

ARCHITECTURE DE SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT POUR UN ENVIRONNEMENT EN JUSTE A TEMPS

A. THOMAS, T. KLEIN, H. EL HAOUZI, S. BELMOKHTAR

Centre de Recherche en Automatique de Nancy
Université Henri Poincaré, Nancy 1
BP 239,
54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex
prenom.nom@cran.uhp-nancy.fr

RESUME : *Apparu dans les années 80, le juste à temps (JiT) a permis plus de flexibilité et de réactivité, tout en conduisant à une meilleure maîtrise des stocks d'en-cours. L'application de cette philosophie donne des possibilités de prise de décision autonomes à l'atelier. Cette liberté d'action est donnée en général aux opérateurs. Le principe de Système Contrôlé par le Produit, issu du paradigme holonique, est encore émergent et vise à donner aux produits des capacités d'information, voire de prise de décision. Nous montrons dans ce papier que son application dans le contexte particulier d'entreprises gérées en JiT est pertinente à des fins d'aide à la décision ou d'automatisation des actions des opérateurs. Une architecture de pilotage est proposée comprenant un système de contrôle, un émulateur, une base de données et des interfaces adaptées. Deux applications industrielles sont aussi présentées. En terme de perspectives nous initions une problématique d'intégration d'un module d'optimisation en ligne dans cette architecture.*

MOTS-CLES : *Juste à temps, Systèmes Contrôlés par le Produit, simulation, émulation, modélisation.*

1. INTRODUCTION

Depuis les années 80 nous avons vu se développer dans les industries diverses applications des concepts du juste à temps (JiT). Les systèmes de production et de logistique ont considérablement évolués pour assurer plus de réactivité, plus de flexibilité. De systèmes centralisés et hiérarchisés pilotant entièrement les flux physiques nous sommes passés à des modes de pilotage « hybrides » donnant aux opérateurs de terrain plus d'autonomie et plus de responsabilités (les systèmes kanban en sont un exemple bien connu). Nous avons donc migré vers des systèmes où la décision autonome et locale est devenue possible. Ceci a permis, entre autre, de supprimer des niveaux de prise de décision dans le système centralisé, de simplifier les processus de pilotage, les nomenclatures et d'alléger les bases de données.

Par la suite, on a constaté un manque de visibilité : les décisionnaires de production et de logistique pilotaient alors des « boîtes noires », n'en contrôlant que les entrées et sorties. On a constaté aussi un manque d'optimalité : les opérateurs ne prenant des décisions qu'à partir d'une vision partielle du système. Une forme d'automatisation de ces processus de terrain est alors apparue depuis quelques années afin d'assurer de la visibilité, de la traçabilité et de fournir une certaine aide à la décision locale, voire des propositions d'optima.

Parmi ces principes d'automatisation, le concept de « système contrôlé par le produit » semble novateur dans la mesure où il confère directement au produit lui-même des capacités lui permettant d'assurer les fonctionnalités précédemment citées.

L'objectif de ce papier est de montrer en quoi ce concept peut être particulièrement pertinent dans un contexte de JiT et quelles architectures sont alors nécessaires pour permettre aux divers acteurs du processus de décision de piloter dynamiquement les flux physiques.

En s'appuyant sur une description de deux cas industriels, nous introduirons le concept de « Systèmes Contrôlés par le Produit » (SCP) (Valckaenaers, 1997)(Bongaerts et al. 1998)(Brennan, 2000)(Cavalieri, 2003). Nous spécifierons l'architecture de pilotage proposée. Puis la dernière partie décrira l'application envisagée dans les deux entreprises. Enfin nous conclurons et proposerons des perspectives qui s'appuient sur les limites de cette proposition.

2. ILLUSTRATION PAR DEUX CAS INDUSTRIELS

2.1 Une entreprise de meubles en kanban

- Le cas d'étude considéré est donc un atelier de fabrication de meubles en kits d'une usine appartenant à un groupe industriel français.

Cet atelier est composé de onze centres de charge, regroupés en quatre îlots (figure 1). Le premier îlot, de débit, représente un processus disjonctif de découpe de grands panneaux en pièces. Chacun des centres de charge est doté de fonctionnalités différentes et peut réaliser plusieurs opérations. Par conséquent, de nombreux chemins sont possibles, et la complexité des flux est accrue par la diversité et le volume de pièces : environ 70 lots de 400 pièces sont lancés quotidiennement. L'opération terminale est l'emballage (Ilot 4) des différents colis, où les pièces sont regroupées par référence de colis. Cette opération représente une convergence pour laquelle les flux de composants doivent être resynchronisés. La grande quantité de références (1800 références meubles, soit plus de 10 000 références pièces) et la diversité des pièces induisent également une grande complexité des flux.

Le système est, au moment de l'écriture de ce papier, géré à l'aide d'un logiciel d'ordonnancement prédictif (Ortems), dont le but est de respecter un programme directeur de production établi sur prévisions. A ce moment du début de l'étude, l'entreprise analyse l'opportunité de basculer vers un mode de production juste-à-temps, avec une gestion des flux de production à l'aide d'un système inspiré du Kanban (nommé « kanban1 » dans la partie 4) dans lequel les opérateurs devraient gérer les priorités entre les lots.

