

Une approche auto-organisationnelle pour la gestion dynamique des flux dans les chaînes de production

Frédéric Armetta , Salima Hassas, Simone Pimont

September 23, 2004

Abstract

Cet article décrit une modélisation d'une chaîne de production selon une perspective de système complexe adaptatif. Nous proposons de permettre à la chaîne de gérer elle-même son comportement, de manière à satisfaire les contraintes imposées par son environnement, tout en atteignant un ensemble d'objectifs prédéfinis. Pour atteindre ce but, nous proposons une approche auto-organisationnelle pour la gestion dynamique des flux dans une chaîne de production.

mots-clefs : auto-organisation, comportement émergent, intelligence en essaim, système complexe adaptatif, gestion dynamique de flux.

1 Introduction

Dans la plupart des systèmes de production industriels, l'essence de la complexité du système se dégage du grand nombre de tâches à réaliser pour fabriquer chaque produit, du grand nombre de produits à réaliser, des multiples flux de produits, etc. De plus, l'évolution du système dépend de la variation de plusieurs facteurs tels que : la quantité et les sortes de produits, les priorités des produits, l'état des ressources (pannes de machines, retards d'opérateurs, etc). Dans cette étude, nous nous intéressons à une modélisation de la chaîne de production selon la perspective de système complexe adaptatif. Nous proposons une approche permettant à la chaîne de production de gérer par elle-même son propre comportement, de manière à satisfaire les contraintes imposées par son environnement, et d'atteindre un ensemble d'objectifs prédéfinis. Pour atteindre ce but, nous adoptons une approche auto-organisationnelle à base d'agents situés.

1.1 Contexte et objectifs de notre étude de cas

Nous considérons une chaîne de production dans le domaine de l'électronique. On peut y dégager les caractéristiques de fabrication suivantes :

- une longue séquence d'opérations (plus de 100) pour chaque produit;
- des flux réentrants : nécessitant l'utilisation à plusieurs reprises de la même ressource par un même produit;
- des technologies très évolutives;
- des ressources coûteuses;
- l'utilisation des mêmes ressources pour les produits en fabrication et pour les produits en développement;
- des pannes de machines fréquentes;
- des exigences commerciales évolutives.

Dans ce contexte, la chaîne de production doit satisfaire les objectifs (souvent contradictoire) suivants :

- maximiser l'utilisation des ressources, et maintenir cette maximisation sur le long terme;
- linéariser les sorties du système de production;
- minimiser le temps de cycle moyen des produits (le temps de cycle correspond à la durée de fabrication);
- rendre prioritaire la fabrication des produits en R&D;
- à long terme, optimiser le chargement du système; un moyen serait d'acquérir des informations, du système lui-même, concernant sa charge souhaitable en produits; ceci correspond à l'établissement d'un profil de charge du système.

1.2 Caractéristiques du système résultant des objectifs

Afin d'atteindre les objectifs ci-dessus, nous proposons d'adopter les lignes directrices suivantes, qui nous serviront comme éléments de mise en oeuvre de notre système.

- Afin de maximiser l'utilisation des ressources, nous proposons d'alimenter chaque ressource par un nombre suffisant de produits en cours de fabrication. Cela donnera de la robustesse au système, et permettra l'absorption des perturbations pouvant intervenir dans le système. Pour atteindre cette alimentation souhaitable, nous suggérons de *planifier les opérations des produits par anticipation*, en prévoyant les futures disponibilités des ressources. Le système agira ainsi grâce à des informations qualitatives sur son activité.
- Afin de linéariser les sorties du système, nous suggérons de contrôler la progression des produits. A cette fin, nous utilisons un *mécanisme de retour d'informations*, fondé sur les exigences en termes d'activité du système et de disponibilités des ressources, afin d'obtenir un flux satisfaisant en sortie.

- Afin de minimiser le temps de cycle de production moyen, nous proposons de maintenir un petit nombre de produits en cours dans le système. Pour ce faire, nous chercherons à planifier les opérations sur les ressources adéquates, dans une *fenêtre de planification prédéfinie*, en s'efforçant d'obtenir un *nombre moyen satisfaisant de produits en cours*.
- Afin d'accorder une priorité à la fabrication des produits en R&D, nous suggérons de rendre le système capable de *contrôler les encours de fabrication*.

Pour satisfaire ces objectifs, la chaîne de production est modélisée comme un système complexe adaptatif, dont l'activité est fondée sur ces directives. Ce système complexe adaptatif est représenté par un système multi-agents situé. Le système de production, ainsi représenté par un système multi-agents situé, a pour objectif de trouver une *organisation spatiale satisfaisant les contraintes de son environnement*, tout en gérant le flux de production.

Cet article est structuré ainsi : dans le paragraphe suivant, nous définissons formellement les objectifs du système; au paragraphe 3 nous citons quelques travaux connexes; l'approche est décrite au paragraphe 4; le paragraphe 5 présente les résultats de nos expérimentations; enfin, le paragraphe 6 termine l'article par quelques conclusions.

2 Définitions des objectifs

Avant de définir formellement les objectifs du système de production, nous précisons les données et les résultats essentiels attendus.

2.1 Les données

- Les produits : le nombre de produits P_i à fabriquer est égal à n , ainsi $i \in [1..n]$. Le nombre de tâches (ou opérations) de chaque P_i est égal à n_i . On désigne par L_i la séquence ordonnée des n_i tâches t_{ij} de P_i : $L_i = (t_{ij})$, avec $j \in [1..n_i]$.
- Les ressources : le nombre de ressources R_k dont on dispose est égal à m , ainsi $k \in [1..m]$. Le nombre de machines (ou capacité) de chaque ressource R_k est égal à c_k . Le nombre de tâches réalisables sur chaque ressource R_k est égal à m_k . On désigne l'ensemble de ces tâches par V_k : $V_k = \{v_{kl}\}$, avec $l \in [1..m_k]$.
- Les tâches : le nombre de tâches T_j réalisables sur l'ensemble des machines de la chaîne de production est égal à q , ainsi $j \in [1..q]$. On désigne par $\tau(T_j)$ la durée de la tâche T_j .
- Les paramètres : un certain nombre de paramètres permettent de contrôler le fonctionnement du système. Citons D , la taille de la fenêtre d'observation, zone où se déroule la planification par anticipation.

