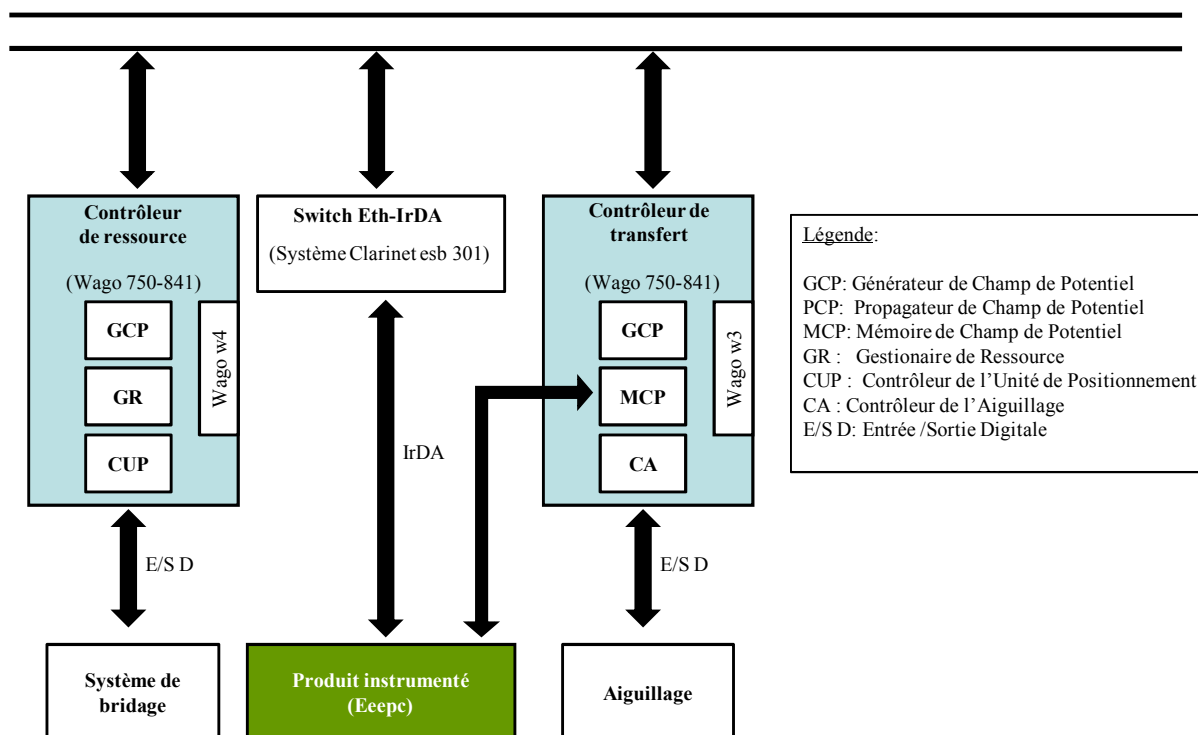


Figure 55- Détails de l'architecture de commande pour les WAGOs w3 et w4

3.2. Approche concurrente utilisant le protocole Contract-net

Comme pour l'approche précédente, chaque PDL_IE a une liste de services à obtenir (Figure 56a). Deux processus se succèdent, le premier relatif à l'allocation des tâches aux ressources et le second au routage. Trois étapes peuvent alors être distinguées :

- Une fois la liste de services chargée dans le PDL_IE, ce dernier doit trouver la ressource capable de répondre au mieux au service courant. Le processus d'allocation des tâches aux ressources est entièrement hétérarchique et utilise le mécanisme contract-net. Le PDL_IE envoie une demande à l'ensemble des ressources capables de fournir le service dont il a besoin. Les ressources répondent en envoyant leurs propositions. La ressource destination est choisie en fonction de contraintes telles que le temps de transport du nœud courant au nœud destination (où se situe la ressource), le nombre de PDL_IE dans la file d'attente de la ressource et le nombre de services consécutifs que la ressource peut fournir au PDL_IE.
- Le processus de routage démarre lorsque le PDL_IE désire se déplacer vers la ressource choisie. Le PDL_IE choisit alors le chemin le plus court de son nœud courant vers le nœud destination. Ce processus, également hétérarchique, est détaillé ci-après.

- Quand le PDL_IE arrive à la ressource destination, il attend pour obtenir le service demandé.

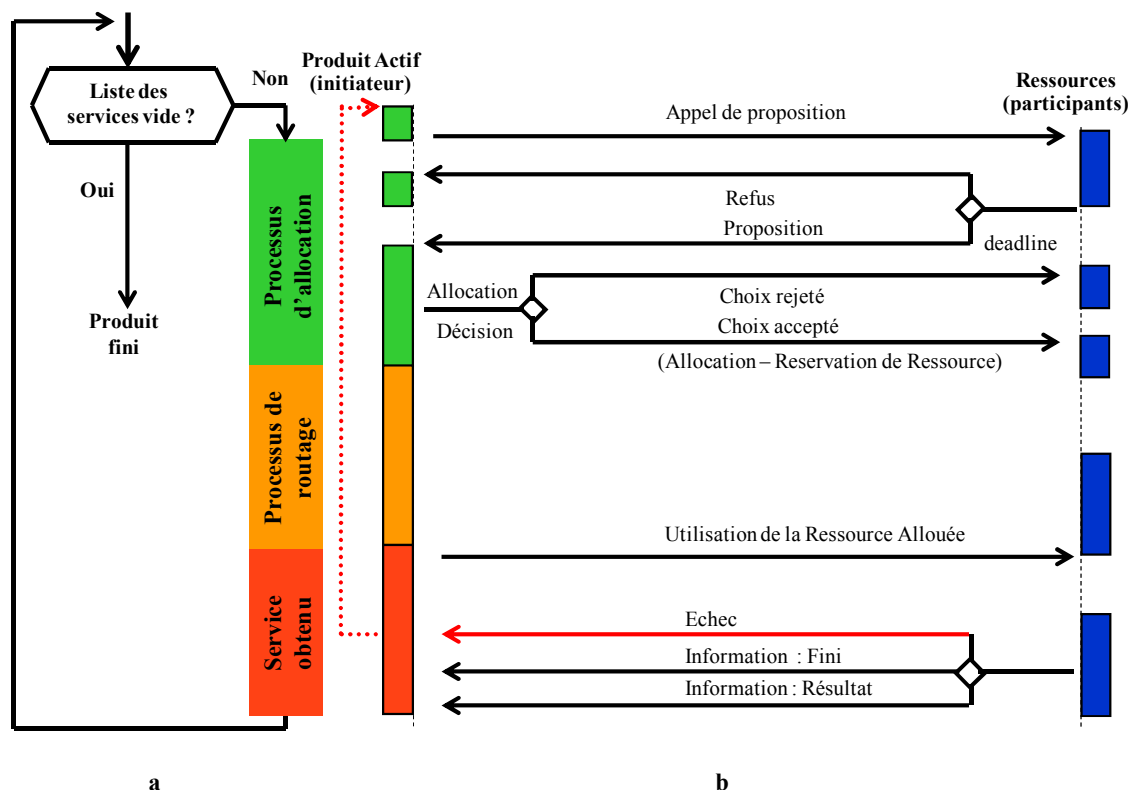


Figure 56- Processus d'allocation et de routage

Comme l'illustre la figure 56a, le PDL_IE répète ces trois étapes jusqu'à ce que la liste des services soit vide. Le schéma de la figure 56b décrit les interactions associées. Si la ressource destination devient indisponible suite à une panne (flèches en pointillés), le PDL_IE redémarre le processus d'allocation.

Détails sur le processus de routage : En ce qui concerne le processus de routage, chaque PDL_IE embarque une carte de routage (graphe représentatif de la topologie du réseau de transport et comportant le temps de déplacement pour chaque arc). Le PDL_IE utilise l'algorithme de Dijkstra (Dijkstra, 1959) pour élaborer le meilleur chemin (c'est-à-dire le chemin avec la durée de parcours la plus courte) en exploitant les valeurs des arcs de la carte de routage. Chaque contrôleur de nœud divergent gère une table de routage contenant les valeurs actualisées des temps de transport sur les différents arcs. Ces tables sont le reflet de la fluidité du trafic sur le réseau de transport.

La figure 57 illustre les interactions entre un PDL_IE et le contrôleur de chaque nœud divergent où une décision de routage doit être prise.

Quand le PDL_IE arrive à un nœud décisionnel de routage, il communique avec le contrôleur du nœud au moyen du système Clarinet. Plusieurs étapes se succèdent alors :

1. Le PDL_IE transmet le temps qu'il a mis pour transiter du nœud précédent au nœud actuel.
2. Le contrôleur de nœud transmet ce temps aux autres contrôleurs de nœuds.
3. Chaque contrôleur de nœuds met à jour l'évaluation des arcs de sa table de routage en intégrant le temps mesuré ainsi émis.
4. Les valeurs des différents arcs sont transmises au PDL_IE qui met à jour sa carte de routage embarquée.
5. Le PDL_IE choisit le meilleur voisin en appliquant l'algorithme de routage (Dijkstra).
6. Le PDL_IE demande alors au contrôleur de nœud un service de routage (aiguillage) vers le voisin choisi.
7. Le contrôleur de nœud positionne le transfert selon le choix réalisé à l'étape 5.

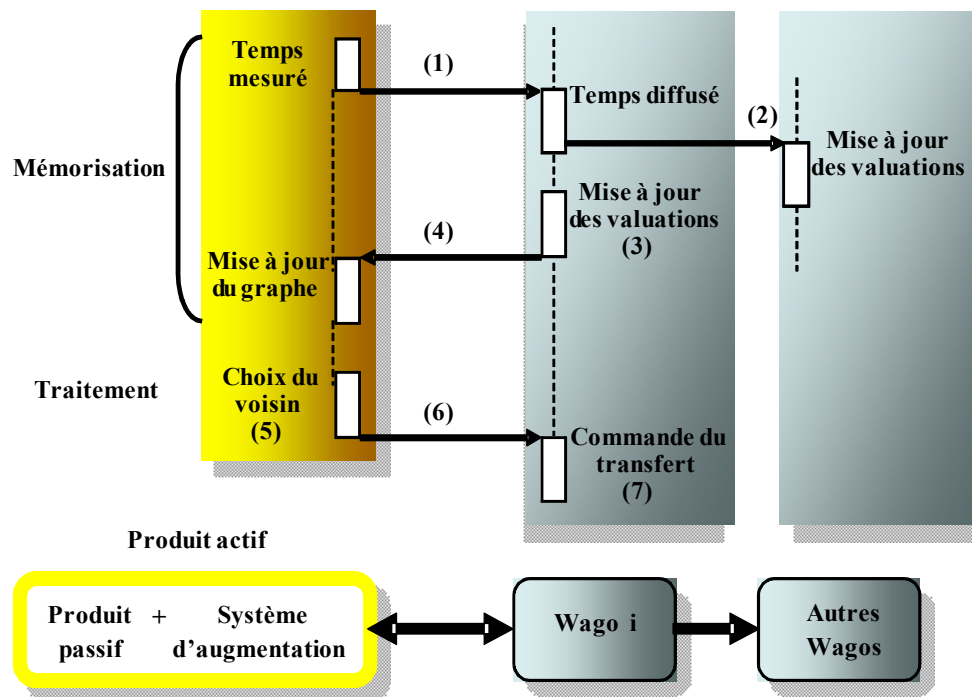


Figure 57- Interactions entre produit actif et contrôleur de nœud

4. Expérimentations

En se basant sur le protocole expérimental décrit au chapitre IV, trois PDL_IE sont introduits dans le système de production.