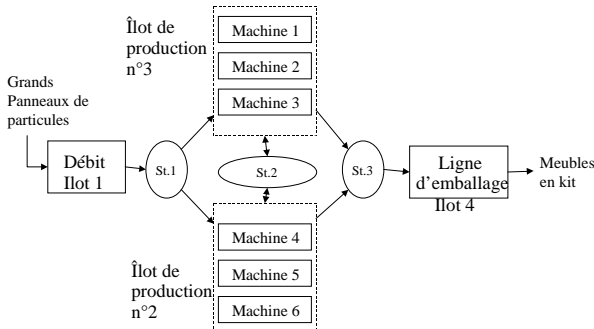


Figure 1. Vue synthétique du système de production considéré

2.2 Un fabricant de systèmes de climatisation en DFT

La deuxième entreprise appartient à un groupe américain. Elle propose une large gamme de produits de l'industrie du froid allant du simple climatiseur au système réfrigérant pour usine agro-alimentaire. Cette entreprise possède 27 sites de production dans le monde, toutes ses usines sont organisées de la même manière, à savoir la DFT (Costanza, 1996).

Cette méthode est une mise en œuvre du juste à temps et permet de standardiser les différents processus physiques et décisionnels dans une entreprise. Elle s'appuie sur la demande du client et par une détermination formelle et mathématique permet de concevoir des lignes d'assemblage répondant à cette demande. Cependant, cette méthode ne permet pas de prendre en compte le caractère dynamique de la ligne ; par exemple, des files

d'attente qui peuvent se créer à cause du déséquilibre de charge entre les différents postes d'une ligne et à cause des problèmes liés à la synchronisation des flux matières entre une ligne d'assemblage et ses lignes d'approvisionnement. Il devient donc nécessaire de prendre localement diverses décisions pour réajuster la synchronisation de ces flux ou pour équilibrer la charge des postes de la ligne principale.

La synchronisation entre une ligne et ses feeders se fait grâce à des signaux, pour éviter toute rupture, un emplacement de stock dit « IPK » (In Process Kanban) est prévu entre la ligne et le feeder (Figure 2), la capacité de cet emplacement est variable (de 1 à n produits). Cet IPK fonctionne, en fait, comme un kanban (l'appellation « kanban physique » est quelquefois utilisée dans la littérature) : une consommation dans celui-ci entraîne un appel de remplètement pour le feeder.

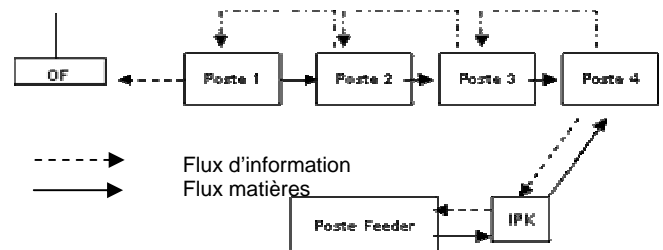


Figure 2. Le mécanisme de synchronisation

Dans ce cas d'étude, l'entreprise a donc installé un système JiT (DFT), mais est consciente d'un certain nombre de difficultés résiduelles de pilotage, entre autres, la minimisation des volumes de produits (qui peuvent être très volumineux) aux IPK.

2.3 Points communs et singularités

2.3.1 Points communs

Dans ces deux entreprises des formes de JiT sont (cas 2) ou vont (cas 1) être mises en place. Des décisions locales (à même le flux) et indépendantes du système de planification centralisé, sont prises dans un cadre d'autonomie défini cependant par ce dernier. La performance du système de production se mesure à la fin de celui-ci par des indicateurs tels que la productivité globale de la ligne, le taux de service client ou le taux de charge des goulets d'étranglement.

2.3.2 Singularités

Il s'agit de décisions locales autonomes sur lesquelles nous avons choisi de travailler pour montrer l'intérêt d'un SCP. Dans le premier cas les opérateurs font « avancer » les produits grâce aux étiquettes kanban en respectant un ordonnancement à capacité finie défini pour la journée par le système centralisé. A l'intérieur de cette journée ils pourront gérer diverses priorités de passage des lots sur les machines en fonction des avances/retards que ces lots pourraient avoir pris ou des indisponibilités ressources qui pourraient survenir.

Dans le deuxième cas, les opérateurs ont à gérer le respect strict du temps de cycle par leur mobilité d'un poste à l'autre, d'une part, et à gérer la synchronisation des

feeders avec la ligne principale en cas d'aléas sur l'une de ces lignes, d'autre part. C'est sur ce deuxième aspect que nous avons choisi de focaliser notre application.

3. LES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT

3.1 Concepts

Ce concept s'appuie sur une interprétation du paradigme 'Holonc Manufacturing Systems' (Koestler, 1967) pour expérimenter l'intérêt de rendre le produit, et au-delà l'ensemble du procédé, interactifs afin d'organiser de façon plus collaborative l'interopérationalité des différents systèmes hétérogènes de pilotage et de gestion (APS, ERP, MES, SCEM) composant la chaîne de production et de logistique des entreprises.

Cette interprétation tire parti des progrès et de la miniaturisation croissante des technologies infotroniques (RFID, communications sans-fils, etc) et mécatroniques (composants logiciels embarqués) pour faire de ce produit actif un objet composite assurant une relation récursive logiciel-matériel entre les services et les biens associés aux produits en reliant tout objet logique de contrôle ou de gestion à au moins un objet physique du procédé.

Ce paradigme SCP, qui a conceptuellement guidé l'ensemble des travaux cités (Gouyon, Morel, 2004), est une alternative pragmatique pour permettre aux entreprises de migrer d'une organisation intégrée vers une organisation adaptable puisque l'originalité de notre approche est de combiner des décisions centralisées prises a priori sur des horizons à moyen, voire à long terme, avec des décisions décentralisées prises 'en exécution' sur des horizons à court terme, voire sur événements.

