Architecture de systèmes contrôlés par la produit pour un environnement de juste à temps

André Thomas, Hind El Haouzi, Thomas Klein, Sana Belmokhtar, Carlos Herrera

► To cite this version:

André Thomas, Hind El Haouzi, Thomas Klein, Sana Belmokhtar, Carlos Herrera. Architecture de systèmes contrôlés par la produit pour un environnement de juste à temps. Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), 2009, 43 (4-5), pp.513-535. 10.3166/jesa.43.513-535 . hal-00542384

HAL Id: hal-00542384

<https://hal.science/hal-00542384>

Submitted on 2 Dec 2010

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.

1

2

3 Architecture de systèmes contrôlés par la 4 produit pour un environnement de juste à 5 temps

6 **André Thomas — Hind El Haouzi — Thomas Klein — Sana Belmo-**
7 **khtar — Carlos Herrera**

8 *Centre de Recherche en Automatique de Nancy,*
9 *Nancy Université – CNRS (UMR 7039)*
10 *Andre.Thomas@cran.uhp-nancy.fr*

11

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

23 *ABSTRACT. Appeared in 80's, Just in Time (JiT) leads to more flexibility, reactivity and more*
24 *Work in Process control. This philosophy gives autonomous decision making possibilities to*
25 *shop floor operators. Coming from holonic manufacturing paradigm, Product Driven System*
26 *(PDS) Concept is still emergent and leads to give information and decision capacities to prod-*
27 *ucts. In this paper, we show that in the specific JiT context, PDS are pertinent for decision*
28 *making process and operational tasks automation. A control architecture is also proposed.*
29 *This architecture is composed by a control system, an emulator, a data base and interfaces.*
30 *Two industrial applications are presented. In perspectives, we initiate the optimisation module*
31 *integration problem.*

32 *MOTS-CLÉS : Juste à temps, Systèmes Contrôlés par le Produit, simulation, émulation*

33 *KEYWORDS: Just In Time, Product Driven Systems, Simulation, Emulation*

34

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 contrôle « 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, prise par les opérateurs essentiellement, 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 contrôle en évitant de nombreuses boucles de retour d'information (et donc d'améliorer la réactivité ou la vitesse de prise de décision face à des perturbations), de simplifier aussi les nomenclatures (car de nombreuses étapes des processus de transformation n'étaient plus gérées par le MRP et donc disparaissaient de celles-ci) et d'alléger par conséquent 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, car les opérateurs de manière autonomes modifiaient les plans prévus sans leur demander leur avis. Nous avons observé dans les entreprises aussi un manque d'optimalité : les opérateurs ne prenant des décisions qu'à partir d'une vision partielle du système, il est donc impossible d'assurer un taux de service client ou un taux de charge d'un goulot, par exemple, (Scholz-Reiter *et al.*, 2008). Dans la mouvance des initiatives liées au paradigme *Integration in Manufacturing* (IiM) (Burbidge *et al.*, 1987), 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. L'apparition des nouvelles technologies d'information et de communication, telles les RFID, devrait permettre à terme de changer le processus classique de gestion de la production.

Plus dernièrement, la communauté de l'Intelligent Manufacturing Systems (IMS) (Babiceanu *et al.*, 2006) a beaucoup soutenu les initiatives conduisant à donner au produit ou à des éléments du système physique des capacités de portage d'information, voir de traitement de celles-ci. Parmi ces principes d'automatisation, le concept de « système contrôlé par le produit » (SCP) semble novateur dans la mesure où il confère directement au produit lui-même des capacités lui permettant d'assurer les fonctionnalités palliant aux problèmes précédemment cités. Par opposition au classique MRP2, système centralisé et hiérarchisé, le concept de SCP est une manière différente de voir le contrôle d'un atelier ou, d'une manière générale, des flux physiques de produits et de matières. Selon ce concept, le produit peut porter, de manière permanente et continue (ou de manière discontinue), des informations. Il peut aussi en donner à et/ou en capter de son environnement immédiat. Il peut enfin sur la base de ces informations, et faisant suite à un traitement qu'il opérerait lui-même, prendre des décisions relatives à son propre devenir et les faire appliquer par les éléments constitutifs de son environnement. Ce concept a transformé la boucle de contrôle cybernétique (Figure

1) et a été largement présenté dans le passé (Valckenaers *et al.*, 1997), (Bongaerts *et al.*, 2000), (Brennan, 2000) (Morel *et al.*, 2007) et (Cavalieri *et al.*, 2003).