4.1. Protocole expérimental

4.1.1. Données descriptives des ressources et des services

- nombre de services possibles : $NS = 3$.
- nombre de ressources : $NR = 6$.
- les services offerts sont les suivants :
 - La ressource R_1 est capable d'exécuter le service S_1 ,
 - Les ressources R_2 et R_3 sont capables d'exécuter le service S_2 , et
 - Les ressources R_4 , R_5 et R_6 sont capables d'exécuter le service S_3 .
- capacité maximale de la file d'attente de chaque ressource : $LFA(R_j) = 3, \forall j = 1,6$.
- la valeur initiale de la qualité de service $Q(R_j, S_k)_0 = 200$, pour toutes les ressources.

La valeur de Q est donnée par la matrice suivante:

$$Q(R_j, S_k)_0 = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 \\ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 200 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

4.1.2. Données descriptives des PDL_IE

- nombre de types différents de PDL_IE : $NT = 3$.
- nombre maximal de PDL_IE : $NP = 3$ ordres de fabrication.
- liste de services pour chaque PDL_IE $P_i : LS(P_i) = \{S_i^k, k = 1..LL_i\}$, $LL_i = 3$ et $S_i^k \in S$.
- le temps opératoire pour chaque type de PDL_IE $T_{OP}(T_i, S_k)$ est disponible dans le tableau suivant (Tab. 6) :

T_1	List de services $S_1-S_2-S_3$	$T_{OP}(T_1, S_1)$	$T_{OP}(T_1, S_2)$	$T_{OP}(T_1, S_3)$
1	1-2-3	5	28	10
2	2-3-1	20	11	12
3	3-1-2	18	11	14

Tab. 6 Données d'entrée (pour l'implémentation)

La matrice des distances entre chaque nœud décisionnel et les ressources voisines est la suivante :

	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R4</i>	<i>R5</i>	<i>R6</i>
<i>D1</i>	22	44	64	66	45	23
<i>D2</i>	11	33	53	55	34	56
<i>D3</i>	45	22	42	44	23	45
<i>D4</i>	78	11	31	33	55	77
<i>D5</i>	67	45	20	22	44	66
<i>D6</i>	56	34	54	11	33	55
<i>D7</i>	45	23	43	55	22	44
<i>D8</i>	34	66	76	78	11	33
<i>D9</i>	23	55	65	67	46	22
<i>D10</i>	52	74	94	96	75	11
<i>D11</i>	41	63	83	85	64	42

Dans cette implémentation réelle, afin de supporter les deux approches de pilotage concurrentes, chaque contrôleur de nœud décisionnel est chargé de mettre à jour les temps de transport et les valeurs des champs de potentiels des ressources voisines.

4.2. Résultats expérimentaux

Deux scénarii ont été lancés durant nos expérimentations : le premier démontre le bon fonctionnement de chaque approche, et le deuxième vise à mettre en évidence la robustesse de l'approche face à des perturbations affectant une ou plusieurs ressources.

4.2.1. Scénario n°1 : Fonctionnement normal

Dans ce scénario, toutes les ressources fonctionnent normalement.

Approche utilisant le mécanisme d'allocation basé sur contract-net :

L'approche testée utilise le mécanisme contract-net pour le processus d'allocation et l'algorithme Dijkstra pour le processus de routage. La table de routage de chaque contrôleur de nœud est mise à jour avec le temps de parcours mesuré entre deux nœuds consécutifs.

1. Initialement trois PDL_IE P_1 , P_2 et P_3 sont lancés à partir du nœud D_2 (w_6) avec chacun trois services à satisfaire (Figure 58).

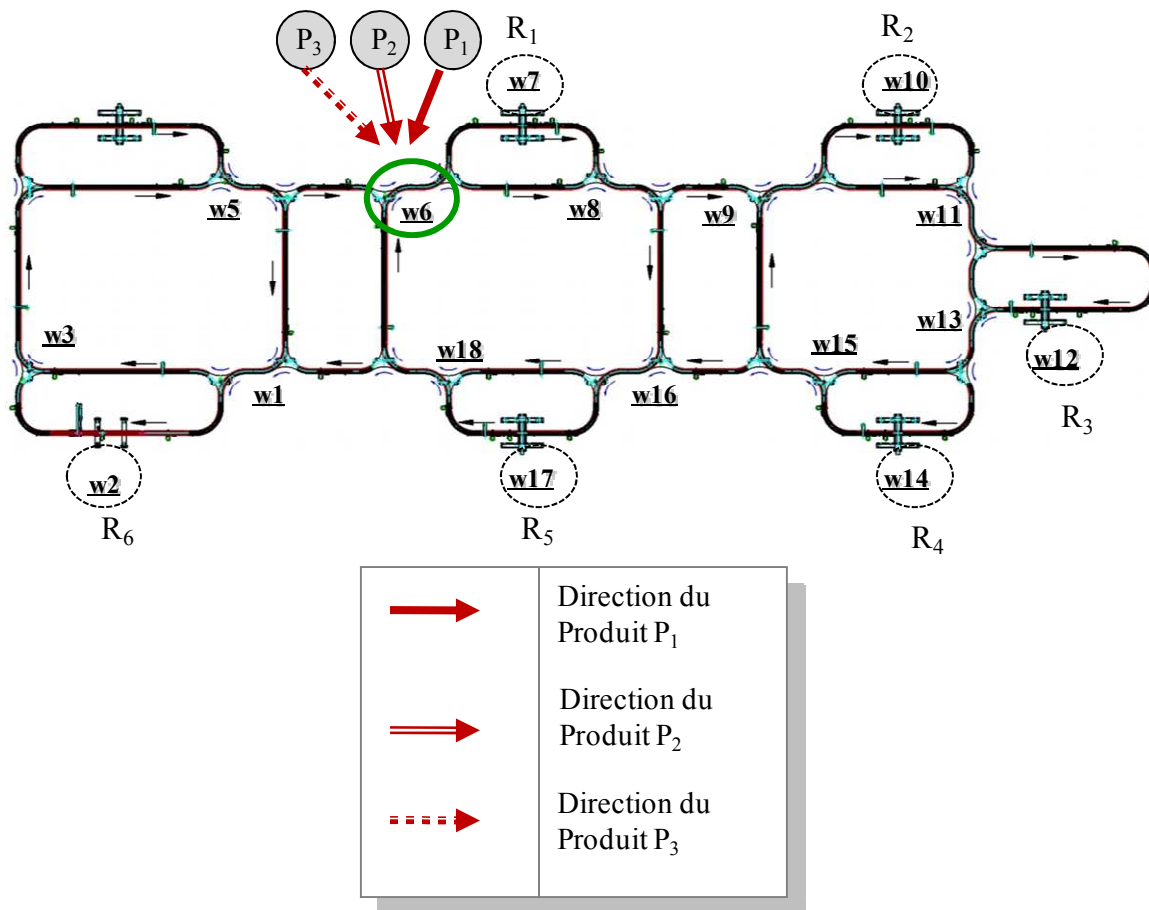


Figure 58- Introduction des PDL_IE

2. Obtention du premier service : P_1 demande le service S_1 . Puisqu'une seule ressource peut satisfaire le service S_1 , P_1 emprunte le chemin [w_6 - w_7].

P_2 demandant le service S_2 a le choix entre les ressources R_2 et R_3 . Il choisit le nœud destination le plus proche du nœud décisionnel D_2 (w_6), c'est-à-dire R_2 . Pour s'y rendre, il emprunte le chemin $[w_6-w_8-w_9-w_{10}]$.

P_3 a besoin du service S_3 . Après analyse des temps de parcours pour atteindre les différentes ressources (R_4 , R_5 et R_6), P_3 choisit de se déplacer vers R_5 en empruntant le chemin $[w_6-w_8-w_{16}-w_{17}]$ (Figure 59).

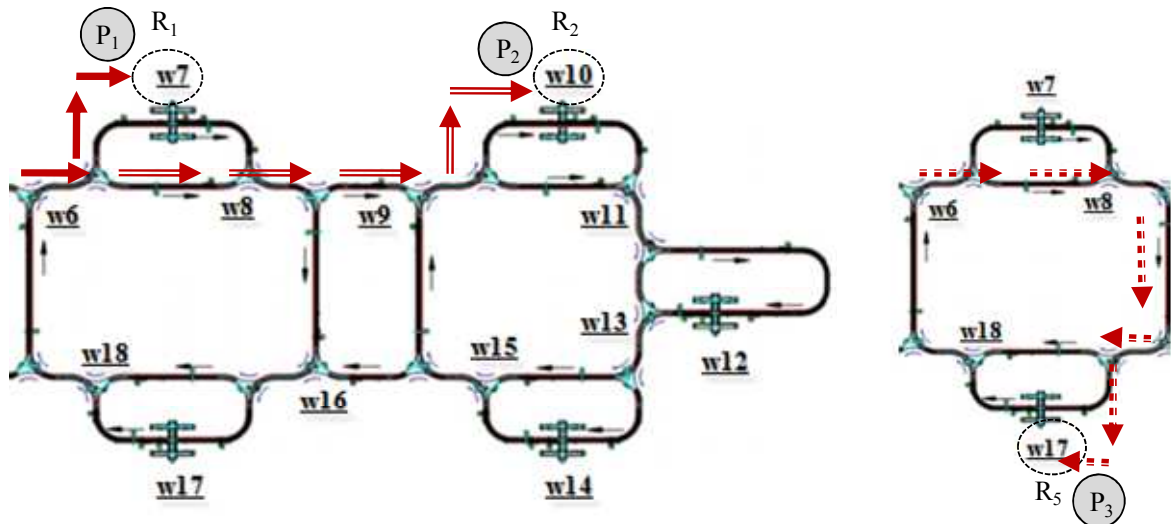


Figure 59- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du premier service

3. Obtention du deuxième service : Les trois PDL_IE sélectionnent le deuxième service à obtenir dans leur liste de services. Les nœuds décisionnels mettent à jour leurs tables de routage et les PDL_IE choisissent leur nouvelle destination en passant par le chemin le plus court. Les trajectoires suivies par les trois PDL_IE sont représentées sur la figure 60.

