



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^{re} soumission à JESA, le 26 janvier 2009

35 **1. Introduction**

36 Depuis les années 80 nous avons vu se développer dans les industries diverses
37 applications des concepts du juste à temps (JiT). Les systèmes de production et de
38 logistique ont considérablement évolués pour assurer plus de réactivité, plus de flexi-
39 bilité. De systèmes centralisés et hiérarchisés pilotant entièrement les flux physiques
40 nous sommes passés à des modes de contrôle « hybrides » donnant aux opérateurs de
41 terrain plus d'autonomie et plus de responsabilités (les systèmes kanban en sont un
42 exemple bien connu). Nous avons donc migré vers des systèmes où la décision au-
43 tonome et locale, prise par les opérateurs essentiellement, est devenue possible. Ceci
44 a permis, entre autre, de supprimer des niveaux de prise de décision dans le système
45 centralisé, de simplifier les processus de contrôle en évitant de nombreuses boucles
46 de retour d'information (et donc d'améliorer la réactivité ou la vitesse de prise de
47 décision face à des perturbations), de simplifier aussi les nomenclatures (car de nom-
48 breuses étapes des processus de transformation n'étaient plus gérées par le MRP et
49 donc disparaissaient de celles-ci) et d'alléger par conséquent les bases de données.
50 Par la suite, on a constaté un manque de visibilité : les décisionnaires de production
51 et de logistique pilotaient alors des « boîtes noires » n'en contrôlant que les entrées
52 et sorties, car les opérateurs de manière autonomes modifiaient les plans prévus sans
53 leur demander leur avis. Nous avons observé dans les entreprises aussi un manque
54 d'optimalité : les opérateurs ne prenant des décisions qu'à partir d'une vision parti-
55 tielle du système, il est donc impossible d'assurer un taux de service client ou un taux
56 de charge d'un goulot, par exemple, (Scholz-Reiter *et al.*, 2008). Dans la mouvance
57 des initiatives liées au paradigme *Integration in Manufacturing* (IiM) (Burbidge *et*
58 *al.*, 1987), une forme d'automatisation de ces processus de terrain est alors apparue
59 depuis quelques années afin d'assurer de la visibilité, de la traçabilité et de fournir une
60 certaine aide à la décision locale, voire des propositions d'optima. L'apparition des
61 nouvelles technologies d'information et de communication, telles les RFID, devrait
62 permettre à terme de changer le processus classique de gestion de la production.

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

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

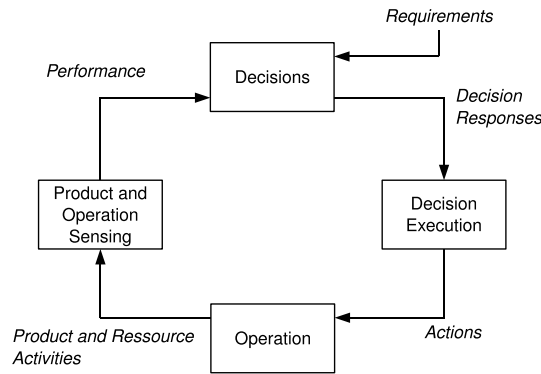


Figure 1. Boucle de contrôle incluant le produit informant

80 L'objectif de cet article est de montrer en quoi ce concept peut être particulière-
81 ment pertinent dans un contexte de JiT et quelles architectures sont alors nécessaires
82 pour permettre aux divers acteurs du processus de décision de piloter dynamiquement
83 les flux physiques. En s'appuyant sur une description de deux cas industriels, nous
84 introduirons le concept de « Systèmes Contrôlés par le Produit ». Nous spéci-
85 fierons l'architecture de contrôle proposée. Puis la dernière partie décrira l'application
86 envisagée dans les deux entreprises. Enfin nous concluons et proposerons des pers-
87 pectives qui s'appuient sur les limites de cette proposition.

88 2. Illustrations par deux cas industriels

89 2.1. Une entreprise de meubles en kanban

90 Le cas d'étude considéré est un atelier de fabrication de meubles en kits d'une
91 usine appartenant à un groupe industriel français. Cet atelier est composé de onze
92 centres de charge, regroupés en quatre îlots (Figure 2). Le premier îlot, de débit, re-
93 présente un processus disjonctif de découpe de grands panneaux en pièces. Chacun des
94 centres de charge est doté de fonctionnalités différentes et peut réaliser plusieurs opé-
95 rations. Par conséquent, de nombreux chemins sont possibles, et la complexité des flux
96 est accrue par la diversité et le volume de pièces : environ 70 lots de 400 pièces sont
97 lancés quotidiennement. L'opération terminale est l'emballage (Ilot 4) des différentes
98 colis, où les pièces sont regroupées par référence de colis. Cette opération représente
99 une convergence pour laquelle les flux de composants doivent être re-synchronisés, et
100 de ce fait, est le goulot du système. La grande quantité de références (1800 références
101 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.