Figure 1. Boucle de contrôle incluant le produit informant

L'objectif de cet article 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). Nous spécifierons l'architecture de contrôle 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. Illustrations par deux cas industriels

2.1. Une entreprise de meubles en kanban

Le cas d'étude considéré est 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 2). 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 différentes colis, où les pièces sont regroupées par référence de colis. Cette opération représente une convergence pour laquelle les flux de composants doivent être re-synchronisés, et de ce fait, est le goulot du système. La grande quantité de références (1800 références meubles, soit plus de 10 000 références pièces) et la diversité de celles-ci induisent

102 également une grande complexité des flux. Le système est, au moment de l'écriture
 103 de cet article, géré à l'aide d'un logiciel d'ordonnancement prédictif (Ortems), dont
 104 le but est de respecter un programme directeur de production établi sur prévisions. A
 105 ce moment du début de l'étude, l'entreprise analyse l'opportunité de basculer vers un
 106 mode de production juste-à-temps, avec une gestion des flux de production à l'aide
 107 d'un système inspiré du Kanban (nommé « kanban1 » dans la partie 5) dans lequel les
 108 opérateurs devraient gérer les priorités entre les lots.

Figure 2. *Vue synthétique du système de production considéré*

109 2.2. Un fabricant de systèmes de climatisation en DFT

110 La deuxième entreprise appartient à un groupe américain. Elle propose une large
 111 gamme de produits de l'industrie du froid allant du simple climatiseur au système
 112 réfrigérant pour usine agro-alimentaire. Cette entreprise possède 27 sites de produc-
 113 tion dans le monde, toutes ses usines sont organisées de la même manière, à savoir
 114 la DFT (Demand Flow Technology) (Costanza, 1996). Cette méthode est une mise en
 115 œuvre du juste à temps et permet de standardiser les différents processus physiques
 116 et décisionnels dans une entreprise. Elle s'appuie sur la demande du client et par une
 117 détermination formelle permet de concevoir des lignes d'assemblage répondant à cette
 118 demande. Cependant, cette méthode ne permet pas de prendre en compte le caractère
 119 dynamique de la ligne ; par exemple, des files d'attente qui peuvent se créer à cause du
 120 déséquilibre de charge entre les différents postes d'une ligne et à cause des problèmes
 121 liés à la synchronisation des flux matières entre une ligne d'assemblage et ses lignes
 122 d'approvisionnement. Il devient donc nécessaire de prendre localement diverses dé-

cisions pour réajuster la synchronisation de ces flux ou pour équilibrer la charge des postes de la ligne principale.

Figure 3. *Le mécanisme de synchronisation*

La synchronisation entre une ligne d'assemblage et ses lignes d'alimentation se fait, pour éviter toute rupture, grâce à des signaux visuels, concrétisés par un emplacement de stock dit « IPK » (In Process Kanban) qui est prévu entre la ligne d'assemblage et le poste d'alimentation (Figure 3), 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 rechargement pour la ligne d'alimentation. 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 contrôle, entre autres, la minimisation des volumes de produits (qui peuvent être très volumineux) aux IPK.

3. Points communs et singularités

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 l'issue 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.

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 lignes d'alimentation 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.

4. Les systèmes contrôlés par le produit

4.1. Concept

Ce concept s'appuie sur une interprétation du paradigme *Holonic Manufacturing Systems* (Koestler, 1976) 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 contrôle et de gestion (APS, ERP, MES) 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 du laboratoire (Morel *et al.*, 2003), (Gouyon, 2004), (Pannequin *et al.*, 2004), (Morel *et al.*, 2007) (Figure 4) est une alternative pragmatique pour permettre aux entreprises de migrer d'une organisation intégrée et centralisée vers une organisation adaptable, puisque l'originalité de cette approche est de combiner des décisions centralisées prises a priori sur des horizons à moyen, voire à long termes, avec des décisions décentralisées prises « en exécution » sur des horizons à court terme, voire sur événements.