2.2 Les résultats

- L'affectation des produits sur les ressources est un ensemble $A = \{S_i\}$ avec $i \in [1..n]$. Pour chaque produit P_i , S_i est une séquence de couples (r_{ij}, d_{ij}) concernant chacun une tâche t_{ij} ; r_{ij} est la ressource à laquelle est affectée t_{ij} , la j^{ieme} tâche du produit P_i ; d_{ij} est la date de son début. Ainsi, $S_i = ((r_{ij}, d_{ij}))$ avec $j \in [1..n_i]$.
- La charge des ressources, qui se déduit des S_i , est un ensemble de valeurs $X = \{C_k\}$, avec $k \in [1..m]$. Pour chaque ressource R_k , la charge correspond à la somme des durées des tâches qui lui sont affectées :

$$\forall i \in [1..n], \forall j \in [1..n_i]/S_i = ((r_{ij}, d_{ij})) \text{ avec } r_{ij} = R_k \quad C_k = \sum_{ij} (d_{ij} + \tau(t_{ij}))$$

2.3 Les objectifs

- *Objectif1*
 La maximisation de l'utilisation des ressources s'exprime par la minimisation des périodes où les ressources sont sans charge de tâches. Nous nommons ces périodes des *videsdeprogrammation*. Ces zones sont répertoriées au sein des fenêtres d'observation, dont on doit considérer la taille. Cet objectif peut alors s'exprimer à partir de $\sum_{k=1}^m C_k$.
- *Objectif2*
 La linéarisation des sorties s'exprime par la minimisation de l'écart type des différences entre les dates de sorties des produits. Considérons le produit P_i et son affectation définie par A . Sa dernière tâche dans la gamme de production est la tâche t_{in_i} . Elle commence à d_{in_i} , et se termine à $d_{in_i} + \tau(t_{in_i})$. Ainsi, les dates de sorties des produits constituent l'ensemble de valeurs

$$\Omega = \{(d_{in_i} + \tau(t_{in_i}))/i \in [1..n]\}$$
- *Objectif3*
 La minimisation des temps de cycle des produits s'exprime par la minimisation de la somme, pour tous les produits, des différences entre les temps de début et de fin. Ainsi l'objectif s'exprime à partir du temps de cycle du produit P_i :

$$\xi_i = (d_{in_i} + \tau(t_{in_i})) - (d_{i1} + \tau(t_{i1})).$$

La description formelle des données du système, de ses sorties et des objectifs à atteindre permet de comprendre comment peuvent s'articuler les caractéristiques du système. Le comportement de ce dernier s'exprime selon une dynamique qui ne peut être complètement décrit analytiquement. D'où notre proposition fondée sur une approche comprtententale et mise en oeuvre par un système multi-agents situé.

3 Travaux connexes

Dans cette section, nous présentons des travaux d'orientation diverses appliqués au problème d'ordonnancement de la production. Ce problème est principalement abordé suivant deux philosophies par les méthodes d'optimisation (3.1) et les méthodes au comportement empiriquement satisfaisant (3.2).

3.1 Approches par optimisation

Les méthodes d'optimisation se sont beaucoup appliquées aux problèmes de type jobshop, reconnus pour leur complexité élevée. Diverses formes d'optimisation ont été développées pour parcourir l'espace des solutions efficacement. Les méthodes de séparation et évaluation progressive sont souvent utilisées conjointement avec les méthodes de propagation de contraintes [3], [12]. L'analyse mathématique permet aussi la résolution des problèmes d'ordonnancement [10]. Les métaheuristiques s'avèrent aussi efficaces pour parcourir l'espace de recherche [1],[22], les combiner permet d'améliorer la résolution [19]. Dans [13], une approche hybride combinant différentes formes d'optimisation permet l'amélioration des performances.

Bien que proposant une solution optimale suivant certains critères, celle-ci n'est pas robuste aux perturbations et ne répond pas à la problématique industrielle. La réalisation d'un ordonnancement optimum n'est pas utile si face à de nombreuses perturbations intervenant en temps réel, il ne peut être réalisé. De nouvelles solutions pour l'optimisation de l'ordonnancement se développent afin de permettre une meilleure intégration de ces perturbations. Le groupe 'Robustesse et Flexibilité' s'intéresse à la génération de plannings sous incertitudes en utilisant des techniques issues de la recherche opérationnelle et de l'intelligence artificielle [5]. Dans [9], on recherche des 'super solutions' permettant l'intégration locale de certaines perturbations. Ces tentatives d'intégration sont délicates et ne sont pour l'instant pas applicables à tous les problèmes de gestion d'ordonnancement.

3.2 Méthodes au comportement empiriquement satisfaisant

La gestion de l'ordonnancement peut se réaliser en temps réel par la définition des priorités des produits en file d'attente (devant les ressources Machine) ainsi que par le choix des parcours réalisés, à chacune de leurs étapes de fabrication. Le protocole de réseau de contrats peut être utilisé pour mettre en compétition les différents produits pour les ressources [21]. Il a été montré que la collaboration entre les différents produits en compétition améliore les performances du système [20]. Dans l'interview 'Agent-based Models and Manufacturing Processes', Parunak et Barto discutent des importantes améliorations réalisées par l'utilisation des interactions entre agents pour gérer la fabrication de composants électroniques pour

AMD. Dans [2], la spécialisation de certaines ressources pour certaines tâches augmente la performance du système. Dans [18], on utilise une modélisation plus cognitive de type Metamorph. Les négociations interviennent alors entre agents de différents types organisés hiérarchiquement ayant des capacités délibératives importantes. Dans [17] on étudie la capacité d'apprentissage de tels systèmes.

Afin d'éviter les congestions dans les systèmes de production, il est important de contrôler la quantité d'en-cours du système [11]. Dans [4], on s'intéresse au maintien d'une quantité d'en-cours idéale sur chaque ressource, ainsi les produits voient varier leur priorité dans les files d'attente en fonction de l'urgence qu'ils représentent pour le système. De même, dans [15], on contrôle une quantité limite de produits d'en-cours à l'entrée et à la sortie des ressources. Ces méthodes permettent de communiquer la capacité d'accueil du système en amont de la production, et facilitent le maintien de bonnes performances de production.

Dans [16], en définissant manuellement les ressources "goulet d'étranglement", un algorithme centralisé dirige les produits afin de diminuer l'impact des congestions. L'augmentation du nombre de ressources goulet reconnues et intégrées pour la résolution permet d'augmenter l'efficacité du processus.

Bien que le contrôle du niveau d'en-cours sur chaque ressource permet un certain contrôle par anticipation de l'évolution du système, les méthodes présentées intègrent peu l'évolution des flux de production dans le système (logique MRP2 en milieu industriel [14]). Nous pensons cependant que nous pouvons profiter avec une approche multi-agents d'une anticipation réalisée au niveau micro (représentation des Tâches à réaliser sur le planning). Cette modélisation permettant une anticipation des congestions et aussi une représentation implicite décentralisée de l'état du système. Il devient alors inutile de signaler au système quelles sont les ressources congestionnées car il en a lui-même connaissance. Dans [7], on nous propose un planning par anticipation 'floue' évoluant au cours des différentes perturbations. Cette prévision matérialise des informations utiles à la prise de décision pour le système.

4 L'approche : le paradigme multi-agent décliné pour gérer le flux de production

De part ses propriétés intrinsèques (plusieurs sortes de perturbations, interactions multiples, etc), une chaîne de production présente les caractéristiques d'un système complexe, évoluant dans un environnement incertain. Le paradigme multi-agents possède des propriétés intéressantes pour représenter un tel système.