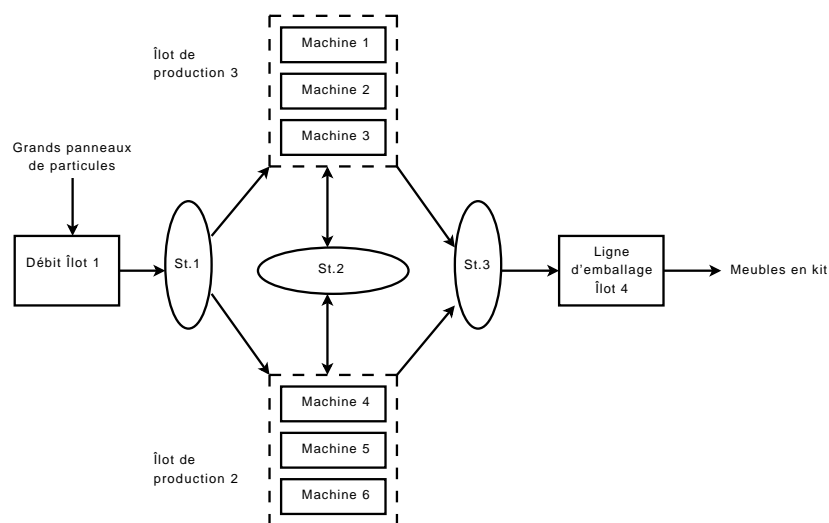


Figure 2. *Vue synthétique du système de production considéré*

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-

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

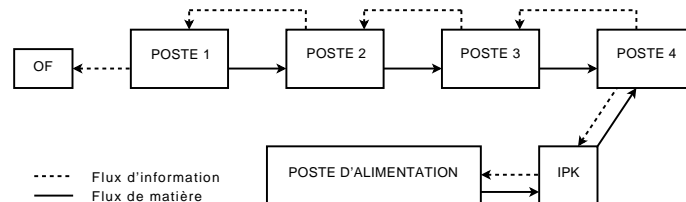


Figure 3. *Le mécanisme de synchronisation*

125 La synchronisation entre une ligne d'assemblage et ses lignes d'alimentation se
126 fait, pour éviter toute rupture, grâce à des signaux visuels, concrets par un emplace-
127 ment de stock dit « IPK » (In Process Kanban) qui est prévu entre la ligne d'assemblage
128 et le poste d'alimentation (Figure 3), la capacité de cet emplacement est variable
129 (de 1 à n produits). Cet IPK fonctionne, en fait, comme un kanban (l'appellation « kan-
130 ban physique » est quelquefois utilisée dans la littérature) : une consommation dans
131 celui-ci entraîne un appel de rechargement pour la ligne d'alimentation. Dans ce cas
132 d'étude, l'entreprise a donc installé un système JiT (DFT), mais est consciente d'un
133 certain nombre de difficultés résiduelles de contrôle, entre autres, la minimisation des
134 volumes de produits (qui peuvent être très volumineux) aux IPK.

135 3. Points communs et singularités

136 3.1. Points communs

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

143 3.2. Singularités

144 Il s'agit de décisions locales autonomes sur lesquelles nous avons choisi de tra-
145 vailler pour montrer l'intérêt d'un SCP. Dans le premier cas les opérateurs font « avan-
146 cer » les produits grâce aux étiquettes kanban en respectant un ordonnancement à
147 capacité finie défini pour la journée par le système centralisé. A l'intérieur de cette
148 journée ils pourront gérer diverses priorités de passage des lots sur les machines en

149 fonction des avances/retards que ces lots pourraient avoir pris ou des indisponibilités
 150 ressources qui pourraient survenir. Dans le deuxième cas, les opérateurs ont à gérer
 151 le respect strict du temps de cycle par leur mobilité d'un poste à l'autre, d'une part,
 152 et à gérer la synchronisation des lignes d'alimentation avec la ligne principale en cas
 153 d'aléas sur l'une de ces lignes, d'autre part. C'est sur ce deuxième aspect que nous
 154 avons choisi de focaliser notre application.