Figure 4. B2M interaction centered on holonic products (Pannequin *et al.*, 2004 adapté de Morel *et al.*, 2003).

Nos travaux visent donc à mettre, au moins partiellement, en application ce concept. Ceci peut-être effectivement réalisé dans les cas industriels présentés précédemment dans la mesure où des décisions humaines sont transférées, grâce aux technologies de communication sans fil, sur le produit ou sur un élément du système physique (kanban) appartenant aux flux de produits. Se pose alors le problème de l'architecture du système informatique support.

4.2. 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. Elle doit à la fois permettre d'accompagner un projet de conception-intégration d'un SCP et permettre de piloter en phase d'exploitation un tel système conçu. Pour ce faire cette architecture devra aider à faire des choix technologiques en prenant en compte la dynamique du système réel (les files d'attente, la mobilité des hommes dans le système, les temps de réaction, etc.). Elle devra encore être mise en place, pour un cas industriel donné, dans un minimum de temps. Ainsi et compte tenu de ces objectifs évidents de réutilisabilité et de modularité (El Haouzi *et al.*, 2005), (Pannequin *et al.*, 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 5).

Figure 5. Modèle général d'architecture de contrôle centré sur le produit, Klein *et al.*, 2006.

198 4.3. *Modèle d'émulation*

199 L'objectif du modèle d'émulation est de représenter le comportement des éléments
200 physiques du système opérant, tant les infrastructures comme les machines ou les en-
201 gins de manutention que les flux de produits. Il n'intègre aucune règle de décision :
202 chaque point où une décision est requise est transformé en un point de synchroni-
203 sation entre modèle d'émulation et système de contrôle. Le modèle d'émulation est
204 une représentation descriptive du procédé basé sur les principes de la systémique
205 (Le Moigne, 1977). Compte tenu de notre point de vue (nous cherchons à modéli-
206 ser un système de production), trois transformations élémentaires nous permettent de
207 modéliser l'ensemble des comportements :

208 – Transformation forme/temps : représente une transformation physique du pro-
209 duit à travers le temps. Utilisé pour représenter une opération comme un usinage, un
210 perçage, etc., dans un système de production.

211 – Transformation espace/temps : représente une transformation d'espace à travers
212 le temps, c'est à dire le déplacement d'une entité. Typiquement utilisé pour représenter
213 une opération de transport.

214 – Transformation de temps : représente tout stockage. L'entité n'est pas sujette à
215 transformation ou transport durant une période de temps.

216 Par ailleurs, deux relations de composition permettent de représenter deux trans-
217 formations complémentaires :

218 – Assemblage : représente l'assemblage de plusieurs entités en une seule.

219 – Désassemblage : représente la division d'une entité en plusieurs, qui peuvent être
220 identiques ou différentes. Utilisé pour modéliser des opérations comme la découpe.

221 Des primitives génériques de modélisation ont ainsi été développées. Une fois le
222 process modélisé à l'aide de ce formalisme, il est possible de le traduire en un ré-
223 seau de simulation en utilisant les blocs de base que nous proposons. Pour chaque
224 transformation proposée, un objet d'émulation a été défini (Figure 6) :

225 Afin d'assurer la synchronisation entre le modèle d'émulation et de contrôle, la
226 structure d'un élément basique du modèle d'émulation sera donc la suivante (Figure
227 7) :

228 1) Un bloc d'entrée,

229 2) Un premier point de synchronisation, appelé point de pré-synchronisation, en
230 charge du paramétrage de la ressource,

231 3) Un macro-bloc représentant l'opération réalisée par la ressource, de la même
232 manière que dans un modèle standard,

233 4) Un second point de synchronisation, appelé point de post-synchronisation, en
234 charge de l'orientation de la pièce vers la prochaine ressource et du déclenchement du
235 travail suivant.

236 5) Un point de sortie, en charge du routage de l'entité.