4.1 Cadre de mise en oeuvre de l'approche

L'approche que nous proposons s'inscrit dans le cadre de développement de systèmes auto-organisés proposé par [8]. Ce cadre stipule que l'autoorganisation du système est obtenu par un couplage entre l'organisation sociale et l'organisation spatiale des agents. Ce couplage s'appuie sur les éléments suivants:

- une représentation spatiale de l'environnement physique du système. Cet environnement est un réseau complexe dynamique de ressources. Les ressources correspondent aux machines exécutant les tâches et les interconnexions représentent les flux des tâches à travers les ressources au cours de leurs réalisations.
- intelligence comportementale incarnée: le système est matérialisé structurellement par des agents situés spatialement et incarnés dans l'environnement. Pour notre problématique, nous modélisons les tâches des produits comme étant les agents et nous modélisons l'environnement comme étant l'ensemble des espaces de programmation des ressources. Ces agents 'tâche' auront ainsi comme seul comportement de se placer le plus tôt possible sur l'environnement¹. L'environnement correspond en fait à une zone d'anticipation de l'ordonnancement qui est progressivement réalisée par les ressources au cours du temps.
- La stigmergie: est un concept qui a été mis en évidence par le biologiste Grassé en étudiant les insectes sociaux[6]. La stigmergie correspond à un mode de coordination distribué et indirect par modification de l'environnement. Elle s'appuie sur la prise en compte des effets persistants dans l'environnement des actions passées sur les actions futures. Pour notre problématique, les agents 'tâche' en compétition se placent sur l'environnement. L'ensemble de ces placements constituent la structure de l'environnement. Les agents placés forment différents motifs locaux de différentes topologies. Les caractéristiques spatiales des motifs ainsi formés influencent le comportement des agents cherchant à améliorer leur situation. Ainsi, il se produit un phénomène de rétro-action par l'évolution de la structure entre le comportement passé des agents et leur comportement futur.
- la corrélation des comportements des agents via l'équilibrage entre l'exploration et l'exploitation. L'exploration est un mécanisme permettant la diversification de la recherche de solutions. L'exploitation quant à elle, permet le renforcement des pistes jugées intéressantes pour aboutir à une solution. Dans notre approche cet équilibre est entretenu entre un comportement opportuniste des agents lors de la sélection des ressources et un renforcement de leur placement sur les ressources, quand leur positions sont utiles pour le système.

Partant de ce cadre nous avons mis en place deux modèles (modèle simple, modèle enrichi) pour aborder notre problématique.

¹les agents se placent le plus tôt dans le planning d'une des ressources

4.2 Modèle de Combat Simple

La dynamique du système dans notre approche est mise en oeuvre via deux mécanismes:

- La métaphore proies-prédateurs

Afin de trouver une place, ou pour améliorer son placement, un agent ‘tâche’ visite aléatoirement les ressources qui peuvent réaliser l’opération correspondante. Une fois au niveau de la ressource, utilisant sa vision locale de l’environnement machine, l’agent sélectionne un emplacement sur la ressource. L’agent est ensuite mit en compétition avec les agents gênants placés sur la ressource. Afin de maximiser l’utilisation des machines, nous devons minimiser les espaces de temps pendant lesquels les machines ne sont pas utilisées. Nous avons donc développé un mécanisme simple de combat entre les agents en concurrence permettant de repousser les espaces de programmation non utilisés présents sur la structure des ressources vers des espaces de programmation plus éloignés dans le temps. L’ensemble des agents combat ainsi les espaces vides qui correspondent à une perte de productivité pour la chaîne de production. Nous utilisons la métaphore proies-prédateurs pour caractériser le déroulement des combats.

- La négociation spatiale

Nous pouvons voir sur la Figure 1 comment se déroule la négociation spatiale au niveau d’une ressource. Sur la partie gauche du schéma est représentée la structure d’une ressource constituée d’agents ‘tâche’ placés et d’espaces vides. L’agent attaquant (ou prédateur) constitue différents groupes formés d’agents placés (ou proies) et d’espaces inutilisés lui permettant de s’insérer. Ensuite, le prédateur sélectionne aléatoirement un jeu de proies parmi ceux qu’il a constitué.

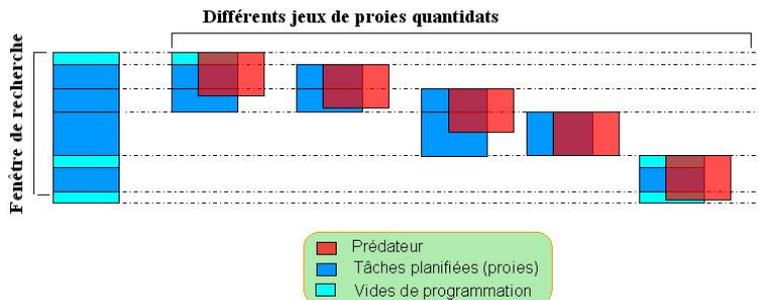


Figure 1: Mécanisme de combat des agents tâches

Une fois que le groupe de proies est sélectionné, si le premier élément de ce groupe est un vide alors le prédateur remporte le combat. Ce mode de fonctionnement permet de repousser efficacement les espaces vides présents sur les planning de machines. En effet, à chaque fois qu’un prédateur remporte un combat,

un espace vide est repoussé vers une zone de planification plus éloignée. De part le grand nombre des combats réalisés, les vides qui affaiblissent les environnements ne restent pas, ce qui permet de maximiser l'utilisation des machines.

Ces deux mécanismes mis en oeuvre sans prise en compte d'informations stigmergique ont permis de définir un premier modèle de combat, pour les agents leur permettant de se placer via une négociation spatiale selon la métaphore proie-prédateurs. Ce modèle combine un certain opportunisme dans la sélection aléatoire des ressources et des proies (exploration) et un certain renforcement (exploitation) assuré par l'éjection des tâches affaiblissant l'environnement (tâches mal placées).

4.3 Enrichissement du modèle de combat: utilisation d'informations stigmergiques

Afin d'affiner le mécanisme de placement lors des combats entre agents, nous souhaitons intégrer des informations supplémentaires permettant de révéler l'importance des différents acteurs en concurrence. D'une part, les agents déjà placés pourront profiter d'informations 'de soutien' révélant l'importance des placements qu'ils représentent pour le système. D'autre part, les agents recherchant un placement (stockés dans divers plannings fictifs 'd'attente') pourront eux bénéficier d'informations sur l'importance qu'ils ont à être fabriqués en priorité, et donc sur la nécessité qu'ils ont à se placer rapidement. Ainsi, nous souhaitons stabiliser la structure générée en maximisant l'utilisant des machines, mais aussi en étant à l'écoute de la capacité d'accueil du système sur un horizon étendu.