155 4. Les systèmes contrôlés par le produit

156 4.1. Concept

157 Ce concept s'appuie sur une interprétation du paradigme *Holonic Manufacturing*
 158 *Systems* (Koestler, 1976) pour expérimenter l'intérêt de rendre le produit, et au-delà
 159 l'ensemble du procédé, interactifs afin d'organiser de façon plus collaborative l'inter-
 160 opérationnalité des différents systèmes hétérogènes de contrôle et de gestion (APS,
 161 ERP, MES) composant la chaîne de production et de logistique des entreprises. Cette
 162 interprétation tire parti des progrès et de la miniaturisation croissante des technologies
 163 infotroniques (RFID, communications sans-fils, etc.) et mécatroniques (composants
 164 logiciels embarqués) pour faire de ce produit actif un objet composite assurant une
 165 relation récursive logiciel-matériel entre les services et les biens associés aux produits
 166 en reliant tout objet logique de contrôle ou de gestion à au moins un objet physique
 167 du procédé. Ce paradigme SCP, qui a conceptuellement guidé l'ensemble des tra-
 168 vaux du laboratoire (Morel *et al.*, 2003), (Gouyon, 2004), (Pannequin *et al.*, 2004),
 169 (Morel *et al.*, 2007) (Figure 4) est une alternative pragmatique pour permettre aux
 170 entreprises de migrer d'une organisation intégrée et centralisée vers une organisa-
 171 tion adaptable, puisque l'originalité de cette approche est de combiner des décisions
 172 centralisées prises a priori sur des horizons à moyen, voire à long termes, avec des
 173 décisions décentralisées prises « en exécution » sur des horizons à court terme, voire
 174 sur événements.

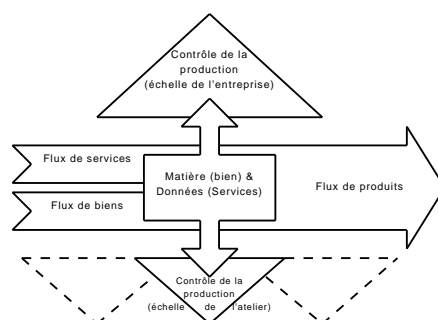


Figure 4. B2M interaction centered on holonic products (Pannequin *et al.*, 2004 adapté de Morel *et al.*, 2003).

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

181 4.2. Architecture proposée

182 Dans cette partie, nous allons décrire l'architecture proposée. Elle se veut adap-
 183 table à divers cas d'application relevant du domaine précédemment décrit. Elle doit
 184 à la fois permettre d'accompagner un projet de conception-intégration d'un SCP et
 185 permettre de piloter en phase d'exploitation un tel système conçu. Pour ce faire cette
 186 architecture devra aider à faire des choix technologiques en prenant en compte la
 187 dynamique du système réel (les files d'attente, la mobilité des hommes dans le sys-
 188 tème, les temps de réaction, etc.). Elle devra encore être mise en place, pour un cas
 189 industriel donné, dans un minimum de temps. Ainsi et compte tenu de ces objectifs
 190 évidents de réutilisabilité et de modularité (El Haouzi *et al.*, 2005), (Pannequin *et*
 191 *al.*, 2004), elle s'appuie donc sur un modèle d'émulation représentatif de l'atelier de
 192 production considéré et un système de contrôle de l'exécution qui intègre l'ensemble
 193 des règles de prise de décision. L'interface, basée sur un système d'information et
 194 une standardisation des interactions, permet l'interopérabilité et la synchronisation du
 195 modèle d'émulation et du système de contrôle. Cette architecture est également com-
 196 posée d'une bibliothèque de scénarii de test, et d'un module d'analyse a posteriori des
 197 résultats de simulation (Figure 5).

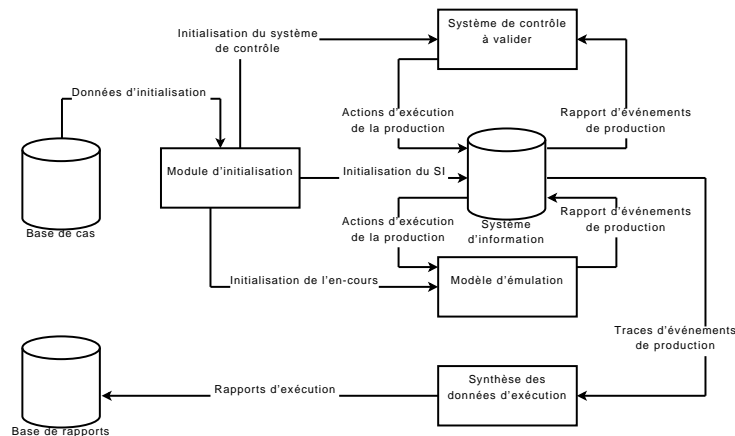


Figure 5. Modèle général d'architecture de contrôle centré sur le produit, Klein *et al.*, 2006.