Figure 6. Attributs des objets d'émulation

Figure 7. Structure d'un bloc de base du modèle d'émulation

237 4.4. Système de contrôle

238 Le système de contrôle doit donc réagir à toutes sollicitations du système phy-
 239 sique et/ou du modèle d'émulation de celui-ci : il comprendra donc une interface de
 240 communication avec ce dernier. Il doit aussi prendre en compte les cadres de déci-
 241 sion, contraignant l'autonomie de terrain, issus du progiciel de gestion centralisé : il
 242 comprendra donc aussi une interface de communication avec ce dernier.

243 Pour prendre des décisions, il s'appuiera sur les données issues du système d'in-
 244 formation pour générer des scénarii possibles. Il devra les comparer et les analyser afin
 245 de choisir une solution à mettre en œuvre : il comprendra donc une base de cas et un
 246 système de décision (Figure 8). La base de cas contenant divers scénarii correspondant

Figure 8. *Structure du système de contrôle*

247 à des états du système de production, un état initial typiquement. Notons cependant
 248 que pour assurer la généricité de ce système, nous devons pouvoir le remplacer par
 249 un autre sans changer l'architecture générale. Pour cela l'interface émulation/contrôle
 250 utilise des messages standards contenant les informations suivantes :

- 251 – Un identifiant du point de synchronisation (doit permettre d'identifier la res-
- 252 source, son type et le type de synchronisation : pré ou post, voir Figure 7).
- 253 – Un pointeur permettant d'identifier l'entité dans la base de données.

254 4.5. *Système d'information*

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

- 259 – Les événements qui sont des messages bottom-up en provenance du modèle
- 260 d'émulation qui déclenchent une mise à jour du système d'information et si nécessaire
- 261 un processus de prise de décision. Les trames événements sont constituées comme

Figure 9. La procédure de synchronisation

262 suit : horodatage, ressource, ID-produit,

263 – Les actions, qui sont des messages top-down, sont le résultat d'un processus
 264 de prise de décision. Les messages d'action entraînent généralement un paramétrage
 265 des blocs ressources du modèle d'émulation, ou le réglage d'un bloc de routage. Une
 266 trame d'action contient l'identifiant de la ressource concernée ainsi que la procédure
 267 à exécuter et les éventuels paramètres.

268 – Les ordres de reprise, qui signifient la fin du processus de décision et autorisent
 269 la reprise de l'exécution de la simulation.

270 La procédure de synchronisation (Figure 9) est très simple : lorsqu'une entité at-
 271 teint un point de synchronisation, un message événement est envoyé au système d'in-
 272 formation, portant l'identifiant de l'entité et du point de synchronisation. Le système
 273 d'information transmet les changements au système de contrôle qui, si nécessaire, dé-
 274 clenche une procédure de décision. Le modèle d'émulation est mis en pause pendant
 275 la durée de cet échange, et l'entité est retenue dans le bloc de synchronisation, jusqu'à
 276 réception d'un ordre de reprise.

277 Le système d'information est donc utilisé comme une interface entre le modèle
 278 d'émulation et le système de contrôle. Une approche similaire, basée sur une couche
 279 d'échange de données d'après le principe du « tableau noir » est utilisée dans (Monch,
 280 2007). Afin d'assurer la ré-utilisabilité, la généricité et l'interopérabilité, le système
 281 d'information (en particulier les données techniques et dynamiques) est construit sur
 282 la base des spécifications B2MML et IEC 62264 (Figure 10) .

283 C'est-à-dire :

284 – Un sous-système de gestion des données techniques.

285 – Un sous-système de gestion des données dynamiques, contenant un objet pour
 286 chaque bloc du modèle d'émulation, et qui a pour rôle de maintenir une image perti-
 287 nente et cohérente de l'état du système de production. Il est utilisé lors de l'initialisa-
 288 tion de la simulation, et également mis à jour tout au long de l'« exécution » afin de

Figure 10. Structure générique du système d'information

289 suivre l'évolution du système.

290 – Un sous-système de traçabilité, permettant de mémoriser l'ensemble des événe-
 291 ments de production, concernant tant les ressources que les produits, afin d'analyser a
 292 posteriori les différentes exécutions.

293 Plusieurs analyses peuvent être faites à partir des données collectées (des exemples
 294 sont présentés dans la section applications). Les blocs d'émulation développés in-
 295 tègrent une fonctionnalité permettant de générer automatiquement le modèle d'infor-
 296 mation correspondant.