3.2 Architecture proposée

Dans cette partie, nous allons décrire l'architecture proposée. Elle se veut adaptable à divers cas d'application relevant du domaine précédemment décrit et compte tenu des objectifs évidents de réutilisabilité et de modularité (ElHaouzi, 2005), (Pannequin, 2004), elle s'appuie donc sur un **modèle d'émulation** représentatif de l'atelier de production considéré et un **système de contrôle** de l'exécution qui intègre l'ensemble des règles de prise de décision. L'interface, basée sur un **système d'information** et une standardisation des interactions, permet l'interopérabilité et la synchronisation du modèle d'émulation et du système de contrôle. Cette architecture est également composée d'une bibliothèque de scénarii de test, et d'un module d'analyse a posteriori des résultats de simulation (Figure 3).

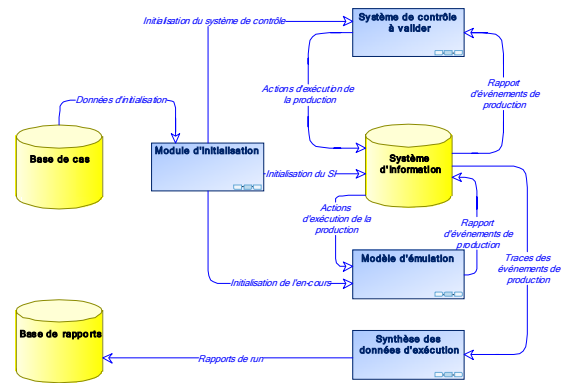


Figure 3. Architecture opérationnelle d'émulation

3.2.1 Modèle d'émulation

L'objectif du modèle d'émulation est de représenter le comportement des éléments physiques du système opérant, tant les infrastructures comme les machines ou les engins de manutention que les flux de produits. Il n'intègre aucune règle de décision : chaque point où une décision est requise est transformé en un point de synchronisation entre modèle d'émulation et système de contrôle.

Le modèle d'émulation est une représentation descriptive du procédé basé sur les principes de la systémique (Le Moigne, 1984). Compte tenu de notre point de vue (nous cherchons à modéliser un système de production), trois transformations élémentaires nous permettent de modéliser l'ensemble des comportements :

- Transformation forme/temps : représente une transformation physique du produit à travers le temps. Utilisé pour représenter une opération comme un usinage, un perçage etc... dans un système de production.
- Transformation espace/temps : représente une transformation d'espace à travers le temps, c'est à dire le déplacement d'une entité. Typiquement utilisé pour représenter une opération de transport.
- Transformation de temps : représente tout stockage. L'entité n'est pas sujette à transformation ou transport durant une période de temps.

Par ailleurs, deux relations de composition permettent de représenter deux transformations complémentaires :

- Assemblage : représente l'assemblage de plusieurs entités en une seule.
- Désassemblage : représente la division d'une entité en plusieurs, qui peuvent être identiques ou différentes. Utilisé pour modéliser des opérations comme la découpe.

Des primitives génériques de modélisation ont ainsi été développées. Une fois le process modélisé à l'aide de ce formalisme, il est possible de le traduire en un réseau de simulation en utilisant les blocs de base que nous propo-

sons. Pour chaque transformation proposée, un objet d'émulation a été défini (Figure 4) (Klein, 2006):

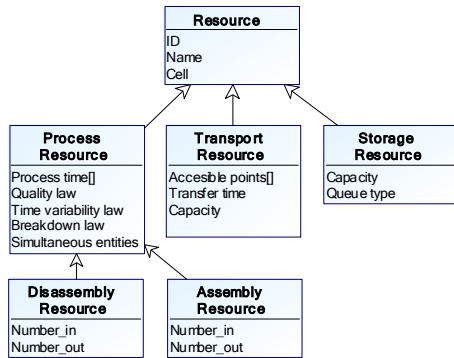


Figure 4. Attributs des objets d'émulation

Afin d'assurer la synchronisation entre le modèle d'émulation et de contrôle, la structure d'un élément basique du modèle d'émulation sera donc la suivante (5) :

1. Un label d'entrée,
2. Un premier point de synchronisation, appelé point de pré-synchronisation, en charge du paramétrage de la ressource,
3. Un macro-bloc représentant l'opération réalisée par la ressource, de la même manière que dans un modèle standard,
4. Un second point de synchronisation, appelé point de post-synchronisation, en charge de l'orientation de la pièce et du déclenchement du travail suivant.
5. Un point de sortie, en charge du routage de l'entité.

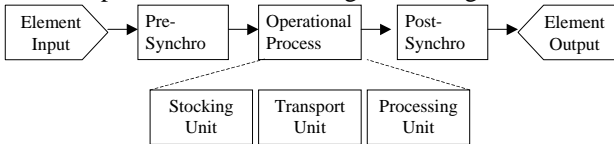


Figure 5. Structure d'un bloc de base du modèle d'émulation

3.2.2 Système de contrôle

Le système de contrôle doit donc réagir à toutes sollicitations du système physique et/ou du modèle d'émulation de celui-ci ; il comprendra donc une interface de communication avec ce dernier.

Il doit aussi prendre en compte les cadres de décision, contraignant l'autonomie de terrain, issus du progiciel de gestion centralisé ; il comprendra donc une interface de communication avec ce dernier.

Pour prendre des décisions, il s'appuiera sur les données issues du système d'information pour générer des scénarii possibles. Il devra les comparer et les analyser afin de choisir une solution à mettre en œuvre ; il comprendra donc une base de cas et un système de décision (Figure 6).