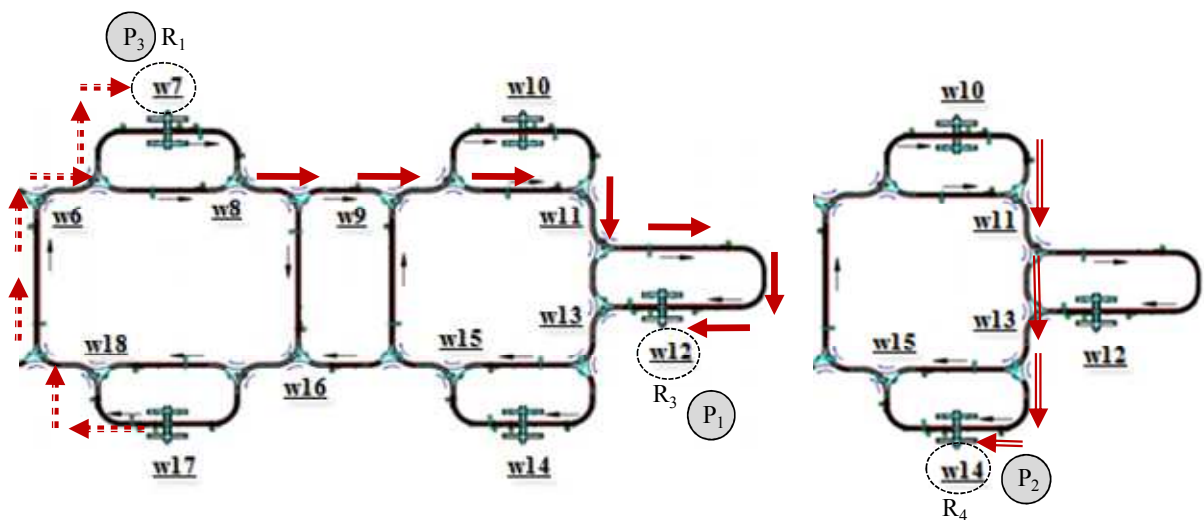


Figure 60- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du deuxième service

4. La même procédure est répétée jusqu'à ce que la liste de services de chaque PDL_IE soit vide. La figure 61 représente les trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour obtenir le dernier service de leurs listes respectives.

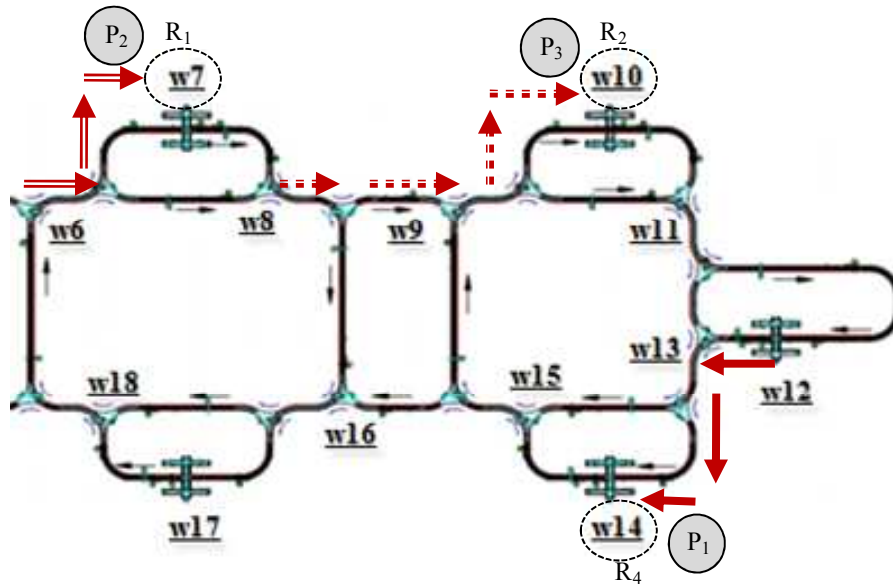


Figure 61- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du dernier service

Le diagramme de Gantt de la figure 62 représente l'occupation des différentes ressources et fait apparaître un makespan de 227 secondes.

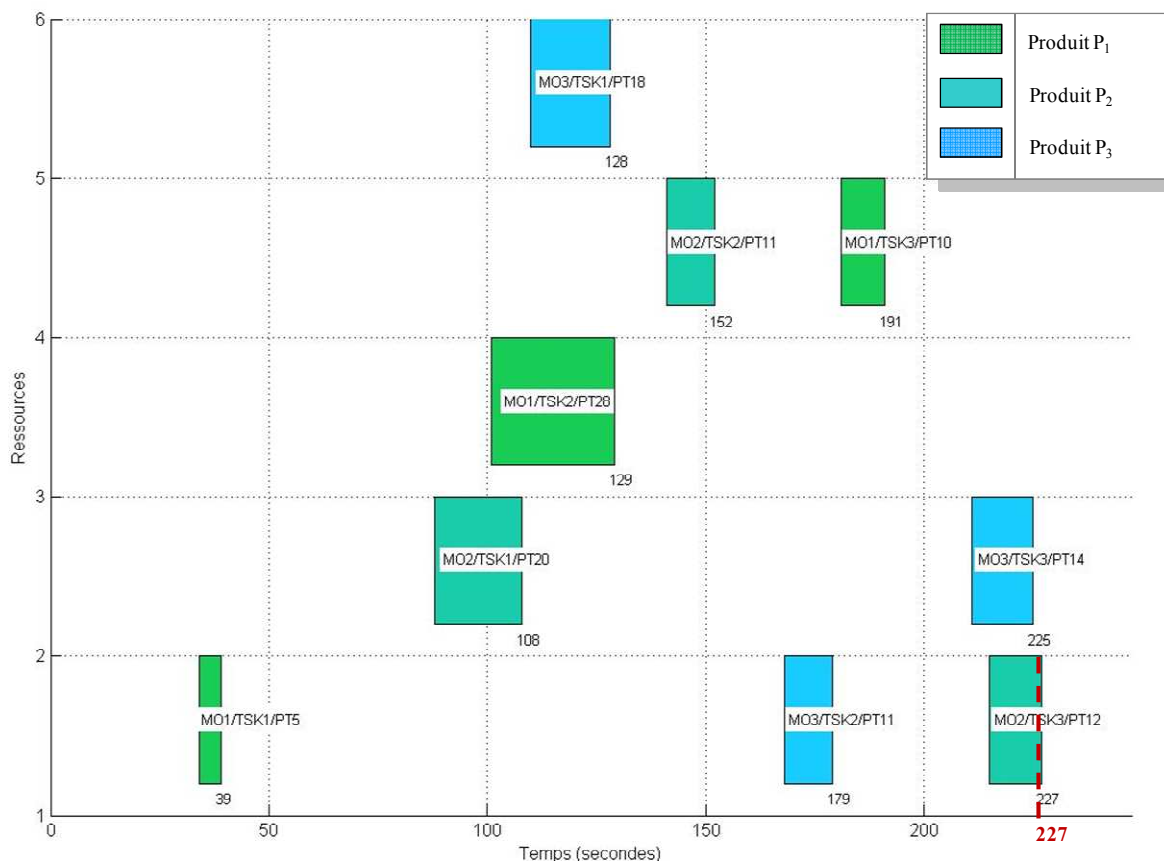


Figure 62- Gantt relatif au scénario n°1 (approche contract-net)

Approche par champs de potentiel : Le même scénario a été réalisé pour l'approche à base de champs de potentiel. Son déroulement est décrit par les étapes suivantes :

1. Initialement, le contrôleur w7 (R_1) génère un champ de potentiel attractif correspondant au service S_1 . Les contrôleurs w10 et w12 (R_2 et R_3) génèrent chacun un champ de potentiel attractif correspondant au service S_2 . Les contrôleurs w14, w17 et w2 (R_4 , R_5 , R_6) génèrent chacun un champ de potentiel attractif correspondant au service S_3 . Dans cette expérience, les valeurs initiales pour la qualité de service sont égales à 200. La figure 63 résume l'état initial de la cellule lors de l'introduction des trois PDL_IE.

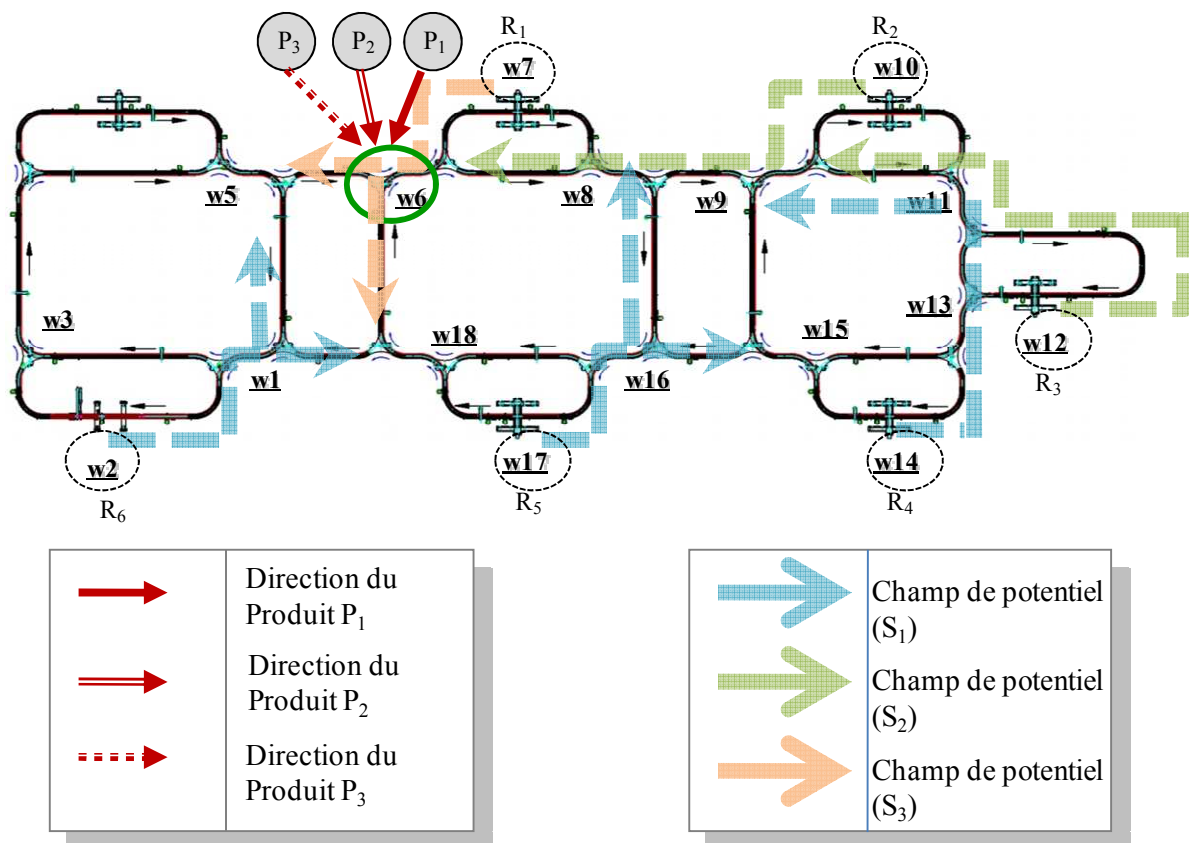


Figure 63- Introduction des PDL_IE

2. Chaque contrôleur de nœud décisionnel élabore une matrice de $F(D_i, R_j, S_k)$ en utilisant la matrice de champs de potentiels reçue et la matrice de distance. F est calculé par la formule suivante : $F(D_i, R_j, S_k)_i = AT(R_j, S_k)_i - (d_{ij})_i$. Au début, toutes les ressources sont disponibles avec des files d'attentes vides, donc, $AT(R_1, S_1)_0 = Q(R_1, S_1)_0 = 200$, $AT(R_2, S_2)_0 = Q(R_2, S_2)_0 = 200$, $AT(R_3, S_2)_0 = Q(R_3, S_2)_0 = 200$, $AT(R_4, S_3)_0 = Q(R_4, S_3)_0 = 200$, $AT(R_5, S_3)_0 = Q(R_5, S_3)_0 = 200$, $AT(R_6, S_3)_0 = Q(R_6, S_3)_0 = 200$.
3. Quand un PDL_IE arrive sur un nœud décisionnel, il filtre les différentes valeurs des champs de potentiel pour ne s'intéresser qu'à celles correspondant au service demandé.
4. Obtention du premier service : le PDL_IE P₁ est situé sur le nœud décisionnel D₂ (w6) et n'a pas d'autre choix pour le service S₁ que de se diriger directement vers la ressource R₁. Le PDL_IE P₂ demande le service S₂. Comme deux ressources peuvent satisfaire ce service, en arrivant sur D₄ (w9), P₂ teste les valeurs du champ pour ces deux ressources. R₂ et R₃ sont libres, donc

$$F(D_4, R_2, S_2)_0 = AT(R_2, S_2)_0 - (d_{4,2})_0 = 200 - 11 = 189 \text{ et}$$

$$F(D_4, R_3, S_2)_0 = AT(R_3, S_2)_0 - (d_{4,3})_0 = 200 - 31 = 169,$$

P_2 se dirige vers R_2 qui a la valeur la plus grande.