297 5. Applications

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

300 5.1. Cas du fabricant de meubles en kanban

301 Comme nous l'avons présenté dans la deuxième partie, cette entreprise a finale-
 302 ment choisi de piloter ses flux physiques par un système hybride (ERP et kanban). Le
 303 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 contrôle 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 contrôle physique de flux, il en subsiste des difficultés de gestion :

- La gestion des priorités sur les postes de charge n'est pas assurée. En effet, lorsque sur un poste de charge plusieurs étiquettes kanban représentant plusieurs références produits sont présentes, l'opérateur, comme dans tout système kanban classique, ne peut s'appuyer que sur son savoir faire et sur des informations locales pour définir ses priorités.

- L'ordonnancement global n'est donc pas optimal et ne permet pas, par exemple, d'assurer un délai global. (Voir remarque précédente)

- Des pertes de performance en terme de taux d'utilisation des ressources sont constatées, liées à la non-optimalité des décisions localement prises.

- 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 (et non pas les pièces) portent les informations et peuvent donc être à l'initiative de décisions locales. Cette application particulière du concept SCP se concrétise alors par une assistance à la prise de décision dans la gestion des priorités des kanbans (ce sont 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 reconsidérer l'ordonnancement local en prenant en compte l'impact sur le flux total (jusqu'à l'emballage).

La Figure 11 montre l'architecture spécifique implémentée pour l'évaluation et la démonstration de la mise en œuvre d'un SCP dans cette entreprise. La Figure 12 montre l'adaptation nécessaire du système d'information, en particulier concernant les données dynamiques.

En s'appuyant sur la bibliothèque de cas et la passerelle avec le système de contrôle 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 temps d'écoulement, et inférieur à 10% pour le nombre de palettes

Figure 11. Architecture du système

346 en-cours. Le modèle d'émulation est donc considéré comme représentatif pour les
347 critères étudiés.

348 Après validation du modèle d'émulation, trois systèmes de contrôle ont été compa-
349 rés (« centralisé », « kanban1 » = kanban qui vient d'être installé dans l'entreprise sans
350 système automatique d'aide à la décision et « kanban2 » = système proposé de type
351 SCP pour lequel les étiquettes donnent au système de contrôle les informations néces-
352 saires à une aide à la décision). Le système de contrôle a été interfacé avec le modèle
353 d'émulation. Les règles du système kanban2 étant très simples (elles sont strictement
354 régies par procédures), leur intégration s'est faite assez rapidement. L'outil de gestion
355 des étiquettes ajoute en queue de file des étiquettes correspondant à l'ensemble des
356 lots de pièces et ce pour chaque lancement de colis, de sorte que l'ordre FIFO soit res-
357 pecté sur toutes les machines. La règle de choix d'une tâche pour un centre de charge
358 est également très simple : la première tâche disponible est affectée à la ressource qui
359 vient de se libérer. Une fois la passerelle vers le système de contrôle développée, il
360 nous a été possible de réaliser une étude comparative des deux systèmes de contrôle
361 dans un contexte identique. Les données d'entrée étant issues du système réel, les taux
362 de pannes et de non-qualité sont réalistes.

363 L'application du concept de SCP (kanban2) à la gestion par kanban semble donc
364 probante au vu de la synthèse des indicateurs de performance représentée dans le ta-
365 bleau 1. Le délai moyen global obtenu avec notre proposition est de 67% du délai
366 initial avec le système centralisé et de 77% du délai obtenu avec le kanban classique.
367 Le taux de service client est amélioré de presque 10%, les ruptures sur la ligne d'em-
368 ballage (qui rappelons-le est le goulot du système) ont été divisées par 4 et enfin, les
369 stocks d'en-cours (qui rappelons-le sont causes de perte de temps, de désorganisation
370 et de problèmes de qualité) ont été aussi significativement réduits. Ce cas qui consti-
371 tue un prototype pour l'entreprise, reste cependant à déployer dans toute celle-ci ; en

Figure 12. Structure du système d'information

Système de contrôle	Délai moyen	Taux de service (%)	Retard maximal	Rupture emballage (h)
Centralisé	40	72	10	4
Kanban 1	35	78	7	3
Kanban 2	27	81	6	1

Système de contrôle	Stock moyen WIP1 (palettes)	Stock moyen WIP2 (palettes)	Stock moyen WIP3 (palettes)
Centralisé	130	169	403
Kanban 1	115	160	350
Kanban 2	120	147	371

Tableau 1. Synthèse des résultats de l'étude

particulier dans des processus où des décisions de priorités entre différentes lignes de produits (donc entre différentes boucles kanban) sont, par exemple, à prendre.