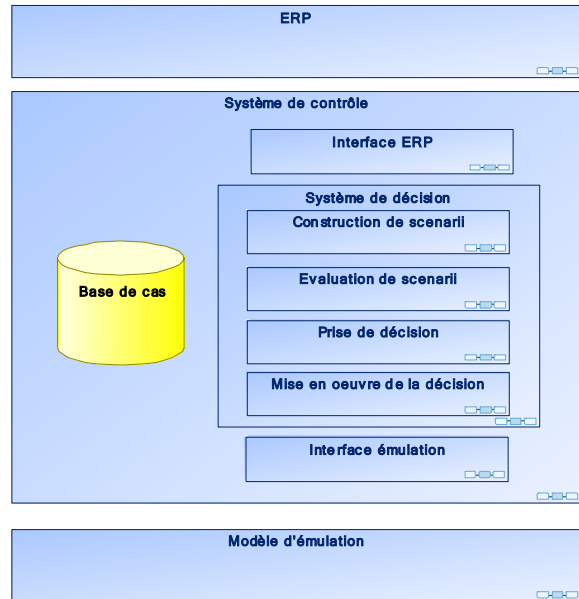


Figure 6. Structure du système de contrôle

Notons cependant que pour assurer la généricité de ce système, nous devons pouvoir le remplacer par un autre sans changer l'architecture générale. Pour cela l'interface émulation/contrôle utilise des messages standard contenant les informations suivantes :

- Identifiant du point de synchronisation (doit permettre d'identifier la ressource, son type et le type de synchronisation : pré ou post, voir figure 5)
- Un pointeur permettant d'identifier l'entité dans la base de données.

3.2.3 Système d'information

Un système d'information composé d'objets standardisés assure l'interopérabilité. Il est mis à jour en intégrant les modifications consécutives à une décision prise et en paramétrant le modèle d'émulation en conséquence. Nous distinguons trois types d'événements :

- Les événements qui sont des messages bottom-up en provenance du modèle d'émulation qui déclenchent une mise à jour du système d'information et si nécessaire un processus de prise de décision. Les trames événements sont constituées comme suit : horodatage, ressource, ID_produit,
- Les actions, qui sont des messages top-down, sont le résultat d'un processus de prise de décision. Les messages d'action entraînent généralement un paramétrage des blocs ressources du modèle d'émulation, ou le réglage d'un bloc de routage. Une trame d'action contient l'identifiant de la ressource concernée ainsi que la procédure à exécuter et les éventuels paramètres.
- Les ordres de reprise, qui signifient la fin du processus de décision et autorisent la reprise de l'exécution de la simulation.

La procédure de synchronisation (Figure 7) est très simple : lorsqu'une entité atteint un point de synchronisation, un message événement est envoyé au système d'information, portant l'identifiant de l'entité et du point de synchronisation. Le système d'information transmet les changements au système de pilotage qui, si nécessaire, déclenche une procédure de décision. Le modèle d'émulation est mis en pause pendant la durée de cet échange, et l'entité est retenue dans le bloc de synchronisation, jusqu'à réception d'un ordre de reprise.

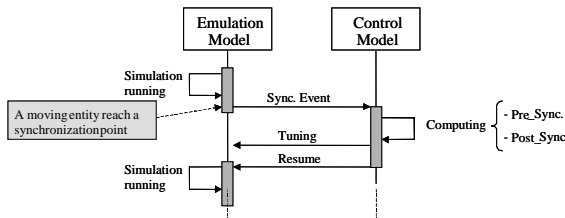


Figure 7: La procédure de synchronisation

Le système d'information est donc utilisé comme une interface entre le modèle d'émulation et le système de pilotage. Une approche similaire, basée sur une couche d'échange de données d'après le principe du « tableau noir » est utilisée dans (Mönch, 2006). Afin de simplifier la ré-utilisabilité, la généricité et l'interopérabilité, le système d'information (en particulier les données techniques et dynamiques) est construit sur la base des spécifications B2MML et IEC 62264 (Figure 8).

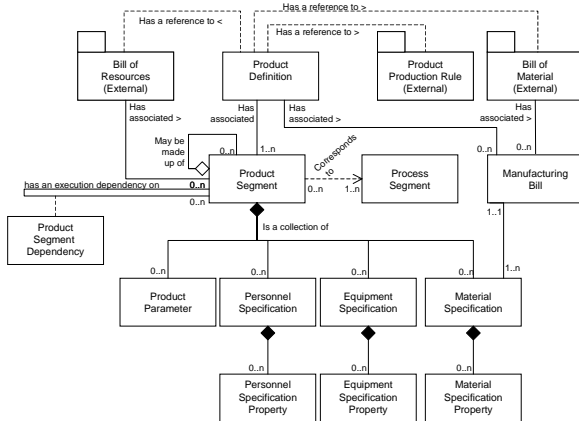


Figure 8. Structure générique du système d'information

C'est-à-dire :

- Un sous-système de gestion des données techniques.
- Un sous-système de gestion des données dynamiques, contenant un objet pour chaque objet du modèle d'émulation, et qui a pour rôle de maintenir une image pertinente et cohérente de l'état du système de production. Il est utilisé lors de l'initialisation de la simulation, et également mis à jour tout au long du « run » afin de suivre l'évolution du système.
- Un sous-système de traçabilité, permettant de mémoriser l'ensemble des événements des production, concernant tant les ressources que les produits, afin d'analyser a posteriori les différents runs. Plusieurs

analyses peuvent être faites à partir des données collectées. Des exemples sont présentés dans la section application.

Les blocs d'émulation développés intègrent une fonctionnalité permettant de générer automatiquement le modèle d'information correspondant.

4. APPLICATIONS

Dans ce paragraphe nous présentons les applications particulières que nous avons faites dans les deux entreprises décrites en §2.