Sur la Figure 2, nous voyons donc ces deux types d'informations générées à partir de l'espace d'anticipation. Ces informations remontent progressivement le planning afin d'informer les agents, et donc permettent d'orienter les différents combats du système.

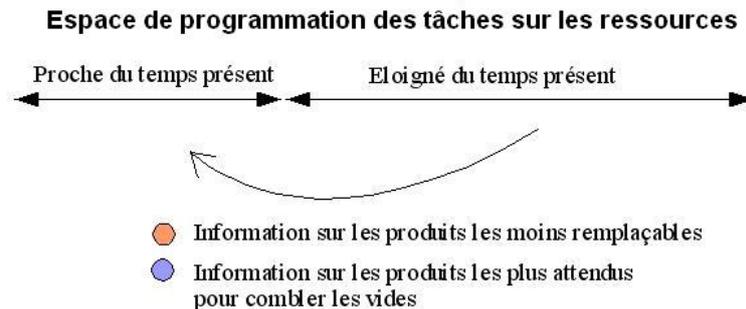


Figure 2: Principe de transmission des informations

4.3.1 Renforcement des tâches pouvant occuper des vides

Une congestion apparaît lorsque se forme sur une ressource une file d'attente importante, la ressource n'a alors pas un débit de production suffisant pour alimenter les ressources situées en aval. Au niveau de la ressource saturée, il faut effectuer des choix de priorité, permettre à certains produits de se placer sur le planning de la ressource pour être réalisés rapidement et en laisser d'autres en attente. Le mécanisme décrit permet aux ressources en attente de produits d'informer ces produits de leur importance pour le système.

Sur la figure 3, nous voyons le processus de génération de cette information sur une ressource possédant des espaces de programmation non-utilisés. L'information est générée à partir d'un espace non-utilisé dans le planning d'une ressource. Sur cette ressource, on fabrique certains produits à différentes étapes de leur fabrication. Une information est tout d'abord caractérisée par un type de produit à une de ses étapes de fabrication sur la ressource. C'est cette combinaison produit-étape qui définit le parcours que va effectuer cette information dans le système. On calcule localement l'importance de l'information transmise. On pourra par exemple se baser sur la taille du vide générateur pour calculer cette importance. En effet, plus un vide est de taille importante, plus il semble important d'attirer des produits sur l'emplacement du vide afin de dissoudre les congestions se formant dans le système. Progressivement, l'information parcourt à rebours les étapes du type de produit recherché (une étape est associée à une ressource). A chaque étape du parcours, si on trouve une tâche appropriée², l'information lui est transmise et le parcours prend fin. On remarque que cette information pourrait se déplacer jusqu'à l'étape 0 du produit, et donc représenter un profil de charge souhaitable pour le système. Ces informations pourraient donc aussi être considérées pour prendre les décisions d'insertion de nouveaux produits à fabriquer dans le système.

Le mécanisme de recrutement des produits utiles favorise l'insertion des produits non-placés.

Afin de permettre aux produits déjà placés sur les environnements de maintenir leur position, ceux-ci bénéficient d'un type d'information correspondant à leur utilité pour le système (Figure 4). Cette information est générée par chacun des agents tâche placés dans l'environnement. Afin de se maintenir, un agent doit aussi permettre le maintien des agents correspondant aux tâches précédentes du produit qu'il représente (un agent tâche ne peut être placé que si la date de fin de fabrication de l'étape précédente existe). L'importance de l'information pourra par exemple être calculée localement à partir de l'indice d'attaque de l'agent placé. En effet, un agent tâche étant rarement attaqué est utile pour le système car n'est pas remplaçable facilement, il est donc important de lui permettre de maintenir sa po-

²une tâche est appropriée si elle ne parvient pas à se placer et correspond au type de produit de l'information ainsi qu'à son étape moins le nombre de remonté(s) effectuée(s)

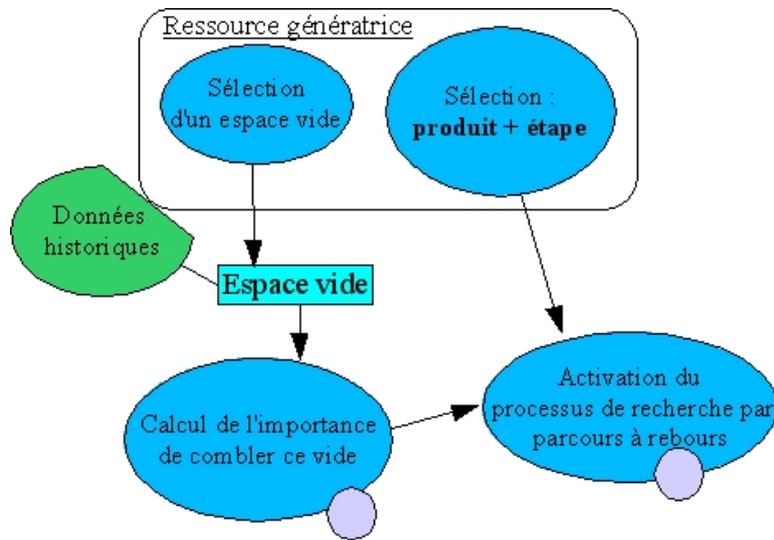


Figure 3: Recrutement des produits utiles

sition. Une fois calculée, l'information est transmise à rebours des différents agents tâche correspondant au produit de l'agent à l'origine de l'information.

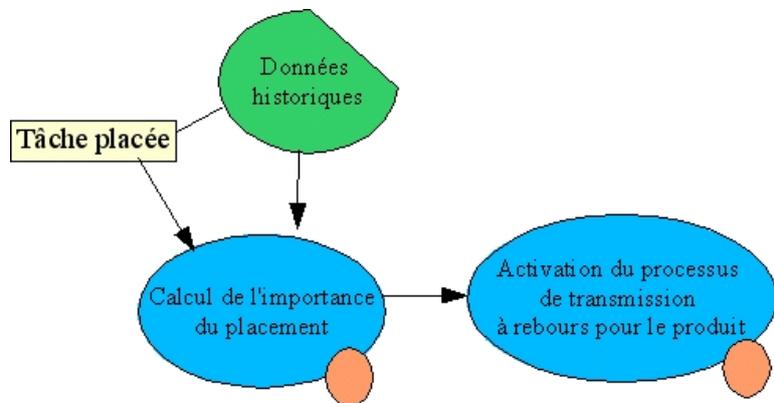


Figure 4: Maintien des produits utiles

Ainsi, on récupère au sein d'une ressource des informations en qualité, mais aussi en quantité. Les informations recueillies suivent un processus d'évaporation afin de les maintenir significatives face à un système évoluant perpétuellement. Le mécanisme de combat doit ensuite être enrichi afin d'utiliser efficacement cette somme d'informations générée par le système, tout en permettant une stabilisation de celui-ci.