5.2. Cas du fabricant de climatiseurs en DFT

Dans cette entreprise un pilote a été choisi pour implémenter l'approche SCP. Il s'agit d'une ligne d'alimentation de 4 postes de travail alimentant deux lignes d'assemblage dans deux usines différentes (Figure 13). 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 à la ligne d'alimentation afin d'assurer la disponibilité des composants. La gestion distribuée de cette ligne d'alimentation 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.

La Figure 14 montre l'architecture installée qui utilise la technologie Internet pour communiquer entre les usines et les postes de travail et la Figure 15 décrit la structure du système d'information adaptée à ce cas d'étude. Celles-ci sont aussi déduites de la modélisation générique proposée dans le paragraphe 4.2.

Les différentes hypothèses (H1 = le lecteur est installé en tête de ligne d'assemblage, H2 = lecteur installé au poste 2, H3 = lecteur installé au poste 3, H4 = lecteur installé au point d'IPK.) de position d'implantation des lecteurs RFID ont été testées pour mesurer l'impact de cette position sur différents indicateurs tels les stocks en

Figure 13. *Vue du pilote*

Figure 14. *Architecture générale du système pour les lignes d'assemblage en DFT*

396 IPK, les délais, etc. La Figure 16 montre les deux hypothèses extrêmes (H1 = lecteur
 397 installé à la tête de ligne, H4 = lecteur installé au point d'IPK).

Figure 15. Structure du système d'information

Figure 16. Les scénarii de positionnement des lecteurs

398 Les Figures 17 a et b montrent respectivement les résultats sur l'indicateur délai
 399 en minutes par composant sur la ligne d'alimentation et sur le produit fini (l'indica-
 400 teur stock à aussi été testé). Les analyses sont à observer uniquement dans la zone
 401 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 la ligne d'alimentation l'hypothèse H2 permet de minimiser les délais d'obtention et les niveaux de stock des IPK (ligne pointillée Figure 17b).

Figure 17. Résultats d'analyse

Ce pilote permet de montrer que l'information portée par le produit, dans ce contexte de JiT en DFT et par l'information anticipée « du juste nécessaire » qu'il donne aux opérateurs, offre la possibilité d'ajuster en dynamique les ordres de fabrication des composants sur la ligne d'alimentation et ainsi conduit à la minimisation des stocks IPK de synchronisation. En effet, dans l'hypothèse 1 où le lecteur est en tête de ligne d'assemblage (position 1), le système est dans une configuration équivalente au système centralisé sans lecteur, mais pour lequel l'information serait donnée par des OF issus de l'ERP. Dans ce cas donc le SCP n'apporterait évidemment rien. A l'opposé, si le lecteur est au point d'IPK (position 2), il faudrait être extrêmement réactif, le taux de service serait probablement dégradé. Les scénarii d'émulation ont permis donc de trouver le bon emplacement qui maximise les indicateurs de performance tout en minimisant le nombre de lecteurs.

Ceci étant fait, il est désormais possible de faire prendre les décisions au système de contrôle intégré à la base de données (fonction principale du SCP). 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, d'autre part. Cepen-

422 dant, à l'heure actuelle, ce système est perfectible car seules les règles utilisées par les
 423 opérateurs ont été programmées : aucune optimisation n'a été réalisée.