4.1 Cas du fabricant de meubles en kanban

Comme nous l'avons présenté dans la deuxième partie, cette entreprise a finalement choisi de piloter ses flux physiques par un système hybride (ERP et kanban). Le système kanban (nommé kanban1 plus loin) est néanmoins particulier car prédéfini à l'avance (nombre d'étiquettes et tailles de lots constants ; autant d'étiquettes que de postes de charge utiles pour la gamme des pièces à fabriquer). En fait, un système de pilotage calcule et définit le nombre d'étiquettes à placer en début de process de fabrication pour assurer la réalisation du programme hebdomadaire. Une opération terminée sur un poste de charge entraîne le déplacement de l'étiquette sur le poste de charge suivant dans la gamme, donnant ainsi le signal d'autorisation de production pour la suite des opérations. Malgré l'aide apportée par les étiquettes kanban pour le pilotage physique de flux, il en subsiste des difficultés de gestion :

- La gestion des priorités sur les postes de charge n'est pas assurée.
- L'ordonnancement global n'est donc pas optimal et ne permet pas par exemple d'assurer un délai global.
- Il y a des pertes de performances en terme de taux d'utilisation des ressources.
- Il n'y a pas de visibilité sur la chaîne logistique interne.

Pour pallier ces faiblesses nous avons proposé une application (nommée kanban2 plus loin) dans laquelle les étiquettes kanban portent les informations et peuvent donc être à l'initiative de décisions locales (et non pas les pièces). L'application particulière du concept SCP se concrétise alors par une assistance à la prise de décision dans la gestion des priorités des kanbans (c'est les « kanbans qui prennent les décisions ») devant les postes de charge. C'est-à-dire que pour initier dans cette entreprise une automatisation des décisions prises « à même le flux physique », nous avons opté pour que ce soit les étiquettes kanbans qui portent les informations nécessaires à la visibilité totale du flux et au choix de priorités entre plusieurs kanbans, à l'endroit considéré. Le système de contrôle implémenté permet donc de reconsidé-

rer l'ordonnancement local en prenant en compte l'impact sur le flux total (jusqu'à l'emballage).

La figure 9 montre l'architecture spécifique implémentée pour l'évaluation et la démonstration de la mise en oeuvre d'un SCP dans cette entreprise. La figure 10 montre l'adaptation nécessaire du système d'information, en particulier concernant les données dynamiques.

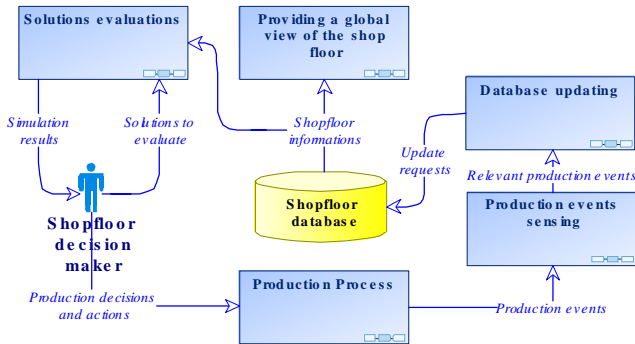


Figure 9. Architecture du système

En s'appuyant sur la bibliothèque de cas et la passerelle avec le système de pilotage mise en œuvre (gestion centralisée de la génération et du placement en début de process de fabrication des étiquettes kanban nécessaires), des situations issues de la réalité ont été reproduites sur le modèle d'émulation. La validation de celui-ci a été menée par analyse de données : sur une période de trois mois de production, nous avons comparé les résultats donnés par le simulateur aux faits réels. Les résultats sur la période couverte par la période de rafraîchissement de l'ordonnancement sont inférieurs à 5%, en terme de d'écoulement, et inférieur à 10% pour le nombre de palettes en-cours. Le modèle d'émulation est donc considéré comme représentatif pour les critères étudiés.

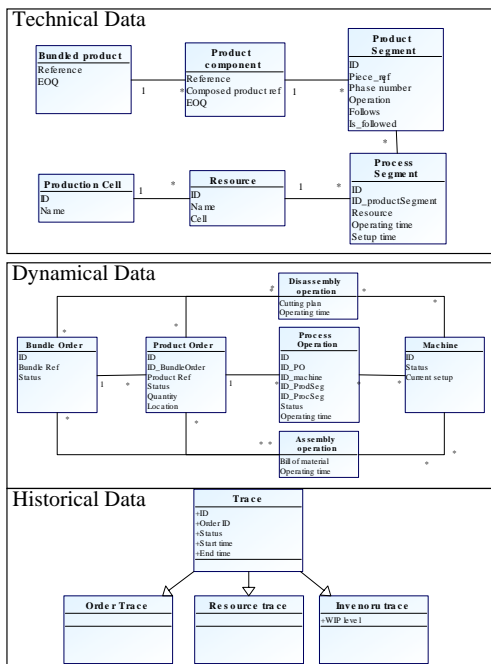


Figure 10. Structure du système d'information

Après validation du modèle d'émulation, trois systèmes de contrôle ont été comparés (« centralisé », « kanban1 » = kanban qui vient d'être installé dans l'entreprise sans système automatique d'aide à la décision et « kanban2 » = système proposé de type SCP pour lequel les étiquettes donnent au système de contrôle les informations nécessaires à une aide à la décision). Le système de pilotage a été interfacé avec le modèle d'émulation. Les règles du système kanban2 étant très simples (elles sont strictement régies par procédures), leur intégration s'est faite assez rapidement. L'outil de gestion des étiquettes ajoute en queue de file des étiquettes correspondant à l'ensemble des lots de pièces correspondant à un lancement de colis, de sorte que l'ordre FIFO soit respecté sur toutes les machines. La règle de choix d'une tâche pour un centre de charge est également très simple : la première tâche disponible est affectée à la ressource qui vient de se libérer.

Une fois la passerelle vers le système de pilotage développée, il nous a été possible de réaliser une étude comparative des deux systèmes de pilotage dans un contexte identique. Les données d'entrée étant issues du système réel, les taux de pannes et de non-qualité sont réalistes.