5 Expérimentation et résultats

5.1 Le premier modèle de combat

Dans cette section nous présentons les premiers résultats obtenus lors de la mise en oeuvre du processus simple de négociation spatiale.

En 5.1.1, nous avons étudié l'évolution de la quantité d'espace non utilisée sur l'ordonnancement généré. En 5.1.2, nous avons étudié les choix réalisés par le système face à des situations propices à l'apparition de goulet d'étranglement. En 5.1.3, nous discutons de la manière dont le système progresse dans la génération d'ordonnancement et voyons ses limites.

5.1.1 Ejection des vides de programmation

- Expérimentations

Nous avons soumis notre système à diverses situations de production afin d'étudier l'évolution des espaces de programmation au cours du processus de résolution engendré par le système. Pour chaque simulation, différentes machines ont été configurées pour la fabrication de différents produits. Pour ce premier modèle simplifié, nous simplifions la problématique en autorisant une quantité d'en-cours conséquente dans le système.

- Résultats

Lorsqu'un combat est remporté, nous assistons à deux sortes de modifications de l'environnement. D'une part, on observe des modifications de placement sur l'environnement (un agent se place, des agents sont éjectés), mais on observe aussi le déplacement de l'espace de programmation vide à l'origine de la victoire de l'agent prédateur. Cet espace de programmation se déplace en effet de la position de début de groupe attaqué à la position de successeur du prédateur vainqueur, ce qui correspond à un déplacement vers l'extérieur de l'environnement 'proche de l'exécution réelle', d'où un bénéfice local pour l'ordonnancement généré. Sur les différents cas simulés, nous avons constaté que l'ensemble des combats gagnants réalisés au cours du temps mènent à l'éjection progressive des espaces de programmation vers l'extérieur de l'environnement.

- Mécanisme de contrôle

Nous avons étudié l'évolution de la solution générée. Nous constatons que le système se stabilise progressivement par strates depuis les espaces de programmation proches de l'exécution réelle, vers des espaces de programmation plus éloignés. En effet, une activité 'en amont' dans l'ordonnancement par anticipation affecte l'ordonnancement 'en aval'. A chaque fois que l'environnement bouge, au moins un des agents est éjecté. Cette éjection a des répercussions sur l'activité du système vers des zones de placement plus lointaines ³. Sur chacune des strates de la fenêtre

³Un agent ne peut maintenir sa position sur l'environnement que s'il connaît la date

d'observation, le système parcourt une partie de l'espace de recherche local. La stabilisation sur une strate de la fenêtre d'observation est validée par un mécanisme de contrôle. Ce mécanisme est induit par l'éco-résolution qui fournit à chacun des agents la possibilité d'améliorer sa position s'il en a l'occasion (en se plaçant plus tôt dans la programmation). Ce mécanisme de contrôle permet d'éviter des solutions de mauvaise qualité. Ainsi, ce mécanisme qui intervient en temps réel à chacun des niveaux de l'environnement prévient de la stabilisation vers une solution de mauvaise qualité.

- **Intégration des perturbations**

Nous avons aussi souhaité étudier le comportement de notre système face à des perturbations intervenant en temps réel. Nous matérialisons ainsi la perturbation 'panne machine' par l'éjection forcée de chacun des agents Tâches présents sur la machine concernée (sur sa zone de programmation non encore réalisée), la machine devient ensuite indisponible pour accueillir de nouveaux agents Tâche. Nous avons constaté qu'à chaque perturbation réalisée, le système modifie sa configuration et se stabilise sur une solution adaptée à la quantité de ressources disponibles.

5.1.2 Equilibrage des flux

- **Expérimentation**

Nous avons étudié les choix réalisés par le système pour diriger les produits au cours de leur fabrication. Les choix du système ont pour but d'équilibrer la charge sur les différentes ressources, d'éviter qu'il ne se forme de goulets d'étranglements qui nuisent à la productivité du système. Un goulet d'étranglement se forme sur une machine lorsque sa capacité de production est inférieure à la charge qu'on lui impose, situation qui entraîne l'apparition d'espaces de programmation non-utilisés en aval dans la chaîne de production.

Ainsi, nous voyons sur la Figure 5 que le produit P1 peut réaliser ses différentes étapes de fabrication sur M0 ou sur M5. Par contre, P0 ne peut réaliser certaines de ses étapes de fabrication que sur M0. Le système doit ainsi diriger les produits P1 sur M0 ou M5 pour chacune de leurs étapes de fabrication.

- **Résultats**

Sur la Figure 5, nous voyons que lorsque le système ne comporte que des produits de type P1, les agents Tâche se placent équitablement sur M0 et M5. En effet à chaque fois qu'un agent cherche à se placer, il sélectionne aléatoirement une machine parmi les machines qui peuvent le satisfaire, ceci implique qu'en moyenne nous obtenons la moitié des tâches placées sur M0 et l'autre moitié sur M5. Nous avons constaté que plus nous

de fin d'exécution de la tâche qui le précède (tâche du produit auquel il est associé). De ce fait, lorsqu'un agent est éjecté, tous ces successeurs le sont aussi.

insérons de produits P0 dans le système, plus les agents Tâche relatifs aux différents produits P1 se fixent sur la machine M0.

- Spécialisation

On constate la spécialisation de la machine M0 pour les produits P0 (pour une situation donnée). Celle-ci permet le déchargement de la machine M0, l'équilibrage des flux de produits P0 et P1 sur M0 et M5. La bonne gestion de ces flux permet une productivité accrue du système de production. Ainsi, les produits de type P0 sont fabriqués sur la machine M0, les produits P1 sont réalisés plutôt sur M5.

- Mécanisme de contrôle

Nous avons étudié le processus menant à la stabilisation naturelle du système vers un équilibre des flux de production. Le système réalise progressivement un ordonnancement par anticipation, les différents agents se placent sur l'environnement. Suivant ce mode de construction, les agents relatifs au produit P1 devraient se placer équitablement sur les machines M0 et M5, ce qui mènerait à un mauvais équilibre des flux, ce que nous n'avons pas constaté. L'orientation de la solution générée intervient en fait par un mécanisme de contrôle en cours de résolution. Ce mécanisme de contrôle agit à deux niveaux. D'une part, suivant le principe d'éco-résolution, les agents cherchent à maximiser leur position, c-à-d à se placer le plus tôt possible sur l'environnement. Ainsi, s'ils ont le choix, les agents Tâche se placent sur la machine la moins chargée qui leur fournit un placement avantageux. D'autre part, on peut considérer le niveau d'activité d'une ressource comme participant à ce processus de contrôle. Un agent placé sur une ressource de forte activité (comme une ressource goulet d'étranglement), a de fortes chances d'être éjecté de part l'instabilité de l'environnement sur la ressource. Ainsi, la machine M0 étant plus agressée que la machine M5, l'adhérence y est moins importante pour les agents, de ce fait, les produits P1 adhèrent plus facilement sur M5.