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.

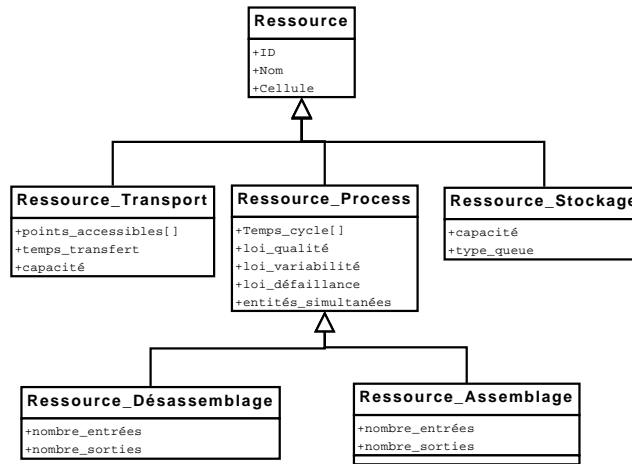


Figure 6. Attributs des objets d'émulation

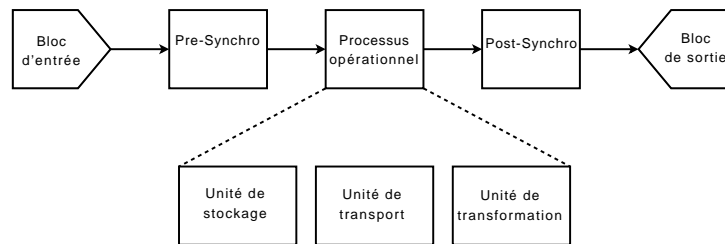


Figure 7. Structure d'un bloc de base du modèle d'émulation

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

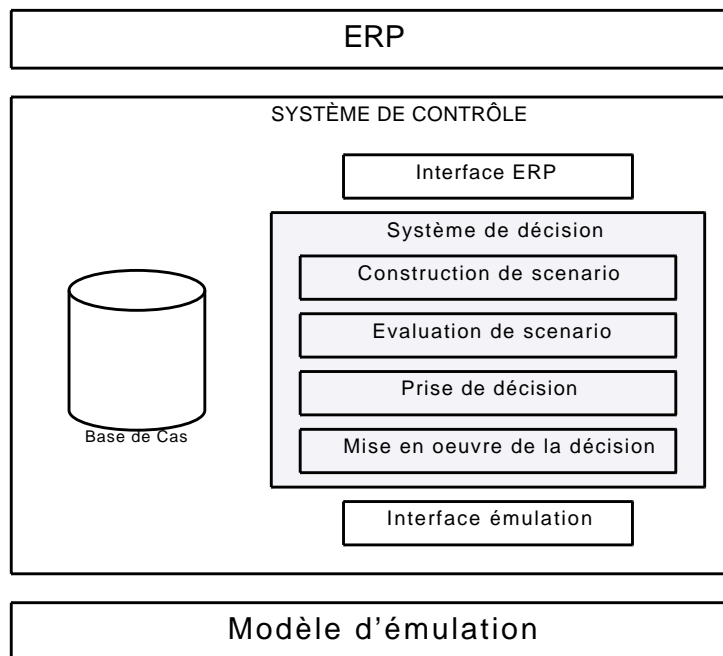


Figure 8. *Structure du système de contrôle*

247 à des états du système de production, un état initial typiquement. Notons cependant
 248 que pour assurer la généralité 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