Système de contrôle	Délai moyen	Taux de service (%)	Retard Maxi	Rupture emballage (h)	Stock Moyen WIP1 (palettes)	Stock Moyen WIP2 (palettes)	Stock Moyen WIP3 (palettes)
Centralisé	40	72	10	4	130	169	403
Kanban 1	35	78	7	3	115	160	350
Kanban 2	27	81	6	1	120	147	371

Figure 11 Synthèse des résultats de l'étude

L'application du concept de SCP (kanban2) à la gestion par kanban semble donc probante au vu de la synthèse des indicateurs de performance représentée en figure 11. Ce cas reste cependant à déployer en particulier dans des process où des décisions de priorités entre différentes boucles kanban sont, par exemple, à prendre.

4.2 Cas du fabricant de climatiseurs en DFT

Dans cette entreprise un pilote a été choisi pour implémenter cette approche. Il s'agit d'un feeder de 4 postes de travail alimentant deux lignes d'assemblage dans deux usines différentes (Figure 12). Issu de l'ERP, le Programme Directeur de Production (PDP) donne le travail hebdomadaire de la ligne d'assemblage du site A. Ce PDP est le niveau le plus bas du système de gestion centralisé (ERP). Des Ordres de Fabrication (OF) sont aussi envoyés par anticipation au feeder afin d'assurer la disponibilité des composants. La gestion distribuée de ce feeder est nécessitée par la volonté de réduire les stocks aux points de synchronisation (IPK). Lors de la phase d'évaluation de pertinence du SCP sur ce pilote, il a été nécessaire d'émuler diverses hypothèses de positionnement des points de transmission d'informations des produits vers le système de contrôle, car ceux-ci avaient un impact sur les indicateurs de performance (délais, niveaux de stock d'en-cours, etc...), ce que nous montrons par la suite en terme d'application.

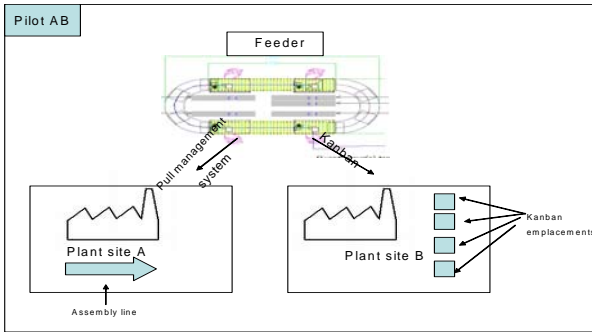


Figure 12. Vue du pilote

La figure 13 montre l'architecture installée qui utilise la technologie Internet pour communiquer entre les usines et les postes de travail et la figure 14 décrit la structure du système d'information adaptée à ce cas d'étude.

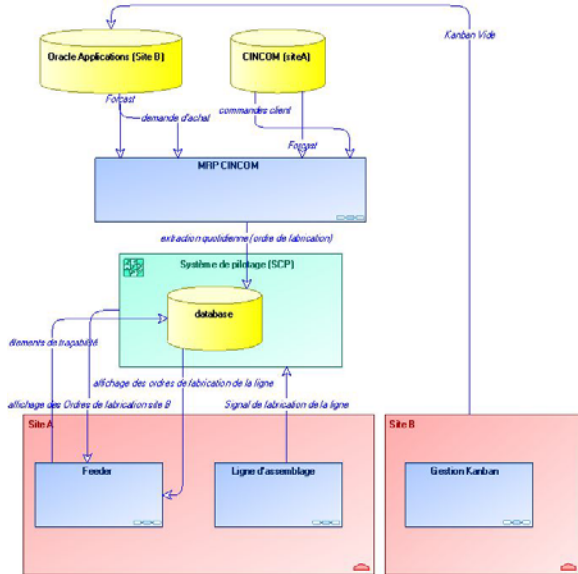
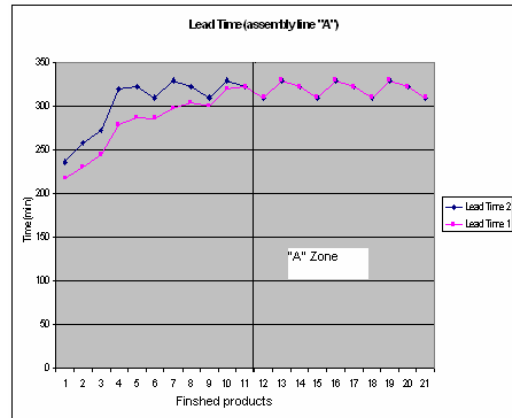
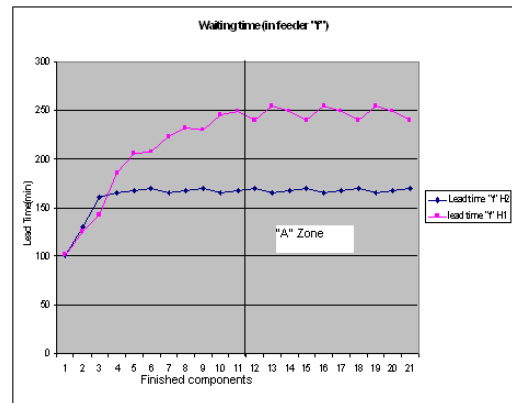


Figure 13. Architecture générale du système

Les différentes hypothèses (H1= le reader est installé en tête de ligne d'assemblage, H2 = reader installé au poste 2, etc...) de position d'implantation des readers RFID ont été testées pour mesurer l'impact de cette position sur les stocks IPK.



a. hypothèse 1



b. hypothèse 2

Figure 15. Résultats d'analyse

Les figures 15 a et b montrent les résultats sur l'indicateur délai en minutes par composant sur le feeder pour 15a et sur le produit fini pour 15b (l'indicateur stock a aussi été testé). Les analyses sont à observer uniquement dans la zone A pour laquelle le système a atteint son rythme nominal.