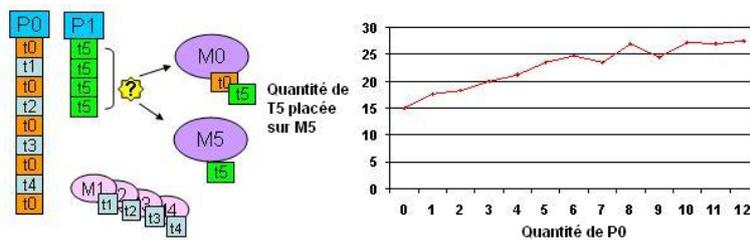


Figure 5: Equilibre des flux de production

5.1.3 Limites du modèle

Nous avons constaté par cette première implémentation de notre modèle un mécanisme d'exploration de l'espace de recherche et un mécanisme de contrôle qui valide une stabilisation de la solution. Sur les cas étudiés, ce mécanisme de contrôle est bénéfique à la répartition correcte des flux de produits dans le système et permet la maximisation de l'utilisation des ressources. Le système met à profit l'ensemble des informations dont il dispose (ressources surchargées, zones de programmation inoccupées, etc.), pour accorder la stabilisation vers une solution cohérente.

Malgré ses bonnes caractéristiques, nous avons relevé quelques dysfonctionnements relatifs à la simplicité des informations mises à la disposition du système.

Tout d'abord, le mécanisme permettant de repousser les espaces vides sur l'extérieur de l'environnement semble manquer de cohérence sur l'ensemble de l'environnement. Sur une strate donnée de la fenêtre d'observation de l'environnement, les agents coopèrent pour fournir une solution de qualité (ordonnancement 'tassé'). Cependant, les comportements sociaux ne peuvent pour l'instant pas s'appliquer entre les différentes strates de l'environnement. Pour la problématique des flux réentrants où le nombre de tâches à réaliser par produit est important, il est essentiel d'anticiper l'évolution des flux de production afin de permettre aux produits de circuler avec fluidité dans le système. Ainsi, une collaboration plus forte entre les différents agents visant des strates différents semble naturellement souhaitable.

Par ailleurs, nous avons noté un opportunisme de placement. Certaines solutions accidentelles permettent une stabilité précoce du système par manque d'activité. En effet, l'activité naturelle du système provient d'une part de la volonté pour les agents d'améliorer leur position, d'autre part des espaces de programmation vides qui destabilisent l'environnement. Dans certains cas, un agent mal placé se fixe sur un environnement qui le satisfait alors que c'est inapproprié pour le système. Ensuite, il arrive que le blocage soit atteint si l'agent ne peut être éjecté par manque d'activité (environnement local stabilisé : pas d'espace vide).

L'architecture du modèle décrit permet donc une activité sociale de résolution. Cependant, étant donné la complexité des problèmes abordés, il est utile d'enrichir le modèle pour que le système puisse profiter efficacement de sa propre capacité d'anticipation. Nous diminuerons ainsi la myopie des décisions en prévoyant l'évolution des flux de produits dans le système, augmentant la capacité d'exploration et affinant le mécanisme de contrôle. En diminuant la myopie des décisions, nous éviterons aussi les situations de blocage opportuniste du système, nous pourrions intégrer au processus de calcul de l'issue des combats une forme d'information de justification plus globale.

5.2 Le modèle enrichi

- Les informations véhiculées

L'enrichissement du modèle vise à améliorer les performances. Le système considère désormais l'utilité des agents placés lors de la mise en concurrence des agents par les combats.

- Répartition des flux entre deux produits concurrents sur une ressource

Pour cette première simulation, nous avons souhaité étudier la répartition de deux flux de produits dans le système en fonction de sa capacité d'accueil. La configuration physique accueille deux flux de produits (Figure 6 :Flux P1 et P2) suivant des capacités de progression différentes. A l'écoute de la capacité d'accueil, le système doit affecter les flux de produits sur les ressources correctement. Sur la Figure 6, nous voyons que les ateliers ont des capacités de production variables relatives au nombre de machines qu'ils comportent. L'atelier 3 a une capacité de 1, alors que les autres ateliers du système ont une capacité de 3. Le flux de produits correspondant à P2 connaît donc une capacité de production de 3 pour son étape 1 et seulement de 1 pour son étape 2. Il apparaît ainsi logique que le flux de produit 1 (Flux P1) se déplace plus vite dans le système que le flux de produit 2. En situation réelle, ce genre de goulet d'étranglement apparaît de manière imprévisible dans le système suite à diverses perturbations (panne d'une machine, etc.). Il convient alors de réorganiser les flux afin de maintenir de bonnes performances pour le système. Nous constatons que le planning réalisé en utilisant le modèle enrichi est bien meilleur que celui réalisé avec le modèle simplifié (+ 11,5 % de tâches placées). En considérant l'utilité pour le système des placements réalisés par les produits, le système permet la convergence vers une solution de qualité, une répartition correcte des flux de produits.

- Influence du nombre d'étapes de fabrication des produits

Avec des approches de type 'contract net', on peut très bien mettre en place des règles permettant de réaliser en priorité sur les ateliers les produits n'étant pas bloqués à leur étape suivante de fabrication. Ce genre d'approche pourrait donc très facilement répondre au cas précédent de la Figure 6. Notre modèle ne prévoit cependant pas de frontière de temps à la quantité d'informations assimilée. Ainsi, comme nous allons le voir, le périmètre des informations intégrées pour la résolution s'étend naturellement à plusieurs étapes de fabrication. Pour cette simulation, le produit P2 est donc ralenti à sa troisième étape de fabrication (et non à sa deuxième comme précédemment).

Sur la partie gauche de la Figure 7 ⁴, nous pouvons voir la planification réalisée par notre système en utilisant le premier mécanisme de combat 'simple'. Nous avons pu constater que certains produits P1 ne parviennent pas à se planifier au niveau de leur étape 2 alors qu'ils peuvent être accueillis sur l'atelier 1

⁴Les différentes tâches placées sur la Figure 7 ne participent pas au calcul des différents indices car leur prise en compte ne révèle pas la cohérence du placement obtenu