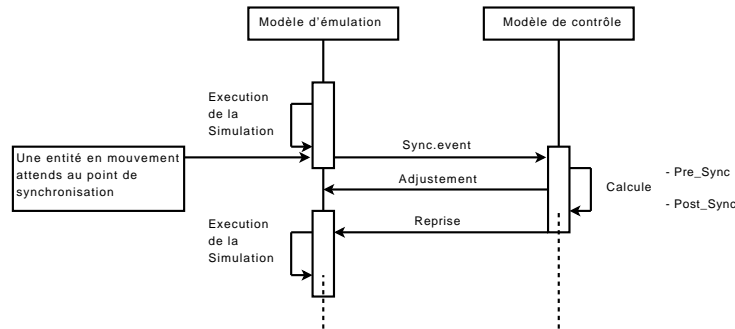


Figure 9. La procédure de synchronisation

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

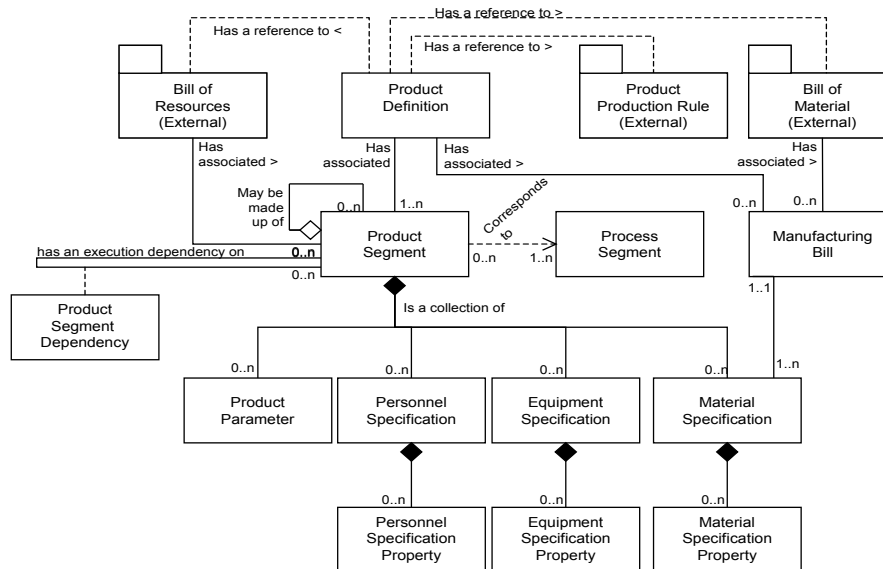


Figure 10. Structure générique du système d'information

289 suivre l'évolution du système.

290 – Un sous-système de traçabilité, permettant de mémoriser l'ensemble des évé-
 291 nements 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

304 l'avance (nombre d'étiquettes et tailles de lots constants ; autant d'étiquettes que de
 305 postes de charge utiles pour la gamme des pièces à fabriquer). En fait, un système
 306 de contrôle calcule et définit le nombre d'étiquettes à placer en début de process de
 307 fabrication pour assurer la réalisation du programme hebdomadaire. Une opération
 308 terminée sur un poste de charge entraîne le déplacement de l'étiquette sur le poste de
 309 charge suivant dans la gamme, donnant ainsi le signal d'autorisation de production
 310 pour la suite des opérations. Malgré l'aide apportée par les étiquettes kanban pour le
 311 contrôle physique de flux, il en subsiste des difficultés de gestion :

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

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

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

321 – Il n'y a pas de visibilité sur la chaîne logistique interne.

322 Pour pallier ces faiblesses nous avons proposé une application (nommée kanban2
 323 plus loin) dans laquelle les étiquettes kanban (et non pas les pièces) portent les in-
 324 formations et peuvent donc être à l'initiative de décisions locales. Cette application
 325 particulière du concept SCP se concrétise alors par une assistance à la prise de dé-
 326 cision dans la gestion des priorités des kanbans (ce sont les « kanbans qui prennent
 327 les décisions ») devant les postes de charge. C'est-à-dire que pour initier dans cette
 328 entreprise une automatisation des décisions prises « à même le flux physique », nous
 329 avons opté pour que ce soit les étiquettes kanbans qui portent les informations néces-
 330 saires à la visibilité totale du flux et au choix de priorités entre plusieurs kanbans, à
 331 l'endroit considéré. Le système de contrôle implémenté permet donc de reconsidérer
 332 l'ordonnancement local en prenant en compte l'impact sur le flux total (jusqu'à
 333 l'emballage).

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

338 En s'appuyant sur la bibliothèque de cas et la passerelle avec le système de contrôle
 339 mise en oeuvre (gestion centralisée de la génération et du placement en début de pro-
 340 cess de fabrication des étiquettes kanban nécessaires), des situations issues de la réalité
 341 ont été reproduites sur le modèle d'émulation. La validation de celui-ci a été menée
 342 par analyse de données : sur une période de trois mois de production, nous avons com-
 343 paré les résultats donnés par le simulateur aux faits réels. Les résultats sur la période
 344 couverte par la période de rafraîchissement de l'ordonnancement sont inférieurs à 5
 345 %, en terme de temps d'écoulement, et inférieur à 10% pour le nombre de palettes