P_3 demande le service S_3 . R_4 , R_5 et R_6 pouvant répondre à cette demande, P_3 lit les valeurs des champs de potentiel arrivant sur D_3 (w_8) et se dirige vers la ressource qui émet la valeur la plus importante.

$$\text{Sur } D_3, F(D_3, R_4, S_3)_0 = AT(R_4, S_3)_0 - (d_{3,4})_0 = 200 - 44 = 156,$$

$$F(D_3, R_5, S_3)_0 = AT(R_5, S_3)_0 - (d_{3,5})_0 = 200 - 23 = 177 \text{ et}$$

$$F(D_3, R_6, S_3)_0 = AT(R_6, S_3)_0 - (d_{3,6})_0 = 200 - 45 = 155.$$

P_3 choisit de se diriger vers R_5 pour obtenir son service.

La figure 64 représente les trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour obtenir le premier service de leur liste.

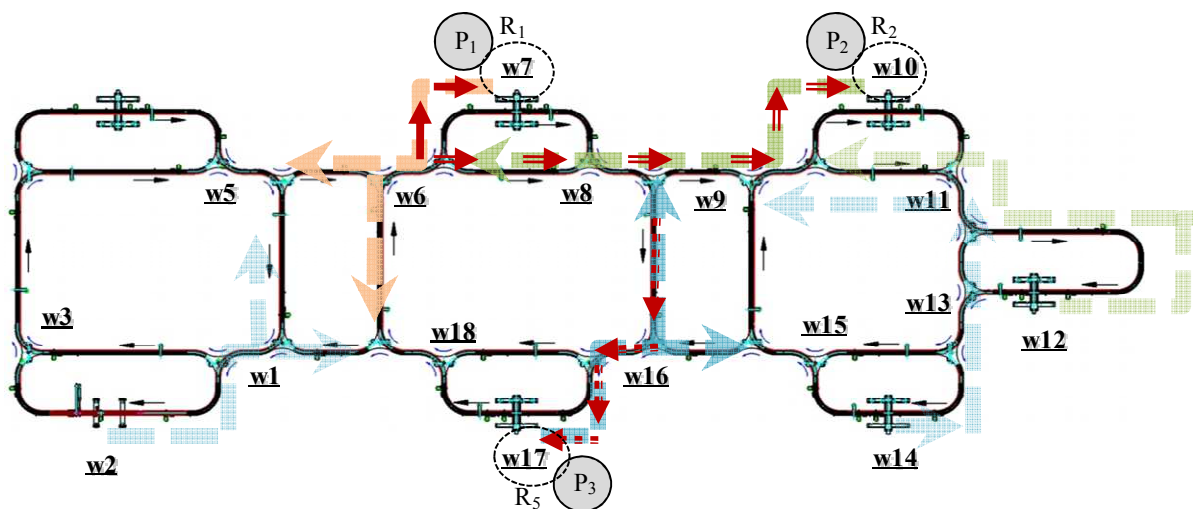


Figure 64- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du premier service

5. Obtention du deuxième service : P_1 demande le service S_2 , mais R_2 est occupée à satisfaire

$$\text{la demande de } P_2 \text{ et donc son attraction diminue : } AT(R_2, S_2)_1 = \frac{200}{1+14} = 13.33.$$

Comme R_3 est libre ($AT(R_3, S_2)_1 = 200$), P_1 se dirige vers R_3 .

P_2 demande le service S_3 , mais entre temps P_1 a également demandé le service S_3 et s'est dirigé vers R_4 . Cette dernière ressource est donc occupée et son attractivité diminue.

P_2 sur D_5 (w_{11}) teste les valeurs des champs de potentiel émis par R_4 , R_5 et R_6 :

$$AT(R_4, S_3)_1 = \frac{200}{1+4} = 40, \text{ d'où } F(D_5, R_4, S_3)_1 = AT(R_4, S_3)_1 - (d_{5,4})_1 = 40 - 22 = 18$$

R_5 et R_6 sont libres, d'où $F(D_5, R_5, S_3)_1 = AT(R_5, S_3)_1 - (d_{5,5})_1 = 200 - 44 = 156$ et

$$F(D_5, R_6, S_3)_1 = AT(R_6, S_3)_1 - (d_{5,6})_1 = 200 - 66 = 134,$$

P_2 choisit donc finalement de se diriger vers R_5 pour obtenir S_3 .

P_3 se dirige évidemment vers R_1 qui est la seule ressource capable d'offrir le service S_1 .

La figure 65 représente les trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour obtenir le deuxième service de leur liste.

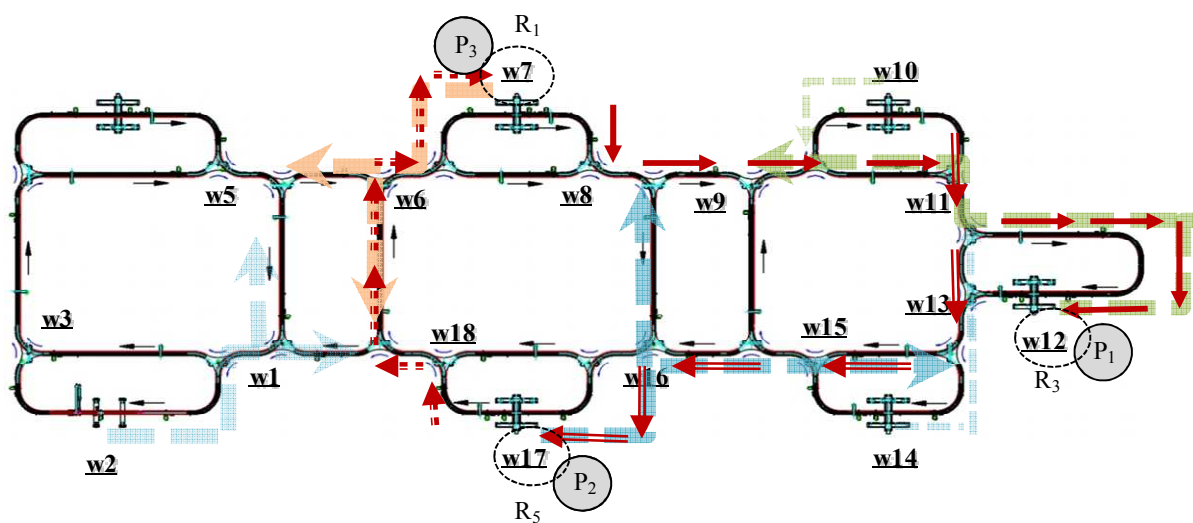


Figure 65- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du deuxième service

6. Obtention du dernier service : le service S_1 demandé par P_2 se fait obligatoirement sur R_1 . P_3 demande le service S_2 . Les ressources R_2 et R_3 étant libres, P_3 teste les valeurs des champs émis par les deux ressources en arrivant sur D_4 (w_9). Il choisit de se diriger vers R_2 car la valeur du champ de potentiel émis par R_2 (189) est plus importante que celle de R_3 (169).

P_1 ayant obtenu son service S_2 sur R_3 , demande le service S_3 et se dirige vers R_4 qui émet champ de potentiel le plus important pour ce service.

La figure 66 représente les trajectoires suivies par les trois produits pour obtenir le dernier service de leur liste.

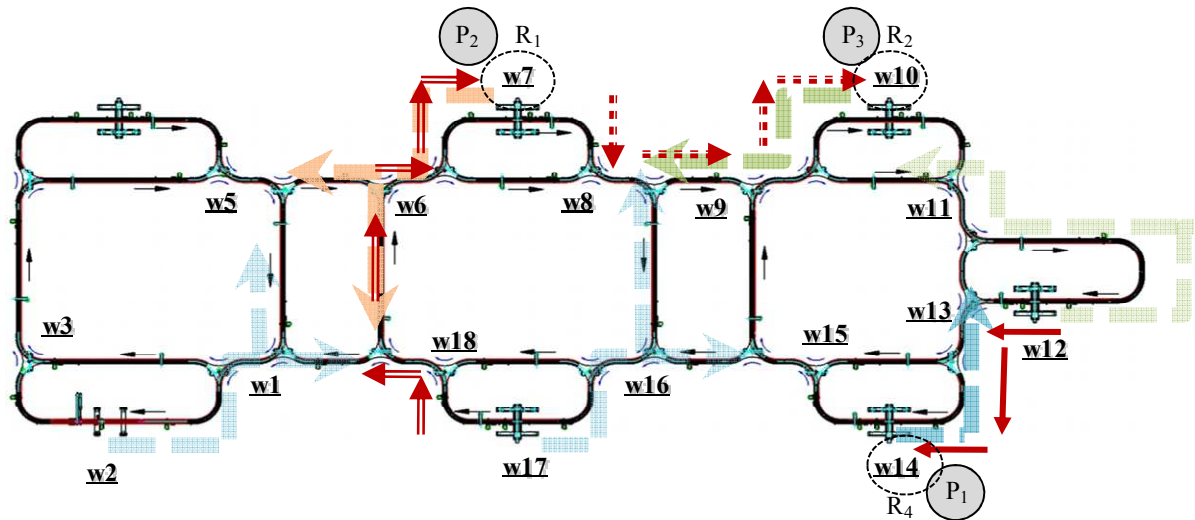


Figure 66- Trajectoires suivies par les trois PDL_IE pour l'obtention du deuxième service

Le diagramme de Gantt de la figure 67 représente l'occupation des différentes ressources et fait apparaître un makespan de 197 secondes.

La ressource R_1 traite logiquement les trois produits car elle est la seule ressource à offrir le service S_1 . Le traitement du service S_2 est pris en charge par les deux ressources R_2 et R_3 , tandis que le traitement de S_3 est pris en charge par les deux ressources R_4 et R_5 .