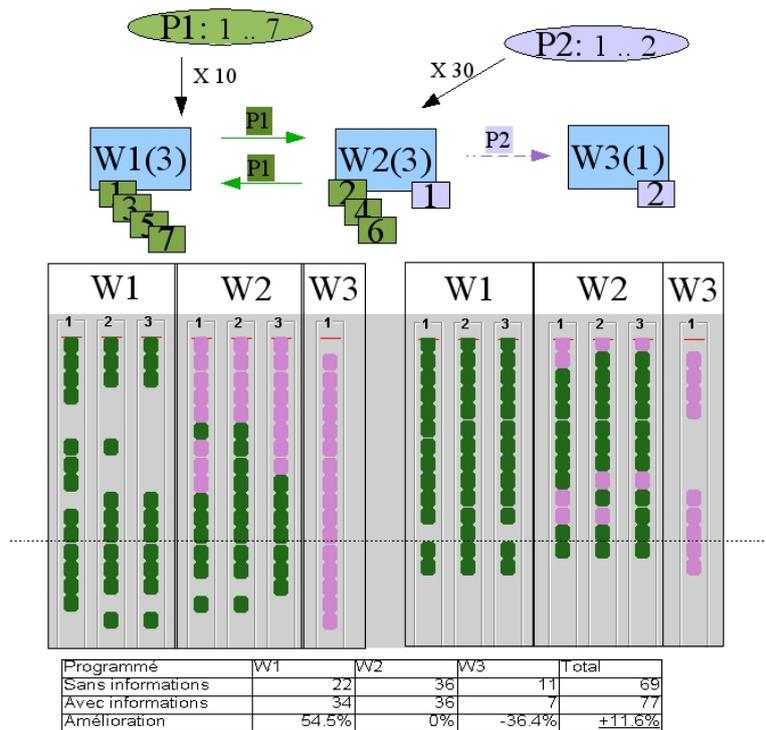


Figure 6: Répartition [sans/avec] informations : éloignement de niveau 1

pour leur étape 3. A l'inverse, certains produits P2 sont planifiés sur l'atelier 2 pour leur étape 1 alors qu'ils sont bloqués à leur étape 2 car le système ne peut les accueillir. Ces produits P2 sont moins urgents mais l'opportunité résultant du mécanisme de combat 'simple' leur permet de maintenir leur position. Nous voyons sur la partie droite de la figure que la considération de la nouvelle source d'informations permet un équilibre approprié des flux de produits. En effet, en utilisant ces informations, tous les produits P1 parviennent à se planifier, car leur utilité a été exploité par le système.

- Influence du nombre de ressources communes aux produits

Pour finir, nous avons souhaité augmenter la difficulté du problème afin d'avoir une idée de la capacité d'exploration de l'espace des solutions par le système (Figure 8). En effet, pour cette simulation, le produit P1 effectue aussi certaines de ces tâches sur l'atelier 4. Il est ainsi mis en concurrence avec le produit P0 au niveau des ateliers 2 et 4. Sur la partie gauche de la Figure 8, nous voyons le résultat obtenu en utilisant le mécanisme de combat 'simple'. Par opportunité, toutes les tâches des 10 produits P1 insérés dans le système parviennent à se placer sur l'atelier 1 ($10 * 4$ étapes = 40). Cependant, ces placements ne

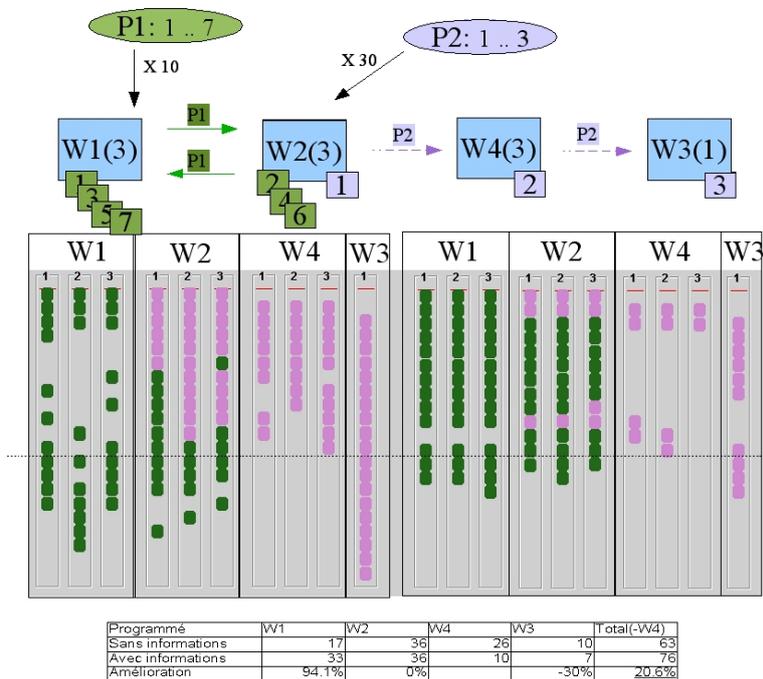


Figure 7: Répartition [sans/avec] informations : éloignement de niveau 2

sont pas satisfaisants car sur l'atelier 1, de nombreux espaces restent inutilisés. Les produits P1 se placent trop tard sur l'atelier 2. Les places étant une fois de plus occupées par des produits P2 bloqués à leur étape 3, et donc moins urgents. Sur la partie droite de la figure, nous voyons qu'en considérant pour la résolution l'intérêt des différents placements pour le système, la solution est de nouveau sensiblement améliorée.

- Activité des agents et convergence du système

La source d'information utilisée met en relation les différentes strates de l'environnement. Les décisions en amont dans l'environnement sont prises en fonction des situations aval associées. Le mécanisme de contrôle est enrichi, il correspond désormais aussi au retour d'information sur les tentatives d'exploration. Si une exploration a échoué pour un produit (les tâches du produit n'ont pas réussi à se placer), les différents agents impliqués dans l'exploration risquent d'être éjectés de l'environnement. Les agents utiles au système sont eux récompensés par un renforcement de leur position.

Ce mécanisme de contrôle permet la validation de l'exploration sur toutes les strates du système. Différentes tentatives d'exploration se combinent, la situation se stabilise lorsque les agents ont trouvé un emplacement qui leur est approprié.

Lors des simulations réalisées, le temps de stabilisation s'est avéré

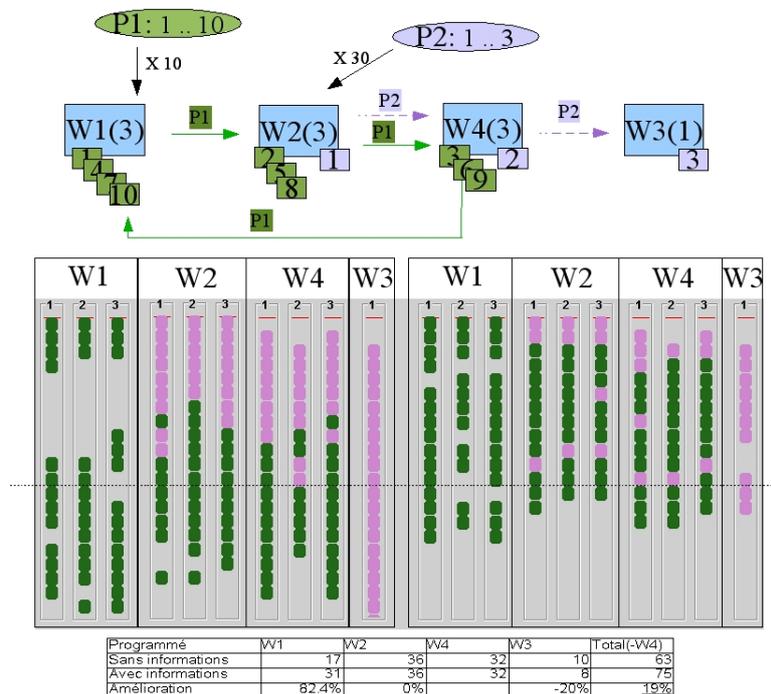


Figure 8: Répartition [sans/avec] informations : éloignement de niveau 2 + difficultés

plus important dans le cas du modèle enrichi. Bien que nous n’ayons pas rencontré, nous n’excluons pas le risque de bouclage dans la recherche de solution. L’activité est une caractéristique essentielle de notre système. Trop faible, elle n’a pas permis une exploration pertinente (Modèle simplifié). Trop importante, elle pourrait empêcher toute convergence vers une solution de qualité.