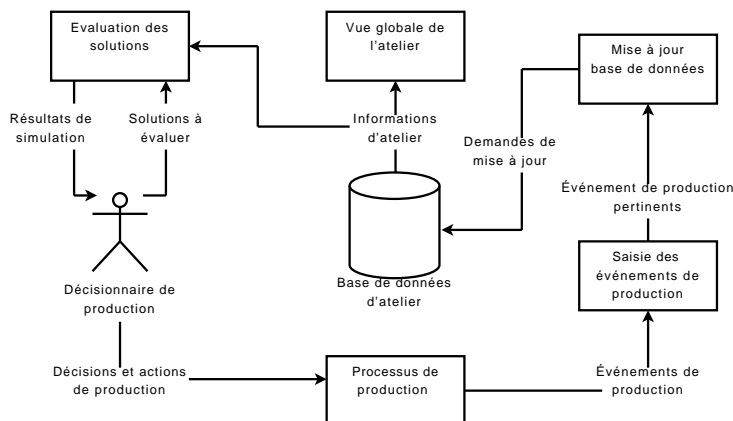


Figure 11. Architecture du système

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

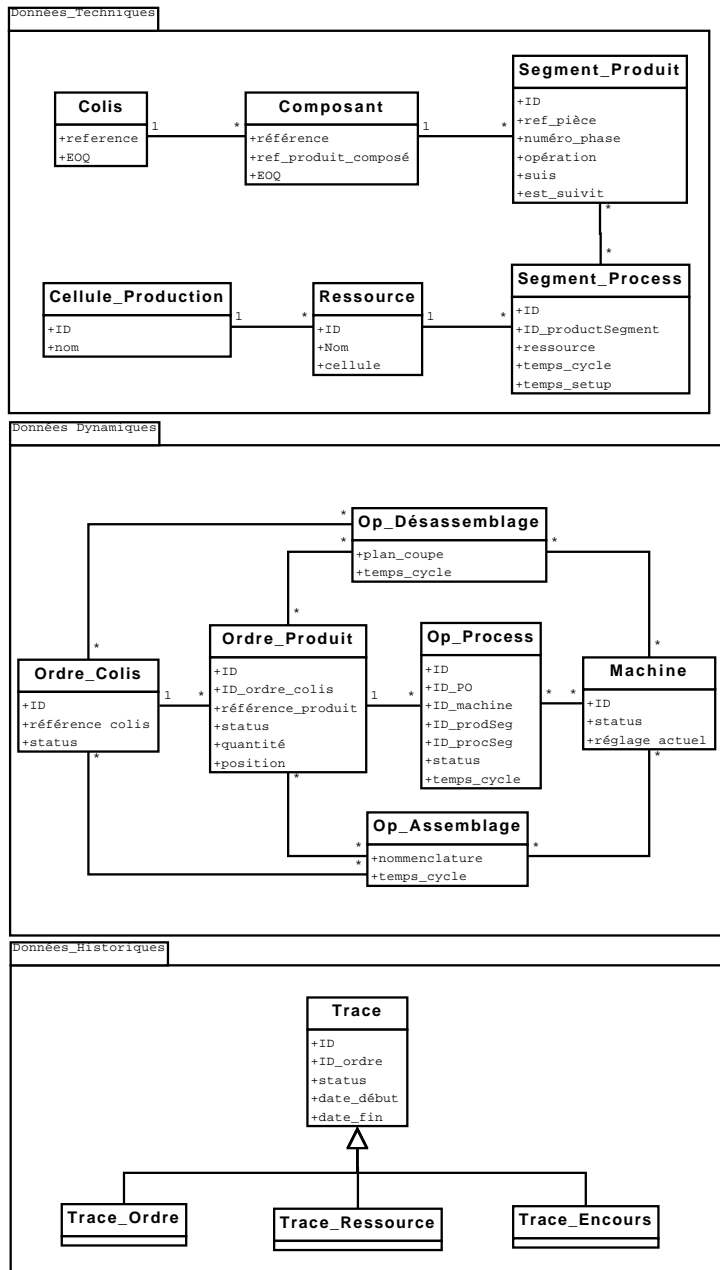


Figure 12. Structure du système d'information

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

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

374 5.2. Cas du fabricant de climatiseurs en DFT

375 Dans cette entreprise un pilote a été choisi pour implémenter l'approche SCP. Il
376 s'agit d'une ligne d'alimentation de 4 postes de travail alimentant deux lignes d'as-
377 semblage dans deux usines différentes (Figure 13). Issu de l'ERP, le Programme Di-
378 recteur de Production (PDP) donne le travail hebdomadaire de la ligne d'assemblage
379 du site A. Ce PDP est le niveau le plus bas du système de gestion centralisé (ERP). Des
380 Ordres de Fabrication (OF) sont aussi envoyés par anticipation à la ligne d'alimenta-