R_6 n'est pas utilisée, car vu le faible nombre de produits en circulation dans la cellule flexible, les ressources R_4 et R_5 sont suffisantes pour répondre aux différentes demandes de service S_3 .

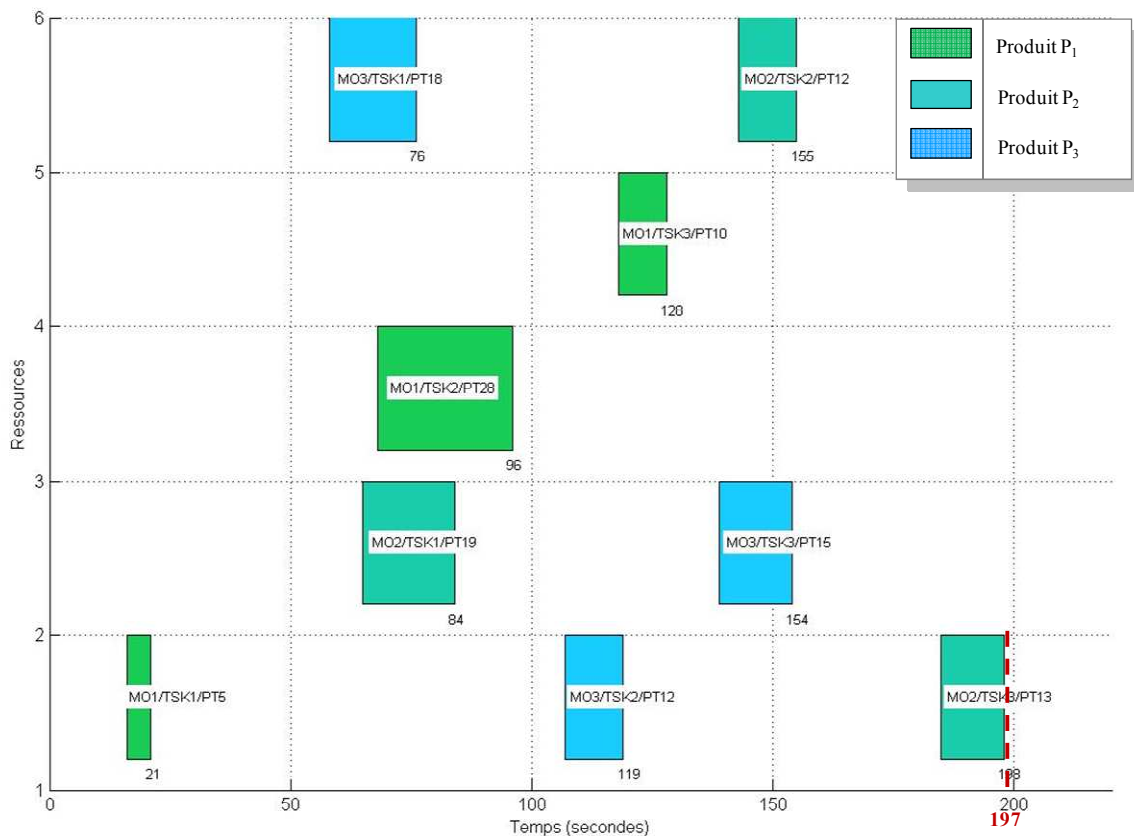


Figure 67- Gantt-scénario 1- champ de potentiel

4.2.2. Scénario n°2 : Robustesse aux perturbations

Dans ce scénario, nous choisissons de montrer la robustesse du système de production en cas d'indisponibilité des ressources (due à une opération de maintenance, par exemple). Les ressources R₂ et R₄ sont indisponibles au début de la production et redeviennent disponibles respectivement aux instants 70 et 190. Trois produits de type 1 sont lancés successivement avec un intervalle de 30 secondes. La figure 68 suivante montre les trajectoires suivies par le PDL_IE P₁ selon la disponibilité des ressources R₂ et R₄.

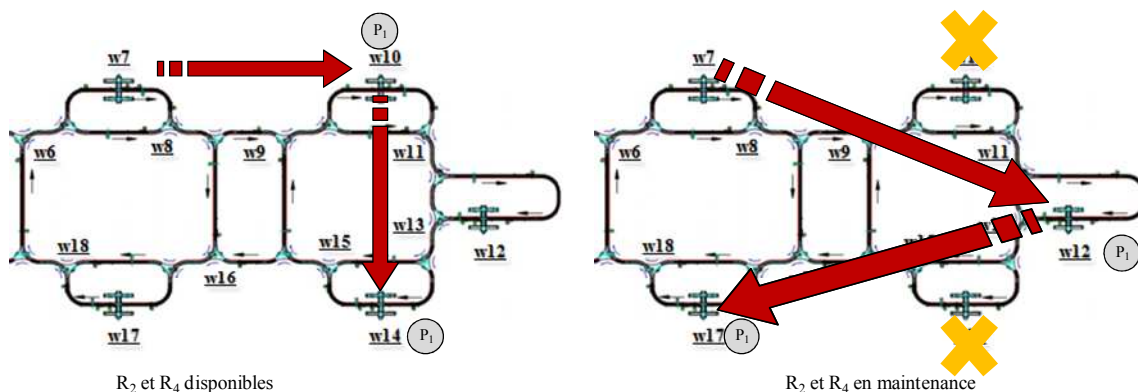


Figure 68- Changement de trajectoire en cas d'indisponibilité des ressources

La figure 69 illustre le diagramme de gantt obtenu en utilisant l'approche Contract-net et Dijkstra. Un makespan de 261 secondes est obtenu. Nous remarquons que les PDL_IE arrivent sur la première ressource avec un intervalle de temps supérieur aux 30 secondes initialement prévues. En effet, dans l'approche contract-net implémentée, on exige que le PDL_IE se connecte à toutes les ressources au début de sa production pour initier une négociation. Les ressources R_2 et R_4 étant en maintenance, le PDL_IE n'arrive pas à se connecter à elles. Après plusieurs tentatives de connexion, le PDL_IE conclut que les ressources R_2 et R_4 sont défaillantes. Ces essais sont nécessaires car en cas d'encombrement du réseau de communication, la connexion n'est pas immédiate.

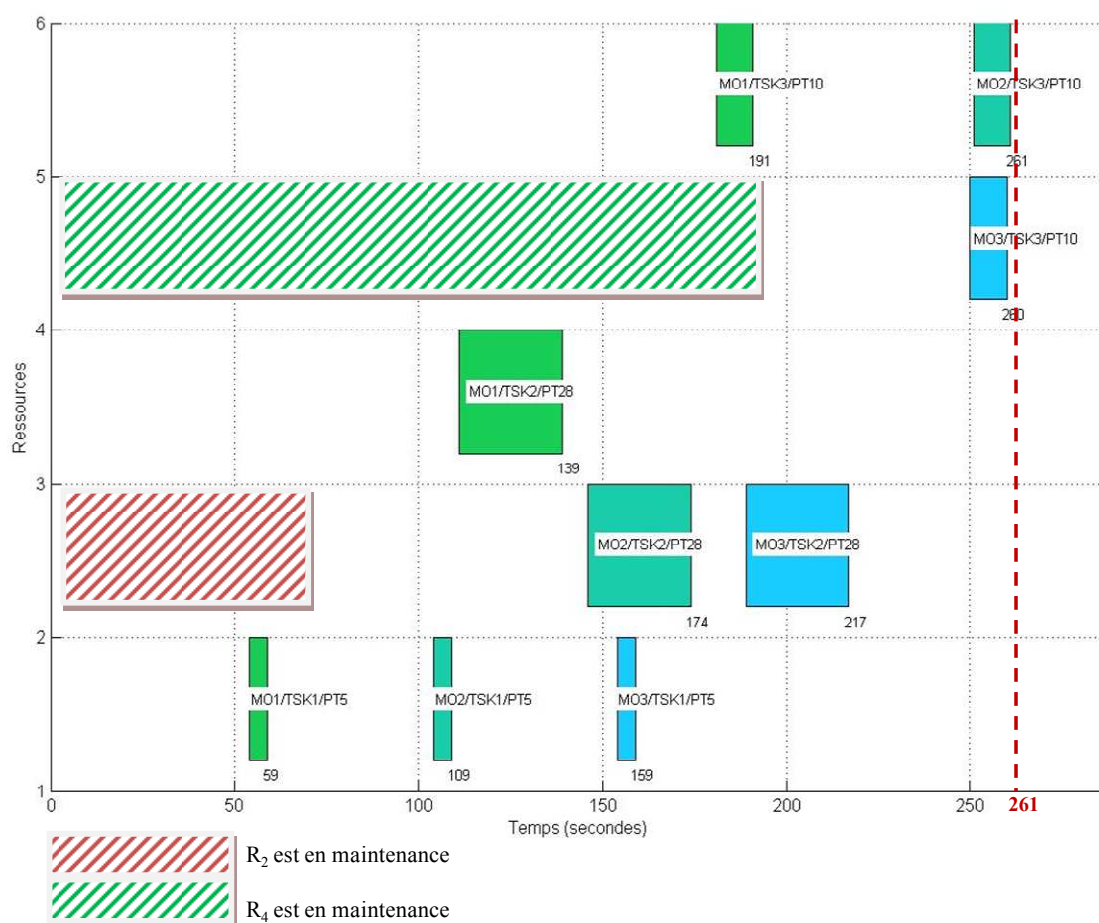


Figure 69- Impact de la disponibilité des ressources avec contract-net

La Figure 70 illustre le gantt obtenu pour le même scénario en utilisant l'approche par champs de potentiel. La valeur du makespan obtenue est de 216 secondes. Dans cette approche, une panne de ressource est équivalente à un champ nul. Les PDL_IE se dirigent donc "naturellement" vers une autre ressource émettant un champ non nul ou vers la boucle de référence si aucun champ n'est capté.