6 Conclusions

Nous avons présenté dans ce papier un travail en cours portant sur la gestion dynamique de flux dans une chaîne de production, à travers les mécanismes de stigmergie et d’auto-organisation. Notre approche se base sur l’utilisation du paradigme multi-agents situé, exploitant dans sa dynamique un processus de combat selon la métaphore ”Proie-Prédateur”. Nous avons d’abord proposé un modèle de combat simple, qui a permis de mettre en oeuvre un ordonnancement dynamique d’un ensemble de tâches sur un ensemble de machines ressources, en vue d’éviter les congestions dans le système et de fluidifier les flux des tâches au cours de leur réalisations. Nous avons aussi observé à partir de simulations, la robustesse du système face aux perturbations émanant de son environnement incertain et dynamique. Dans une seconde étape,

nous avons proposé, un enrichissement du modèle initial, intégrant la prise en compte d'informations rétroactives, émanant du système lui-même. Ce mécanisme est un premier niveau de mise en oeuvre de la stigmergie dans notre approche. Ce mécanisme de coordination distribuée entre agents, permet de contrebalancer le caractère opportuniste du modèle initial et introduit un mécanisme de renforcement des solutions potentiellement intéressantes pour l'évolution du système. Nous avons présenté quelques expérimentations et résultats permettant d'illustrer l'intérêt de notre approche. Les premiers résultats obtenus nous encouragent à poursuivre les travaux que nous avons entrepris et nous nous intéressons actuellement à approfondir nos modèles, notamment concernant l'étude de la relation entre l'organisation spatiale des agents et leur organisation sociale, ainsi que leur co-volution rétroactive, menant à l'auto-organisation du système. Une étude intéressante à mener concerne la topologie du réseau de ressources et de leurs interconnexions à travers les flux des tâches. Cette étude permettra de faire émerger de la dynamique non linéaire du système, des patterns au niveau des flux, correspondant des états attracteurs vers lequel s'orientera le système au cours de sa dynamique, s'il est capable de s'auto-organiser.

References

- [1] M. Ventresca B. Ombuki. Local search genetic algorithms for the job shop scheduling problem, November 2002.
- [2] Bonabeau E Theraulaz G & Deneubourg Campos, M. Dynamic scheduling and division of labor in social insects. *Adaptive Behaviour*, 8:83–95, 2001.
- [3] Yves Caseau and Francois Laburthe. Improving branch and bound for jobshop scheduling with constraint propagation. In *Combinatorics and Computer Science*, pages 129–149, 1995.
- [4] Yun-Min Feng Chih-Hung Tsai and Rong-Kwei Li. A hybrid dispatching rules in wafer fabrication factories. *International journal of the computer, the internet and management*, January 2003.
- [5] E. Sanlaville et Al. Flexibilité et robustesse en ordonnancement, article du groupe flexibilité. *ROADEF*, 2002.
- [6] P.-P. Grassé. La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes sp.* La théorie de la Stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des Termites Constructeurs. *Insectes sociaux*, 6:41–80, 1959. In French.
- [7] John A. Sauter H. Van Dyke Parunak. Ants in the supply chain, Mai 1999.
- [8] S. Hassas. *Systèmes Complexes à base de Multi-Agents Situés*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Claude Bernard-Lyon 1, 2003. In French.

- [9] E. Hebrard, B. Hnich, and T. Walsh. Super solutions in constraint programming. In *Proceedings CPAIOR'04*, Nice, France, 2004.
- [10] X.. Zhao J. Wang, P. B. Luh and J. Wang. *An Optimization-based Algorithm for Job Shop Scheduling*, volume 22, chapter 2, pages 241–256. 1997.
- [11] C.G. Panayiotou and C.G. Cassandras. Optimization of kanban-based manufacturing systems. *Automatica*, 35:1521–1533, 1999.
- [12] François Roubellat & Al. Pierre Lopez. *Ordonnancement de la production*. Hermes, 2001.
- [13] Dardilhac D. et Dezalay D. Portmann M-C., Vignier A. Branch and bound crossed with ga to solve hybrid flowshop. *European Journal of Operational Research*, 107:389–400, 1998.
- [14] Stéphanie Biteau Raymond Biteau. *La maîtrise des flux industriels*. Editions d'Organisation, 2001.
- [15] K. Schild S. Bussmann. An agent-based approach to the control of flexible production systems. In *Proc. of the 8th IEEE Int. Conf. on Emergent Technologies and Factory Automation (ETFA 2001)*, 2001.
- [16] Subhash C. Sarin and Sameer T. Shikalgar. Reduction of average cycle time at a wafer fabrication facility, 2001.
- [17] Weiming Shen, Francisco Maturana, and Douglas H. Norrie. Learning in agent-based manufacturing systems. In *Proceedings of AI & Manufacturing Research Planning Workshop*, pages 177–183. The AAAI Press, 1998.
- [18] Weiming Shen and Douglas H. Norrie. Combining mediation and bidding mechanisms for agent-based manufacturing scheduling. In Katia P. Sycara and Michael Wooldridge, editors, *Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomous Agents (Agents'98)*, pages 469–470, New York, 9–13, 1998. ACM Press.
- [19] V. T'Kindt, N. Monmarche, D. Laugt, and F. Tercinet. Combining ants colony optimization and simulated annealing to solve a 2-machine flowshop bicriteria scheduling problem. In *13th European Chapter on Combinatorial Optimization (ECCO XIII)*, pages 129–130, Mai 2000.
- [20] John M. Usher and Yi-Chi Wang. Negotiation between intelligent agents for manufacturing control, 2000.
- [21] Yi-Chi Wang and John M.Usher. An agent-based approach for flexible routing in dynamic job shop scheduling. In *11th Industrial Engineering Research*, 2002.
- [22] Xiaokun Zhang Yuefei Xu, Robert W. Brennan and Douglas H. Norrie. A genetic algorithm-based approach to holon virtual clustering. In *in Proceedings of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2000)*, pages 380–385, 2000.