381 tion afin d'assurer la disponibilité des composants. La gestion distribuée de cette ligne
382 d'alimentation est nécessitée par la volonté de réduire les stocks aux points de syn-
383 chronisation (IPK). Lors de la phase d'évaluation de pertinence du SCP sur ce pilote,
384 il a été nécessaire d'émuler diverses hypothèses de positionnement des points de trans-
385 mission d'informations des produits vers le système de contrôle, car ceux-ci avaient
386 un impact sur les indicateurs de performance (délais, niveaux de stock d'en-cours,
387 etc.), ce que nous montrons par la suite en terme d'application.

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

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

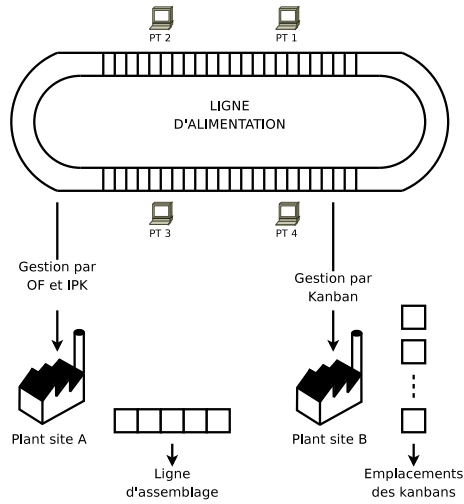


Figure 13. Vue du pilote

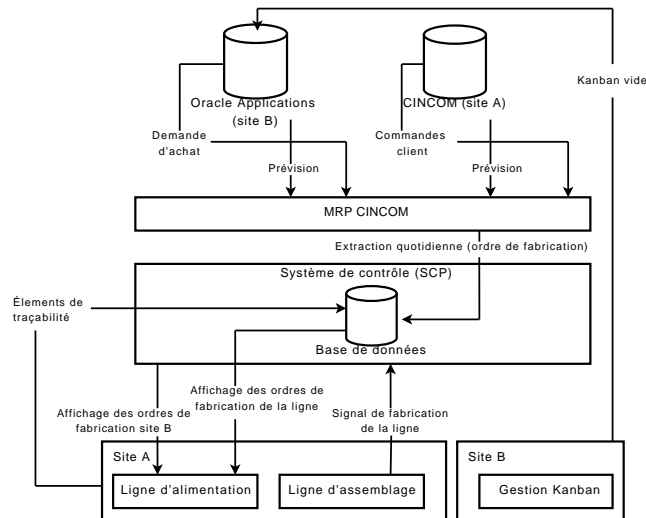


Figure 14. Architecture générale du système pour les lignes d'assemblage en DFT

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).