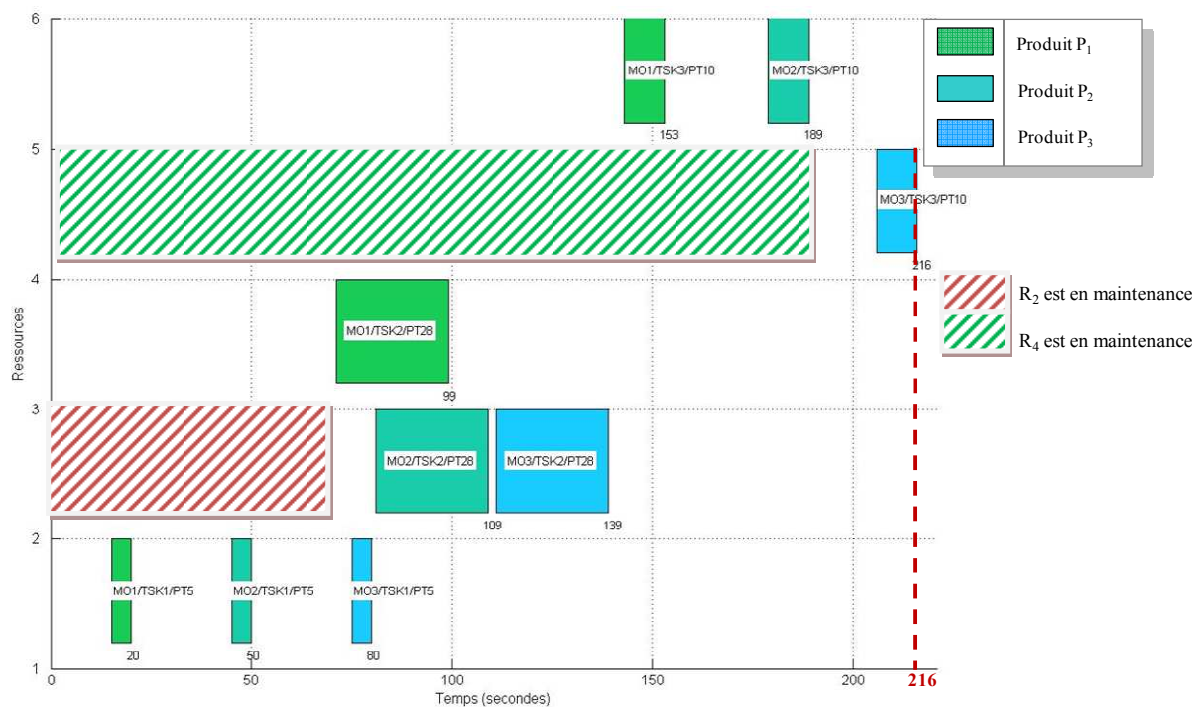


Figure 70- Impact de la disponibilité des ressources avec le champ de potentiel

4.3. Interprétation des résultats

Les scénarii précédents ont permis d'évaluer les deux approches de pilotage mises en œuvre. Les résultats expérimentaux obtenus confirment ceux trouvés lors des simulations menées dans le chapitre IV : l'approche par champs de potentiel donne de meilleurs résultats en termes de minimisation du makespan que l'approche utilisant contract-net. Le graphe de la figure 71 montre l'évolution du makespan pour les deux scénarii proposés.

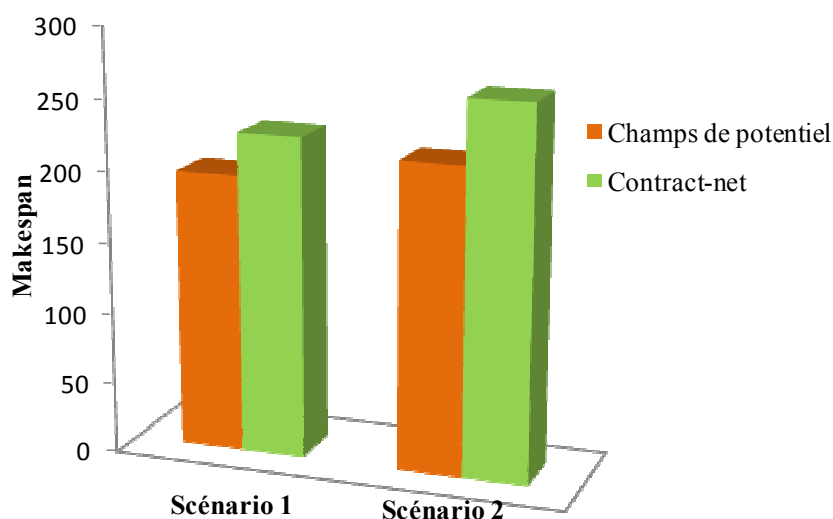


Figure 71- Evolution du makespan pour les deux scénarii

L'approche par champs de potentiel est également plus simple à implémenter avec moins de variables et de paramètres échangés entre entités, minimisant ainsi l'emprise sur le média de communication. Dans notre approche par champs de potentiels, les entités ont uniquement besoin d'accéder à la valeur du champ de potentiel pour prendre leur décision, alors que dans l'approche contract-net, ils ont besoin d'obtenir les temps de routage, la qualité des services fournis par les ressources, l'état de ces dernières (occupée, libre, en maintenance...). De plus pour l'approche contract-net, une négociation doit avoir lieu entre les ressources et les PDL_IE. Ceci implique plusieurs échanges consécutifs pour qu'un PDL_IE puisse réserver une ressource alors que le choix de la ressource se fait directement selon la valeur du champ pour l'approche par champs de potentiel.

Un autre avantage des champs de potentiel réside en l'absence d'algorithme de routage supplémentaire. En effet, l'approche est capable de résoudre conjointement les deux problèmes identifiés d'allocation et de routage.

Enfin, lors des études de simulation du chapitre précédent, l'approche par champs de potentiel s'est avérée capable de supporter le traitement d'un nombre important de PDL_IE.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'implémentation réelle de notre approche de pilotage sur la cellule flexible du pôle AIP-Primeca à Valenciennes a été présentée. L'instrumentation des produits « actifs » de classe 4 ainsi que l'instrumentation des nœuds décisionnels avec lesquels ils interagissent ont été décrites.

Notre approche de pilotage à base de champs de potentiel ainsi qu'une autre approche concurrente (basée sur le protocole de contract-net et l'algorithme Dijkstra) ont également été implémentées à des fins de comparaison. Les deux approches ont été évaluées à l'aide de plusieurs scénarii lors d'un protocole expérimental commun.

L'approche par champs de potentiel s'est montrée apte à résoudre efficacement les deux problématiques d'allocation des tâches aux ressources et de routage des produits en présence de perturbations. Elle est également robuste à l'ajout et/ou la suppression d'entités (produits ou ressources). De plus, un nombre croissant d'entités n'entraîne pas une complexification des interactions entre entités.

Les expérimentations menées sur la cellule flexible ont également permis de valider notre concept d'augmentation associé à l'élaboration de produits « actifs ». Elles ont souligné l'intérêt de produits « actifs », aptes à adapter leur comportement selon les variations de leur environnement, pour un système de production soumis à perturbations.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est la proposition d'une approche de pilotage « agile » offrant les caractéristiques de réactivité et de robustesse nécessaires pour faire face à des contraintes externes de plus en plus prégnantes. L'approche proposée se situe à la croisée de deux thématiques de Recherche présentes dans notre équipe : l'hétéarchie et les systèmes « actifs ». Cette approche est basée sur l'utilisation de champs de potentiel pour résoudre conjointement les problématiques d'allocation des tâches aux ressources et de routage des produits vers les ressources.

Nous avons présenté le contexte de notre étude dans le premier chapitre. Pour faire face aux différentes contraintes externes (diversité des produits, personnalisation de masse, perturbations de la chaîne logistique...), le système de production doit revêtir certaines propriétés (réactivité, robustesse, reconfigurabilité) regroupées sous le concept d'agilité. Ce contexte nous a amené à focaliser notre étude sur les systèmes de pilotage hétéarchiques, et par la suite à dresser un état de l'art des principales approches de modélisation et des modalités d'interaction communément utilisées dans ce type de pilotage. Suite à cette analyse

de l'état de l'art, l'objectif de cette thèse a été affiné. Il porte sur la résolution conjointe des problèmes d'allocation des tâches aux ressources et de routage des produits vers les ressources.

Dans le second chapitre, nous avons proposé une approche de pilotage utilisant les champs de potentiel afin de résoudre conjointement la double problématique précédente. Suite à un état de l'art de l'utilisation du concept de champ de potentiel dans différents domaines applicatifs, nous avons spécifié et élaboré un modèle utilisable dans le domaine de la production manufacturière. Les spécifications associées à ce modèle stipulent que les différentes entités (ressources et produits) interagissant doivent être dotées de capacités décisionnelles.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation d'un modèle de produit « actif » à même d'être utilisé dans le cadre de notre approche. Après avoir proposé une typologie de classification des produits « actifs/intelligents », nous avons analysé les différents travaux menés sur ce type de produits dans le domaine manufacturier. Les lacunes et imprécisions décelées suite à cette analyse nous ont mené à proposer un modèle générique de produit « actif » basé sur le concept d'augmentation.

Dans le quatrième chapitre, nous avons validé notre approche à l'aide de la plate-forme de développement multi-agents Netlogo. Pour cette validation, nous avons utilisé un type de produit « actif » avec capacités décisionnelles embarquées. Plusieurs scénarii ont été élaborés en se basant sur de précédents travaux qui proposaient un système de pilotage hétéroarchique utilisant une approche contract-net. Ce benchmark a permis de comparer notre approche à base de champs de potentiel avec ce type d'approche communément utilisée dans de nombreux systèmes de pilotage hétéroarchiques. Les résultats obtenus ont montré la pertinence de notre contribution en termes de scalabilité et de robustesse face aux perturbations.

Le dernier chapitre a été consacré à l'implémentation de nos propositions sur la cellule flexible du pôle AIP Priméca de Valenciennes. Après avoir présenté les différentes instrumentations associées aux produits « actifs » et à son environnement, nous avons décrit l'implémentation de deux systèmes de pilotage. La première repose sur notre approche à base de champs de potentiel alors que la seconde exploite le protocole contract-net pour l'allocation des

ressources et l'algorithme Dijkstra pour le routage des produits. Une comparaison des résultats, obtenus au travers des deux implémentations, a permis de confirmer les résultats de l'étude en simulation.

Perspectives

Notre travail ouvre de nombreuses perspectives à court et moyen terme.

Perspectives à court terme : A court terme, les perspectives envisagées visent à poursuivre et compléter la validation de l'approche par « champs de potentiel ». Les voies de progrès consistent principalement à :

- Améliorer notre approche de formalisation du champ potentiel en tenant en compte d'une plus grande variété de défaillances au sein du système de production modélisé (blocage total du produit sur une ressource, shuttle bloqué...);
- Elaborer des mécanismes plus subtils d'allocation, associant attraction des produits « actifs » par les ressources et répulsion des produits « actifs » entre eux. Cette amélioration est capitale pour « coordonner » de manière naturelle les déplacements des produits « actifs » et éviter une baisse des performances du système de production ;
- Implémenter d'autres indicateurs de performance que le makespan de façon à pouvoir mener une analyse plus fine de l'occupation des différentes ressources et des trajectoires suivies par les produits « actifs » ;
- Engager d'autres campagnes de simulation en tenant compte d'une plus grande variabilité au niveau de la production (d'autres types d'ordres de fabrication, des temps opératoires dépendant de la ressource sur laquelle le produit est traité) ;
- Etudier l'influence sur la performance globale d'autres lois de décroissance (non linéaires) pour la distance entre ressource et produit attiré ;
- Appliquer cette approche à d'autres types de systèmes de production, incluant par exemple d'autres topologies de circuit de transport (systèmes de production line-less par exemple).