424 6. Perspectives

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

433 Concernant le fabricant de climatiseurs, une première problématique concerne la
 434 synchronisation de la ligne principale en prenant en compte plusieurs lignes d'approvi-
 435 sionnement. Ce problème relève de l'équilibrage de lignes d'assemblage (ALB) avec
 436 la particularité de considérer des lignes d'alimentation. Pour ce type de problèmes,
 437 plusieurs revues de la littérature ont été suggérées, nous citons (Buxey *et al.*, 1973),
 438 (Ghosh *et al.*, 1989) et (Scholl *et al.*, 2006). Plus récemment, une classification des
 439 problèmes de type ALB est proposée dans (Boysen *et al.*, 2006). Cette étude révèle
 440 le gap existant entre les problèmes considérés dans le monde académique et ceux qui
 441 se posent dans la réalité industrielle. En effet, de nombreux travaux de la littérature
 442 s'intéressent à des problèmes théoriques de type SALBP avec des hypothèses très res-
 443 trictives considérant, par exemple, que les opérations ont un seul mode d'exécution.
 444 En pratique, c'est rarement le cas car il existe souvent plusieurs alternatives et notam-
 445 ment, en phase de conception, si on envisage plusieurs types d'équipements possibles.
 446 Chaque type d'équipement engendre un coût différent qui doit être pris en compte lors
 447 de la prise de décision (Belmokhtar *et al.*, 2006).

448 L'étude bibliographique menée jusqu'à ce jour nous a permis de recenser les tra-
 449 vaux de (Tempelmeier, 2003) qui considèrent que l'équilibrage d'une ligne principale
 450 intègre celui de lignes d'approvisionnement. (Lapierre *et al.*, 2004) considèrent éga-
 451 lement des lignes d'alimentation et suggèrent d'équilibrer la ligne principale dans un
 452 premier temps puis sur la base du temps de cycle principal obtenu, ils réalisent l'équi-
 453 librage des lignes d'alimentation en supposant que les opérateurs peuvent intervenir
 454 sur le point de croisement de la ligne principale et des lignes d'alimentations (même
 455 contexte que pour la DFT).

456 Concernant le fabricant de meubles, les problèmes posés sont liés à la détermi-
 457 nation d'un ordre de passage des produits devant des machines (stations) dans un
 458 contexte de juste à temps, l'ensemble des travaux de la littérature suggèrent des ap-
 459 proches de simulation en appliquant de simples règles de priorité. En particulier, (Hum
 460 *et al.*, 1997) évaluent plusieurs règles basées sur le nombre de kanbans pour définir
 461 l'ordre des produits en attente devant les stations. (Vinod *et al.*, 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'événements liés au fonctionnement du système en temps réel. (Artigues *et al.*, 2001) suggèrent une approche temps réel pour les problèmes d'ordonnancement 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.

7. Conclusion

Dans cet article, nous avons pu montrer en quoi le concept de Système Contrôlé par le Produit (SCP) pouvait être pertinent pour l'automatisation de ou pour l'assistance à la décision locale (à même le flux de produits) dans un contexte de Juste à Temps (JiT), d'une part, mais aussi pour la conception et l'évaluation de tels systèmes, d'autre part. 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 oeuvre 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 article (Pannequin *et al.*, 2009) 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 cet article, 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 (cas du fabricant de climatiseurs).

8. Bibliographie

- Artigues C., Roubellat F., *Ordonnancement d'ateliers en temps réel : Ordonnancement de la production*, Hermes Science Publications, Paris, 2001.
- Babiceanu R., Chen F., « Development and Applications of Holonic Manufacturing Systems : A Survey », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 17, n° 1, p. 111-131, February, 2006.