Aucun écart n'est constaté sur la ligne d'assemblage qui dans les deux cas a réalisé son PDP. Par contre, sur le feeder l'hypothèse H2 permet de minimiser les délais d'obtention et les IPK.

Ce pilote permet de montrer que l'information portée par le produit, dans ce contexte de JiT en DFT, donne la possibilité d'ajuster en dynamique les ordres de fabrication des composants sur le feeder et ainsi conduit à la minimisation des stocks IPK de synchronisation. Ceci étant fait, il est désormais possible de faire prendre les décisions au système de pilotage intégré à la base de données. En effet, cette dernière centralise les informations issues du site B par le flux de retour des kanbans vides qui transitent par la base Oracle, d'une part, alors que les informations terrain issues du site A, y reviennent directement via les lecteurs RFID (Figure 13), d'autre part. Cependant, à l'heure actuelle, ce système est perfectible car seules les règles utilisées par les opé-

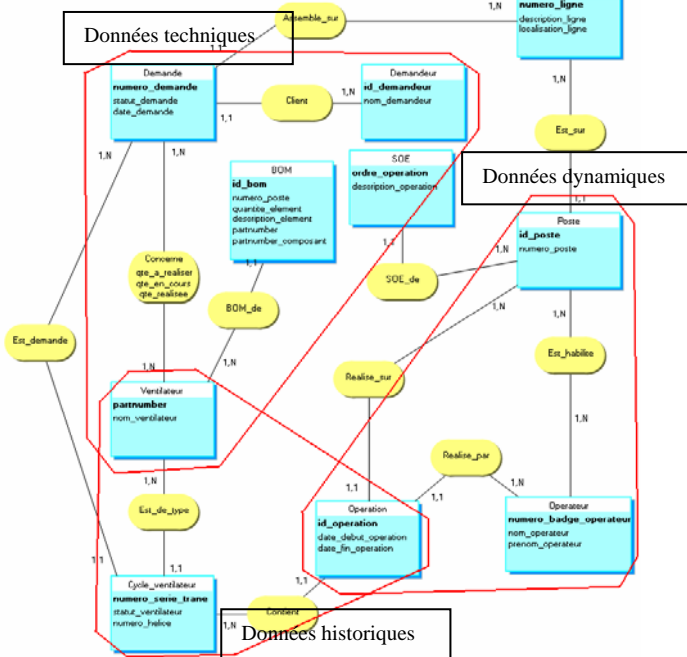


Figure 14. Structure du système d'information

rateurs ont été programmées : aucune optimisation n'a été réalisée.

5. PERSPECTIVES

Dans ce contexte de décisions locales autonomes et de très court terme, l'idée est de proposer une approche d'optimisation qui s'intègre dans une démarche de juste à temps. Il s'agit de prendre en compte *en ligne* des informations portées par le produit ou par une entité du système physique (RFID sur une pièce ou Kanban) et de les considérer dans l'optimisation des problèmes de décisions. Ainsi pour chacun des cas industriels posés, nous pouvons d'ores et déjà décrire les problèmes de décision correspondant et rapporter des travaux proches de la littérature.

Concernant le fabricant de climatiseurs, une première problématique concerne la synchronisation de la ligne principale en prenant en compte plusieurs lignes d'approvisionnement. Ce problème relève de l'équilibrage de lignes d'assemblage (ALB) avec la particularité de considérer des feeders. Pour ce type de problèmes, plusieurs revues de la littérature ont été suggérées, nous citons (Buxey *et al.*, 1973), (Ghosh et Gagnon, 1989) et (Scholl et Becker, 2006). Plus récemment, une classification des problèmes de type ALB est proposée dans (Boysen *et al.*, 2007). Cette étude révèle le gap existant entre les problèmes considérés dans le monde académique et ceux qui se posent dans la réalité industrielle. En effet, de nombreux travaux de la littérature s'intéressent à des problèmes théoriques de type SALBP avec des hypothèses très restrictives considérant, par exemple, que les opérations ont un seul mode d'exécution. En pratique, c'est rarement le cas car il existe souvent plusieurs alternatives et notamment plusieurs types d'équipements possibles. Chaque type d'équipement engendre un coût différent qui doit être pris en compte lors de la prise de décision (Belmokhtar *et al.*, 2006).

L'étude bibliographique menée jusqu'à ce jour nous a permis de recenser les travaux de (Tempelmeier, 2003) qui considèrent que l'équilibrage d'une ligne principale intègre celui de lignes d'approvisionnement. (Lapierre et Ruiz, 2004) considèrent également des feeders et suggèrent d'équilibrer la ligne principale dans un premier temps puis sur la base du temps de cycle *principal* obtenu, ils réalisent l'équilibrage des lignes feeders en supposant que les opérateurs peuvent intervenir sur le point de croisement de la ligne principale et des lignes feeders.

Concernant le fabricant de meubles, les problèmes posés sont liés à la détermination d'un ordre de passage des produits devant des machines (stations) dans un contexte de juste à temps, l'ensemble des travaux de la littérature suggèrent des approches de simulation en appliquant de simples règles de priorité. En particulier, (Hum et Lee, 1997) évaluent plusieurs règles basées sur le nombre de kanban pour définir l'ordre des produits en attente devant les stations. (Vinod et Sridharan, 2007) suggèrent de nouvelles règles de priorité basées sur les temps de

préparations pour un problème de job shop avec temps de préparation dépendant de la séquence. Les auteurs mènent une étude expérimentale sous des conditions liées à la charge de l'atelier, ratios des temps de préparations et aux dates échues.