Perspectives à moyen terme : A moyen terme, trois principaux axes de Recherche peuvent être mis en évidence :

- Le premier axe est relatif à une problématique capitale à traiter pour permettre une plus grande diffusion du concept d'hétérarchie dans le monde industriel. Il concerne le manque de la visibilité à long terme, généralement connu sous le terme de « myopie ». Plusieurs pistes peuvent déjà être esquissées :
 - Un premier élément de réponse concerne le couplage de notre niveau hétérarchique effectuant l'allocation et le routage à un système de type ERP (*Enterprise Resource Planning*) se chargeant d'optimiser les performances du système de production.
 - Une deuxième approche serait de prendre en compte un « futur proche » lors des différentes prises de décision au niveau des ressources et des produits « actifs ». Les champs de potentiel émis seraient alors basés sur un horizon de temps, permettant aux entités d'anticiper des événements tels que le prochain arrêt d'une ressource pour une opération de maintenance préventive ou la prochaine livraison de composants à assembler.
- Le deuxième axe de Recherche identifié concerne une possible application de l'approche par champs de potentiels à d'autres domaines tel que les Transports. Dans le cadre de transport à la demande (flotte de cyber-véhicules, véhicules en car-sharing), les champs de potentiels pourraient être utilisés pour réaliser l'affectation des véhicules aux différentes demandes des usagers. Dans le même contexte applicatif, le redéploiement de la flotte de véhicules pourrait être assuré en faisant varier les potentiels attractifs ou répulsifs des différentes zones de stationnement et de dépôt.
- Le concept d'augmentation, sur lequel repose notre modèle générique de produit « actif », a été validé avec succès pour la phase de fabrication. Ce concept doit être validé au travers d'autres applications pour d'autres phases du cycle de vie d'un produit. De futurs travaux entrepris dans la cadre d'un projet FUI avec un grand constructeur ferroviaire devrait nous permettre d'appliquer ces concepts dans un contexte d'auto-diagnostic et de maintenance prédictive d'équipements (portes, climatisations...) en phase d'utilisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (Arkin et al., 1997) Arkin R., Bekey C., et George A., 'Robot Colonies', ISBN: 9780-7923-9904-9, page 160, Hardcover, 1997.
- (Bajic, 2004) Bajic E., 'Ambient Networking for intelligent objects management, mobility and services'. Seminar Institut For Manufacturing - IFM Université de Cambridge, Angleterre, 2 Avril 2004.
- (Barraquand et Latombe, 1989) Barraquand J., et Latombe J., 'Robot Motion Planning: A Distibuted Representation Approac'. Rapport de recherche, STAN-CS-89-1257, Département Informatique, 1989.
- (Beigl et al., 2001) Beigl M., Gellersen H-W., et Schmidt A., 'Mediacups : experience with design and use of computer-augmented everyday artefacts'. Computer Networks, volume 35, pages 401-409, 2001.
- (Berger et al., 2009) Berger T., Zbib N., Sallez Y., et Trentesaux D., 'Active product driven control of dynamic routing in FM', JESA, vol 43/4-5- pp.407-434 doi:10.3166.43.407-434, 2009.

- (Bongaerts, 1998) Bongaerts L., 'Integration of scheduling and control in holonic manufacturing systems', Thèse de l'Université Catholique de Louvain, Décembre 1998.
- (Botti et al, 1995) Botti V., Barber F., Crespo A., Onaindia E., Garcia-Fornes A., Ripoll I., Gallardo D. et Hernfindez L., 'A temporal blackboard for a multi-agent environment', *Data & Knowledge Engineering*, volume 15, pages 189-211, 1995.
- (Bousbia et Trentesaux, 2002) Bousbia S., Trentesaux D., 'Self-Organization in Distributed Manufacturing Control: state-of-the-art and future trends'. In: *IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics*, Hammamet, Tunisia, volume 5, pages 6-9 Octobre 2002.
- (Bousbia, 2006) Bousbia S., 'Amélioration continue des performances des systèmes de production de biens et de services : proposition d'un système de pilotage hétérarchique évolutif par apprentissage', Thèse de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Décembre 2006.
- (Bouwens et Abernethy, 2000) Bouwens J., et Abernethy A., 'The consequences of customization on management accounting system design', *Accounting, Organisations and Society*, volume 25, pages 221-241, 2000.
- (Breton et al., 2004) Breton L., Maza S. et Catstagna P., 'Simulation Multi_agent de systèmes d'AGVs : Comparaison avec une approche prédictive'. 5^o Francophone Conference in MOdelisation and SIMulation, MOSIM'04, Nantes, France, 1-3 septembre 2004.
- (Brückner, 2000) Brückner S., 'Return from the Ant synthetic ecosystems for manufacturing control', Thesis Humboldt-University of Berlin, juin 2000.
- (Brun Picard et al., 1997) Brun Picard D., Bouvet H., Baboli H. et Binder Z., 'the product as an active element of distributed production control'. *IFAC-IFIP-IMACS Conference*, Belfort, 20-22 Mai 1997.

- (Caro et Dorigo, 1998) Caro D.G. et Dorigo M., 'AntNet : Distributed Stigmergic Control for Communications Networks', *Journal of Intelligence Research*, volume 9, pages 317- 365.
- (Cea Ramirez et Bajic, 2005) Cea Ramirez A. et Bajic E., 'Service Modeling for Intelligent Products in the Supply Chain'. ICPR 18 –18th International Conference on Production Research - Fiasciano, Italy, 31/07-04/08/2005.
- (Cea Ramirez, 2006) Cea Ramirez A., Thèse 'Contribution à la Modélisation et à la Gestion des Interactions Produit-Processus dans la Chaîne Logistique par l'Approche Produits Communicants'. Centre de recherche d'automatique à Nancy, France, 18 Juillet 2006.
- (Chen et Occena, 1999) Chen C.H. et Occena L.G., 'Knowledge decomposition for a product design blackboard expert system'. *Artificial Intelligence in Engineering*, volume 14 pages 71–82, 2000.
- (Clarinet System, 2010) Clarinet System, 'Network Connectivity for Mobile Devices'. <http://www.clarinet.sys.com>, 2010.
- (Da Silveira et al., 2001) Da Silveira G., Borenstein D., et Fogliatto Flávio S., 'Mass customization: literature review and research directions'. *International Journal of Production Economics*, volume 72, pages 1-13, 2001.
- (David et Alla, 1989) David R. et Alla H., 'Du Grafctet aux réseaux de Petri', Hermès, Paris, 1989.
- (Dijkstra, 1959) Dijkstra E W., 'A note on two problems in connexion with graphs'. *Numerische Mathematik*, 1:269, 271., 1959.
- (Diltis et al., 1991) Diltis D. M., Boyd N. P., et Whorms H. H., 'The evolution of control architectures for automated manufacturing systems'. *Journal of Manufacturing Systems*, volume 10 (1), pages 79–93, 1991.

- (Dobre et al., 2009) Dobre, D., Bajic, E. and Zouinkhi, A. Active product modeling based on smart objects concept. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 43 (4/5), 561-579, 2009.
- (Dobre et Bajic, 2008) Dobre D. et Bajic E., 'Active product modeling for chemical security management based on smart object concept'. 7ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'08, Paris – France, 2008.
- (Dorigo et al., 1991) Dorigo M., Maniezzo V., et Colorni A., 'Positive feedback as a search strategy'. Technical Report 91-016, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- (Dorigo et Stutzle, 2006) Dorigo M. et Stützle T., *Ant Colony optimization*, The MIT Press, 2006.
- (Farrell et Simpson, 2003) Farrell Ronald S., et Simpson Timothy W., 'Product platform design to improve commonality in custom products'. *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 14, pages 541-556, 2003.
- (Ferber, 1995) Ferber J. *Les systèmes multi- agents – vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris (ISBN 2- 7296- 0572- X), 1995.
- (Grassé, 1959) Grassé P.P., 'La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes Natalensis* et *Cubitermes sp.* La théorie de la stigmergie: essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs'. *Insectes Sociaux*, volume 6, pages 41-80, 1959.
- (Hayes-Roth, 1985) Hayes-Roth B., 'A blackboard architecture for Control'. *Artificial intelligence*, volume 26, pages 251-321, 1985.
- (Hsieh, 2005) Hsieh F., 'Analysis of contract net in multi-agent systems'. *Automatica*, volume 42, pages 733 – 740, 2005.
- (Jagannathan et al., 1994) Jagannathan S., Lewis F. L. et Kai L., 'Motion control and obstacle avoidance of a mobile robot with an onboard manipulator'. *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 5, pages 287-302, 1994.

- (Jun et al., 2007) Jun H.B., Kiritsis D. et Xirouchakis P., 'Research issues on closed-loop PLM'. *Computers in Industry*, volume 58 (8-9), pages 855-868, 2007.
- (Khatib, 1985) Khatib O., 'Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robot's. In *IEEE international conference on robotics and automation*, pages 500-505, 1985.
- (Koestler, 1967) Koestler, A., 'The Ghost in the Machine'. Hutchinson, 1967.
- (Layne et Bougelsdijk, 1998) Layne Scott P., Bougelsdijk Tony J., 'Mass customized testing and manufacturing via the Internet'. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, volume 14, pages 377-387, 1998.
- (Le Moigne, 1994) Le Moigne J.L., 'La théorie du système général, Théorie de la modélisation'. Second edition, Paris : PUF, pages 228,1994.
- (Lindwer et al., 2003) Lindwer M., Marculescu D., Basten T., Zimmermann R., Marculescu R., Jung S. et Cantatore E., 'Ambient Intelligence Visions and Achievements: Linking Abstract Ideas to Real-World Concepts'. *Proc. Design, Automation and Test in Europe Conference*. Munich, Germany, March 2003.
- (Malherbe et al., 2007) Malherbe, L., Herfeld, U., Kreimeyer, M., Deubzer, F. et Deneux, D. De la mise en relation des structures produit et fonctionnelle dans le développement automobile pour gérer les flux informationnels. *In: Proc. 10th AIP-PRIMECA National Colloquium*, La Plagne, 17-20 April 2007.
- (Mamei et al., 2006) Mamei M., Menezes R., Tolksdorf R., et Zambonelli F., 'Case studies for self-organization in computer scienc'. *Journal of Systems Architecture* volume 52, pages 443-460, 2006.
- (McFarlane et al., 2002) McFarlane D., Sarma S., Chirn Jin L., Wong C Y., et Ashton K., 'The intelligent product in manufacturing control and management'. *15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.