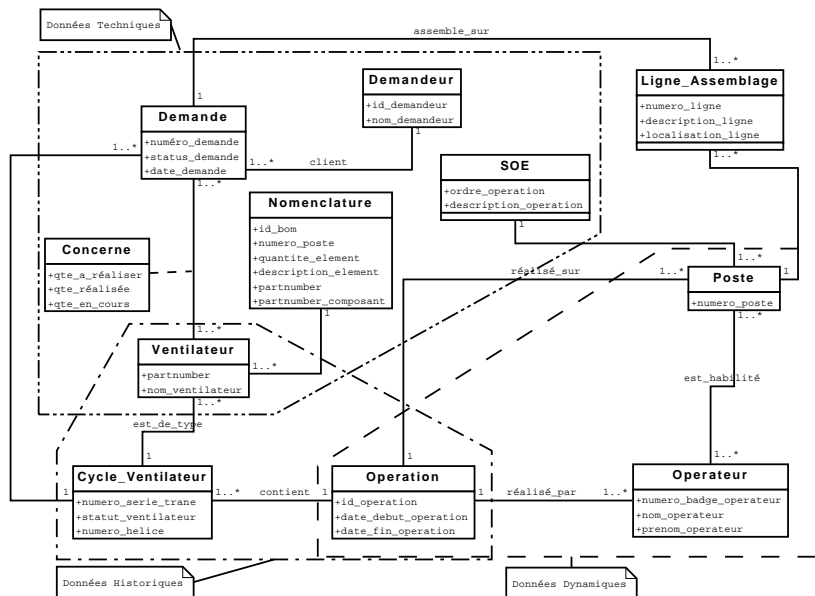


Figure 15. Structure du système d'information

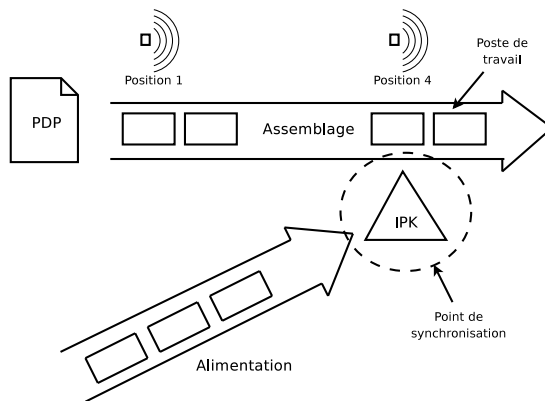


Figure 16. Les scénarii de positionnement des lecteurs

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

402 sur la ligne d'assemblage qui dans les deux cas a réalisé son PDP. Par contre, sur la
 403 ligne d'alimentation l'hypothèse H2 permet de minimiser les délais d'obtention et les
 404 niveaux de stock des IPK (ligne pointillé Figure 17b).

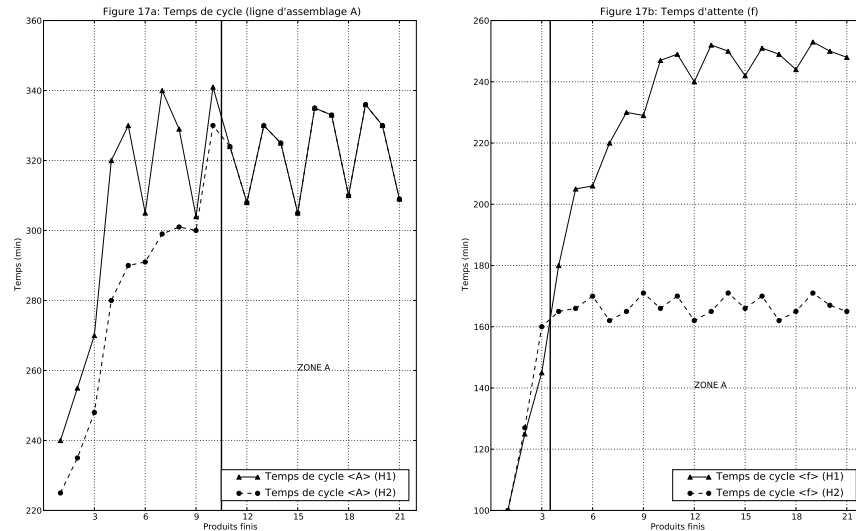


Figure 17. Résultats d'analyse

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

417 Ceci étant fait, il est désormais possible de faire prendre les décisions au système
 418 de contrôle intégré à la base de données (fonction principale du SCP). En effet, cette
 419 dernière centralise les informations issues du site B par le flux de retour des kanbans
 420 vides qui transitent par la base Oracle, d'une part, alors que les informations terrain
 421 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

462 nouvelles règles de priorité basées sur les temps de préparations pour un problème de
463 job shop avec temps de préparation dépendant de la séquence. Les auteurs mènent une
464 étude expérimentale sous des conditions liées à la charge de l'atelier, ratios des temps
465 de préparations et aux dates échues.

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

474 7. Conclusion

475 Dans cet article, nous avons pu montrer en quoi le concept de Système Contrôlé par
476 le Produit (SCP) pouvait être pertinent pour l'automatisation de ou pour l'assistance à
477 la décision locale (à même le flux de produits) dans un contexte de Juste à Temps (JiT),
478 d'une part, mais aussi pour la conception et l'évaluation de tels systèmes, d'autre part.
479 Ces derniers étant par définition des systèmes hybrides, à savoir, des systèmes dans
480 lesquels des décisions indépendantes sont prises sur le terrain à l'intérieur d'un cadre
481 d'autonomie autorisé par le système centralisé.

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

485 Dans un autre article (Pannequin *et al.*, 2009) nous avons proposé une méthodolo-
486 gie de déploiement de ce type d'architecture dans divers contextes industriels.

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

494 8. Bibliographie

- 495 Artigues C., Roubellat F., *Ordonnancement d'ateliers en temps réel : Ordonnancement de la*
496 *production*, Hermes Science Publications, Paris, 2001.
- 497 Babiceanu R., Chen F., « Development and Applications of Holonic Manufacturing Systems :
498 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 Lapiere 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., « Practical 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.