- 499 Belmokhtar S., Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., « Integer programming models for logical
500 layout design of modular machining lines », *Computers & industrial engineering*, vol. 51,
501 p. 502-518, 2006.
- 502 Bongaerts L., Monostori L., Mcfarlane D., Kadar B., « Hierarchy in distributed shop floor
503 control », *Computers in Industry*, vol. 43, n° 2, p. 123-137, October, 2000.
- 504 Boysen N., Fliedner M., Scholl A., « A classification of assembly line balancing problems »,
505 *European Journal of Operational Research*, vol. 183, p. 674-693, 2006.
- 506 Brennan R. W., « Performance comparison and analysis of reactive and planning-based control
507 architectures for manufacturing », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.
508 16, n° 2-3, p. 191-200, April, 2000.
- 509 Burbidge J., Falster P., Riis J., Svendsen O., « Integration in Manufacturing », *Computers in*
510 *industry*, vol. 9, n° 4, p. 297-305, 1987.
- 511 Buxey G., Slack N. D., Wild N., « Production flow line system design-a review », *AIIE Tran-*
512 *sactions*, vol. 5, p. 37-48, 1973.
- 513 Cavalieri S., Macchi M., P V., « Benchmarking the performance of manufacturing control sys-
514 tem : design principles for a web based simulated testbed », *Journal of Intelligent Manufac-*
515 *turing*, vol. 14, n° 1, p. 43-58, 2003.
- 516 Costanza J., *Just-In-Time manufacturing*, 3rd edn, excellence John Costanza Institute of Tech-
517 nology Inc, 1996.
- 518 El Haouzi H., Thomas A., « A Methodological Approach to Build Simulation Models of Ma-
519 nufacturing Systems with Distributed Control », *Interna-tional Conference on Industrial*
520 *Engineering and Systems Management, Marrakech, Morocco.*, 2005.
- 521 Ghosh S., Gagnon R. J., « A comprehensive literature review and analysis of the design, balan-
522 cing and scheduling of assembly systems », *International Journal of Production Research*,
523 vol. 4, p. 637-670, 1989.
- 524 Gouyon D., Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des
525 techniques de synthèse, PhD thesis, Université Heri Poincaré, Nancy I, December, 2004.
- 526 Hum S. H., Lee C. H., « JIT Scheduling Rules : A Simulation Evaluation », *International*
527 *Journal of Management Science*, vol. 26, n° 3, p. 381-395, 1997.
- 528 Koestler A., *The Ghost in the Machine*, Hutchinson & Co Ltd., London, UK, March, 1976.
- 529 Lapierre S. D., Ruiz A. B., « Balancing assembly lines : An industrial case study », *Journal of*
530 *the Operational Research Society*, vol. 55, p. 589-597, 2004.
- 531 Le Moigne J. L., *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*, Presse Universi-
532 taires de France, 1977. réédition de 1994. ISBN 2130384838.
- 533 Monch L., « Simulation-based benchmarking of production control schemes for complex ma-
534 nufacturing systems », *Control Engineering Practice*, vol. 15, n° 11, p. 1381-1393, 2007.
- 535 Morel G., Panetto H., Zaremba M., Mayer F., « Manufacturing Enterprise Control and Mana-
536 gement System Engineering : paradigms and open issues », *Annual Reviews in Control*, vol.
537 27, n° 2, p. 199-209, 2003.
- 538 Morel G., Valckenaers P., Faure J.-M., Pereira C. E., Dietrich C., « Manufacturing plan control
539 challenges and issues », *Control Engineering Pratique*, vol. 15, n° 11, p. 1321-1331, 2007.
- 540 Pannequin R., Morel G., Thomas A., « The performance of product-driven manufacturing
541 control : An emulation-based benchmarking study », *Computer in Industry*, 2009.

- 542 Pannequin R., Thomas A., « Centralized versus distributed decision, an industrial case », *11th*
 543 *IFAC Symposium on Information and Control Problem in Manufacturing INCOM'2004*,
 544 2004.
- 545 Scholl A., Becker C., « State-of-the-art exact and heuristic solution procedure for simple assem-
 546 bly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, n° 3, p. 666-693,
 547 2006.
- 548 Scholz-Reiter B., Gorldt C., Hinrichs U., « Simulation of a RFID-based KANBAN System for
 549 the Production Industries », *PPS MANAGEMENT*, vol. 13(2), p. 16-19, 2008.
- 550 Tempelmeier H., « Pratical considerations in the optimization of flow production systems »,
 551 *International Journal of Production Research*, vol. 41, p. 149-170, 2003.
- 552 Valckenaers P., Van Brussel H., Bongaerts L., Wyns J., « Holonic manufacturing systems »,
 553 *Integr. Comput.-Aided Eng.*, vol. 4, n° 3, p. 191-201, 1997.
- 554 Vinod V., Sridharan R., « Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-
 555 dependent setups : An experimental study », *Robotics and Computer-Integrated Manufac-*
 556 *turing*, 2007.