- (Meyer et al., 2009) Meyer G.G., Främling K. et Holmström J., ‘Intelligent Products: A survey’. *Computers in Industry*, volume 60 (3), pages 137–148, 2009.
- (Montech, 2010) Montech Technology. Conveyor systems, <http://www.montech.com>, 2010.
- (Moujahed et al., 2007) Moujahed S., ‘Approche multi-agents auto-organisée pour la résolution des contraintes spatiales dans les problèmes de positionnement mono et multi-niveaux’. Thèse à l’Université de Franche-Comté et à l’Université de Technologie à Belfort-Montbéliard, 2007.
- (Okino, 1993) Okino N., ‘Bionic Manufacturing System. In: Proceedings of the CIRP seminar on Flexible Manufacturing System: past-present-future’. J. Peklenik (ed), CIRP, Paris, pages 73–95, 1993.
- (Ounnar et al., 2008) Ounnar F., Pujo P., Mekaouche L. et Giambiasi N., ‘Integration of a flat holonic form in an HLA environment’. *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI:10.1007/s10845-008-0106-4, 2008.
- (Pannequin et al., 2009) Pannequin R., Thomas A. et Morel G. Proposition d’un environnement d’évaluation pour la mise en œuvre d’un pilotage par le produit JESA (*Journal Européen des Systèmes Automatisés*) Volume 43, n°4-5, 2009
- (Parlikad et al., 2007) Parlikad, A.K. et McFarlane D.C. RFID-based product information in end-of-life decision making. *Control Engineering Practice*, 15 (11), 1348-1363, 2007.
- (Pinedo, 1995) Pinedo M., ‘Scheduling, theory, algorithms, and systems’. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.
- (Pujo et Kieffer, 2002) Pujo P. et Kieffer J., ‘Fondements du pilotage des systèmes de production’. Lavoisier, 2002.
- (Pujo et Ounnar, 2001) Pujo P. et Ounnar F., ‘Proposition d’un pilotage décentralisé auto-organisé et rapproché pour système automatisé flexible – application à un hub de

- transbordement robotisé fer/fer’. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, volume 35, n° 7-8, pages 905-932, 2001.
- (Quinn et al., 1997) Quinn Roger D., Causey Greg C., Merat Frank L., Sargent David M., Barendt Nick A., Newman Wyatt S., Velasco Virgilio B. Jr., Podgurski A., Jo J.Y., Sterling Leon S. et Kim Y., ‘An agile manufacturing workcell design’. *IIE Transactions*, volume 29, pages 901-909, 1997.
- (Reynolds, 1987) Reynolds C., ‘Flocks, herds, and schools: A distributed behavioural model’. *Computer Graphics*, volume 21(4), pages 25–34, 1987.
- (Sallez et al., 2004) Sallez Y., Trentesaux D., Berger T., et Tahon C., ‘Product-based and resource-based heterarchical approaches for dynamic FMS scheduling’. *Computers & Industrial Engineering*, volume 46, pages 611–623, 2004.
- (Sallez et al., 2009a) Sallez Y., Berger T. et Trentesaux D., ‘A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS’. *Computer In Industry*, volume 60(3), pages 204-216, 2009.
- (Sallez et al., 2009b) Sallez Y., Berger T. et Trentesaux D. Management du cycle de vie d’un produit actif : Concept d’agent d’augmentation. 8ème Congrès international de Génie Industriel, Bagnères De Bigorre, june, ISBN 978-2-7466-0894-8, 2009.
- (Sallez et al., 2010) Sallez Y., Berger T., Deneux D. et Trentesaux D. The Life Cycle of Active and Intelligent Products: The Augmentation Concept. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (apparaître 2010).
- (Sauer, 2008) Sauer, O. Automated engineering of manufacturing execution systems – a contribution to “adaptivity” in manufacturing companies. In: 5th CIRP-sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology, 22-24 October, Nantes, France, 2008.
- (Schreiber, 2007) Schreiber, W. Die Top-Themen der deutschen Automobil-Industrie. In: MANUFUTURE Germany Konferenz: die strategische Forschungsagenda, Deutschland, September, 90–94, 2007.

- (Sharifi et Zhang, 1999) Sharifi H., et Zhang Z., 'A methodology for achieving agility in manufacturing organizations: An introduction'. In the Int. J. Production Economics volume 62, pages 7-22, 1999.
- (Sohier, 1996) Sohier C., 'Pilotage des cellules adaptatives de production : apport des systèmes multi- agents'. thèse de doctorat, ENS Cachan, 1996.
- (Smith, 1980) Smith R.G., 'The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver'. IEEE Transactions on Computer, volume C29, n°12, pages 1104-1113, 1980.
- (Stark, 2006) Stark J., 'Product lifecycle management: 21st century paradigm for product realization'. London, Springer-Verlag, 3rd printing, ISBN: 1-85233-810-5, 2006.
- (Terzi et al., 2008) Terzi S., Ball P.D., Bouras A., Dutta D., Garetti M., Gurumoorthy B., Han S. et Kiritsis D., '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.
- (Theraulaz et Bonabeau, 1999) Theraulaz G. et Bonabeau E., 'A brief history of stigmergy'. Journal of Artificial Life, volume 5(2), pages. 97-116, 1999.
- (Toguyeni, 2004) Toguyeni Abdoul K., 'Reconfigurability analyser for automated production system'. INCOM 2004 , International Conference on Information Control Problems, Salvador-Bahia, Brazil, April 4-7 2004.
- (Trentesaux, 1996) Trentesaux D., 'Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production'. Thèse, à l'institut national polytechnique de Grenoble, 24 Janvier 1996.
- (Trentesaux, 1997) Trentesaux D., Moray N., et Tahon C., 'Integration of the Human Operator into Responsive Discrete Production Management Systems'. 7ème conference international européenne, Bruges, Belgique, mars 1997.

- (Trentesaux et al., 1998) Trentesaux D., Dindeleux R., et Tahon C., 'A MultiCriteria Decision Support System for Dynamic task Allocation in a Distributed Production Activity Control Structure'. *Int. J. of Computer Integrated Manufacturing*, volume 11 (1), pages 3–17, 1998.
- (Trentesaux et al., 2000) Trentesaux D., Pesin P., et Tahon C., 'Distributed artificial intelligence for FMS scheduling, control and design support'. *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 11, pages 573–589, 2000.
- (Trentesaux, 2002) Trentesaux D., 'Pilotage hétérarchique des systèmes de production'. Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 19 décembre 2002.
- (Trentesaux, 2007) Trentesaux, D., 'Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles ?'. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Lavoisier, ISSN 1269-6935, volume 41 (9-10), pages 1165–1202, 2007.
- (Trentesaux, 2009) Trentesaux D., 'Distributed control of production systems'. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. volume 22 (7), pages 971-978, 2009.
- (Ueda, 2001) Ueda K., 'Synthesis and emergence - research overview'. *Artificial Intelligence in Engineering*, volume 15, pages 321- 327, 2001.
- (Ueda et al., 2001) Ueda K., Hatono I., Fujii N., et Vaario J., 'Line-Less production system using self-organization: A case study for BMS'. *Annuals of CIRP*, volume 50 (1), pages 319-322, 2001.
- (Vaario et al., 1998) Vaario J. et Ueda K., 'An emergent modelling method for dynamic scheduling'. *Journal of Intelligent Manufacturing*, pages 129-140, 1998.
- (Van Brussel et al., 1998) Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L. et Peeters L., 'Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA'. *Computers in Industry*, volume 37 (3), pages 255–274, 1998.
- (Wago, 2010) Wago system, innovative connections, <http://www.wago.com>, 2010.

- (Weyns et al., 2006) Weyns D., Boucké N. et Holvoet T., ‘Gradient field-based task assignment in an AGV transportation system’. In Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, pages 842–849, New York, NY, USA. ACM Press, 2006.
- (Weyns et al., 2008) Weyns D., Boucké N. et Holvoet T., ‘A Field-Based Versus a Protocol-Based Approach for Adaptive Task Assignment’. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2008.
- (Wilensky, 1999) Wilensky U., <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL, 1999.
- (Zbib et al. 2008) Zbib N., Raileanu S., Sallez Y., Berger T. et Trentesaux D., ‘From Passive Products to Intelligent Products: The Augmentation Module Concept’. In: 5th CIRP-sponsored, International Conference on Digital Enterprise Technology – DET, France, Nantes, 22-24th, Octobre 2008.
- (Zbib et al., 2009) Zbib N., Sallez Y., et Trentesaux D., ‘Simulation of dynamic allocation and routing in FMS using potential field’. MESM’09, Lebanese American University, Beirut, Lebanon, September 27-29, 2009.
- (Zbib et al., 2010) Zbib N., Pach C., Sallez Y. et Trentesaux D., ‘Heterarchical Production Control in Manufacturing Systems Using the Potential Fields Concept’, Journal of Intelligent Manufacturing, 2010 (acceptée).

ALLOCATION ET ROUTAGE DYNAMIQUE DANS UN FMS BASES SUR LE CONCEPT DE CHAMP DE POTENTIEL

RESUME

Ce mémoire traite de la notion de champ de potentiel et de son application à l'allocation dynamique des tâches et au routage de produits dans des systèmes de production flexibles (FMS). Dans cette approche, les produits ont une liste de services à obtenir au sein du système de production. Les ressources émettent des champs de potentiel correspondant aux différents services offerts. Les produits détectent les champs émis par les ressources et sélectionnent le champ qui répond mieux à leur besoin. Les interactions se font donc entre produits et ressources et non uniquement entre ressources comme c'est généralement le cas dans les approches de pilotage plus classiques.

Après un état de l'art sur les différentes approches d'interaction entre les entités intervenant dans le pilotage des systèmes de production, nous choisissons et détaillons l'approche à base de champs de potentiel. Un modèle formalisant les champs de potentiel est proposé pour le contrôle hétérarchique résolvant simultanément les problématiques d'allocation dynamique des ressources et de routage dynamique des produits en temps réel.

L'approche repose sur l'utilisation d'entités autonomes décisionnelles capables de capter des informations dans leur environnement et de réagir dans celui-ci. Un modèle de produit « actif » embarquant des capacités décisionnelles, basé sur le concept d'augmentation est proposé.

Grâce à la plateforme de simulation multi-agents « NetLogo », le modèle est validé tenant compte de contraintes caractéristiques des systèmes de production (temps de transport non négligeables, capacité des files d'attente des ressources et certaines situations de panne), et en s'inspirant d'un benchmark existant. Ce dernier est utilisé pour effectuer une comparaison entre notre modèle et une étude de référence basée sur l'utilisation du protocole contract-net pour résoudre les problèmes d'allocation des produits entre ressources.

Pour valider ce modèle, une mise en œuvre réelle est présentée sur la cellule flexible AIP-PRIMECA de Valenciennes dans une partie « implémentation ». Dans celle-ci, après une présentation des équipements utilisés, une comparaison des deux approches (champ de potentiel / contract-net) est réalisée en utilisant le même protocole expérimental.

MOTS CLES : pilotage hétérarchique, allocation dynamique, routage dynamique, champ de potentiel, produit actif, FMS.

DYNAMIC ALLOCATION AND ROUTING IN A FMS BASED ON POTENTIAL FIELD CONCEPT

ABSTRACT

This thesis deals with the potential field concept and its application to dynamic task allocation and dynamic routing controls of flexible manufacturing systems (FMS). In this approach, products request services from resources within the manufacturing system. The resources emit potential fields that are correspondent to the different offered services. The products sense the fields emitted by resources and select the field that best satisfies the service request. This potential field approach requires increasing the interaction capabilities of the different entities, not only resources as it is usually the case in more traditional control approaches but also products themselves.

After the state of art of the different approaches of interaction between the entities involved in the control of the manufacturing systems, we choose and explain potential field approach. Next, a potential field model is proposed in the real-time heterarchical control of dynamic resource allocation and dynamic product routing.

This approach is based on the active and decisional entities that are able to receive information in their environment and react in this environment. A model of an "active" product is proposed that embarks the decision-making capacities based on the concept of "augmentation" system.

Using the Platform of multi-agent simulation "NetLogo", the model is validated while taking into consideration constraint characteristics of manufacturing systems (transportation time, capacity of waiting queues of resources and certain failure situations), and inspiring from an existing benchmark. This benchmark is used to make a comparison between our model and another study of reference based on the use of contract-net protocol in order to solve the problems of allocation of products between the resources.

To validate this model, a real implementation is presented with the flexible cell AIP-PRIMECA of Valenciennes. In this part, after the presentation of the used equipments, a comparison between the both approaches (potential field / contract-net) has taken place by using the same experimental protocol.

KEYWORDS: heterarchical control, dynamic allocation, dynamic routing, potential field, active product, FMS.