Dans les travaux cités, il s'agit de résoudre des problèmes hors-ligne c'est-à-dire sans la prise en compte d'évènements liés au fonctionnement du système en temps réel. (Artigues et Roubellat, 2001) suggèrent une approche temps réel pour les problèmes d'ordonnement d'ateliers travaillant à la commande. Une des pistes que nous pensons prometteuse est d'intégrer les informations portées par le produit dans une telle approche pour déterminer l'ordre de passage des produits dans un atelier, d'une part, et de synchroniser des lignes d'assemblage en présence de lignes d'approvisionnement, d'autre part.

5 CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons pu montrer en quoi le concept de Système Contrôlé par le Produit (SCP) pouvait être pertinent pour l'automatisation ou pour l'assistance à la décision locale (à même le flux de produits) dans un contexte de Juste à Temps (JiT). Ces derniers étant par définition des systèmes hybrides, à savoir, des systèmes dans lesquels des décisions indépendantes sont prises sur le terrain à l'intérieur d'un cadre d'autonomie autorisé par le système centralisé.

Nous avons aussi proposé une architecture permettant la mise en œuvre de ce concept SCP dans un tel contexte de JiT, cette architecture comprenant un système de contrôle, un émulateur, une base de données et des interfaces adaptées.

Dans un autre papier soumis à MOSIM08 nous avons proposé une méthodologie de déploiement de ce type d'architecture dans divers contextes industriels.

En termes de perspectives, nous avons entamé une réflexion sur l'identification des problèmes de décision à intégrer et sur la manière de faire évoluer les approches de la littérature afin de prendre en compte des informations portées par le produit. Pour les deux cas pratiques étudiés dans ce papier, il s'agit de définir l'ordre de passage des produits sur les stations (cas du fabricant de meubles) et d'équilibrer une ligne d'assemblage en considérant des lignes d'approvisionnement.

REFERENCES

- Artigues, C., and F. Roubellat, 2001. Ordonnement d'ateliers en temps réel : *Ordonnement de la production*, Hermes Science Publications.
- Belmokhtar, S., A. Dolgui, N. Guschinsky, and G. Levin, 2006. Integer programming models for logical layout design of modular machining lines. *Computers & industrial engineering*, 51, p.502-518.
- Bongaerts, L., L. Monostori, D. McFarlane, and B. Kadar, 1998. Hierarchy in distributed shop floor

- control. *IMS-EUROPE 1998, The first open Workshop of Esprit working group on IMS*, Lausanne, 15-17 April 1998.
- Boysen, N., M. Fliedner, and A. Scholl, 2006. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183, p. 674-693.
- Brennan, R.W., 2000. Performance comparison and analysis of reactive and planning-based control architectures for manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(2-3), p. 191-200.
- Buxey, G.M., N.D. Slack, and R. Wild, 1973. Production flow line system design-a review. *AIIE Transactions*, 5, p. 37-48.
- Cavaliere, S. and M. Macchi, 2003. Benchmarking the performance of manufacturing control system : design principles for a web based simulated testbed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, p. 43-58.
- Costanza, J., 1996. Just-In-Time manufacturing excellence John Costanza Institute of Technology Inc.; 3rd edition (Sept 96) ISBN: B0006ENXLI
- El Haouzi, H. and A. Thomas, 2005. A Methodological Approach to Build Simulation Models of Manufacturing Systems with Distributed Control. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Marrakech, Morocco.
- Ghosh, S. and R.J. Gagnon, 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 4, p. 637-670.
- Gouyon, D., J-M. Simao, K. Alkassam and G. Morel, 2004. Product-Driven Automation Issues For B2m-Control Systems Integration. *INCOM 2004. International Conference on Information Control Problems in Manufacturing*, Salvador-Bahia, Brazil, April 4-7 04.
- Hum, S-H., and C-H, Lee, 1997. JIT Scheduling Rules: A Simulation Evaluation. *International Journal of Management Science*, 26(3), p. 381-395.
- IEC 62264, 2002. IEC 62264 – Enterprise-control system integration, Part 1. Models and terminology, Part 2. Model object attributes. ISO/IEC – Geneva.
- Klein, T. and A. Thomas, 2006. Développement d'un modèle de simulation pour l'évaluation des systèmes de pilotage distribués. *6^{ème} conférence francophone de modélisation et simulation*, Maroc, 3-5 avril 06.
- Koestler, A., 1967. *The ghost in the machine*, Arkana Books.
- Le moigne, J-L., (1984) *La théorie du système général*, Presses Universitaires de France.
- Lapierre, S.D., and A.B. Ruiz, 2004. Balancing assembly lines : An industrial case study. *Journal of the Operational Research Society*, 55, p. 589-597.
- Monch, L., 2006. Simulation-based benchmarking of production control schemes for complex manufacturing systems. *Control Engineering Practice*, In Press, Corrected Proof.
- Pannequin, R., and A. Thomas, 2004. Centralized versus distributed decision, an industrial case. In: *11th IFAC Symposium on Information and Control Problem in Manufacturing INCOM'2004*.
- Scholl, A., and C. Becker, 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedure for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), p. 666-693.
- Tempelmeier, H., 2003. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research*, 41, p. 149-170.
- Valckenaers, P., H. Van Brussel, L. Bongaerts, and J. Wyls, 1997. Holonic manufacturing systems. *Integrated Computers Aided Engineering*, 4, p. 191-201.
- Vinod, V., and R. Sridharan, 2007. Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-dependent setups: An experimental study. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, doi:10.1016/j.rcim.2007.05.001