



La simulation pour les système pilotés par le produit

Pierre Castagna, André Thomas, Pascal Blanc, Olivier Cardin, Rémi Pannequin, Hind El Haouzi, Thomas Klein

► To cite this version:

Pierre Castagna, André Thomas, Pascal Blanc, Olivier Cardin, Rémi Pannequin, et al.. La simulation pour les système pilotés par le produit. Caroline Thierry, André Thomas, Gérard Bel. La simulation pour la gestion des chaînes logistiques, Hermes science - Lavoisier, pp.261-296, 2008, Traité IC2 Information - Commande - Communication, série Systèmes Automatisés. hal-00341856

HAL Id: hal-00341856

<https://hal.science/hal-00341856>

Submitted on 26 Nov 2008

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.

Chapitre 8

La simulation pour les systèmes pilotés par le produit

8.1. Introduction

La mondialisation a conduit les entreprises à devenir de plus en plus agiles et réactives pour faire face aux fluctuations de la demande et à la personnalisation toujours plus poussée des produits. En effet, les marchés de production de masse ont évolué vers des marchés de produits de plus en plus adaptés aux demandes spécifiques des clients, mais la production en personnalisation de masse induit une grande variété des produits à faibles coûts. L'évolution de cette typologie de marché implique pour l'entreprise une réponse rapide en terme de livraison. Le problème majeur pour une réponse efficiente vient de l'inertie du système global. Durant des années, beaucoup d'efforts ont été faits pour assurer une meilleure réactivité à ces systèmes (par l'initiative de « fabrication flexible », par exemple), mais les processus de prise de décision en fabrication n'ont pas réellement changé et ils ne semblent plus vraiment remplir les conditions pour de tels objectifs.

Par ailleurs, de nouvelles technologies et de nouveaux logiciels sont apparus, offrant de nouvelles potentialités utiles pour ces objectifs de réactivité et de flexibilité. Face à ces nouvelles tendances, de nombreuses recherches se sont focalisées sur les technologies d'identification, telles les technologies Auto-Id, la biométrie, la vision, etc. Aujourd'hui les technologies RFID (*Radio Frequency Identification*) sont une manière sûre et rapide de suivre le produit, ouvrant la voie à la résolution du problème, vieux de 50 ans, de synchronisation, de lien entre les flux

Chapitre rédigé par Pierre CASTAGNA, André THOMAS, Pascal BLANC, Olivier CARDIN, Rémi PANNEQUIN, Hind EL HAOUZI et Thomas KLEIN.

physique et informationnel, procurant ainsi une vision exacte et en temps réel du « vécu de l'atelier ». Ces nouvelles technologies agissent comme un catalyseur dans l'amélioration des modes de pilotage des traditionnels systèmes MRP.

Il y a un large consensus dans la communauté IMS (Intelligent Manufacturing System), concernant le pilotage holonique, la gestion de la production et les entreprises virtuelles [BAB 06], sur le fait que la combinaison d'agents logiciels et de technologies infotroniques (telles les RFID) doivent permettre d'obtenir plus de réactivité et d'adaptabilité, nécessaires à la plus grande personnalisation des biens et des services.

Toutefois, Marik [MAR 07] signala qu'il y a encore beaucoup de travail à faire avant que les architectures « hétérarchiques » soient réellement efficaces dans un environnement industriel. Bien que beaucoup de problèmes aient été résolus, des solutions telles que les technologies agents ne sont pas encore suffisamment sûres et puissantes à l'échelle de ces problèmes pour une prise de décision complètement distribuée.

Un autre enjeu est alors de démontrer l'équilibrage correct entre les capacités de pilotage centralisé et distribué, pour les agents de prise de décision capables d'interagir, les uns entre les autres, du niveau opérateur acteur d'un processus au niveau du produit, (et réciproquement). Cela signifie qu'il faut comparer les architectures centralisées *versus* hétérarchiques. La simulation de flux semble alors être un bon moyen pour analyser et comparer des scénarii de prise de décision face au moyen centralisé et traditionnel de pilotage.

8.2. Les architectures de pilotage des systèmes de fabrication

8.2.1. Les architectures de pilotage hiérarchiques

L'organisation d'entreprise est traditionnellement hiérarchique. Dans celle-ci les hauts niveaux de décision ont une vision globale de tout le système. La plupart des fonctions de gestion d'une entreprise sont structurées de manière hiérarchique. Compte tenu du fait que notre objet est le pilotage de flux, nous nous intéressons essentiellement à la fonction planning. Le modèle très utilisé dans ce domaine est le MRP² [VOL 97]. Son objectif est de répondre aux questions *quoi, quand* et *combien produire*, compte tenu des prévisions de ventes, des demandes fermes clients et des capacités de production réelles (figure 8.1). Les décisions de hauts niveaux sont de long terme et macroscopiques et deviennent de plus en plus détaillées et de court terme (ordonnancement d'atelier) dans les niveaux bas de prise de décision.

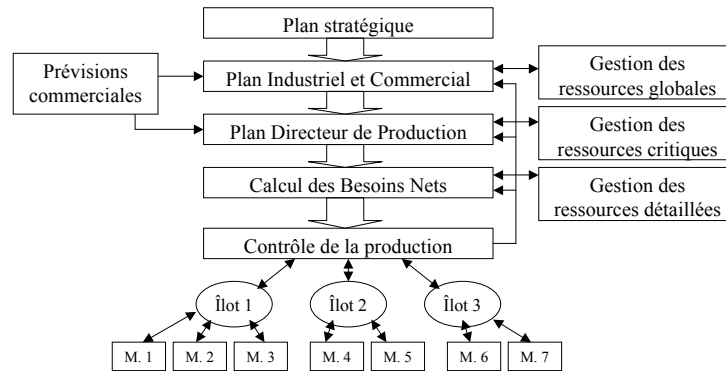


Figure 8.1. *Système MRP² de gestion de la production*

Cette structure hiérarchique permet de coordonner les différents plans entre eux et d'atteindre un optimum global par le fait que le décideur peut prendre des décisions pertinentes sur la base d'informations adaptées (figure 8.1). Ce processus *Top-down* assure la cohérence entre charge et capacité (problème d'équilibrage charge/capacité) à chaque niveau de décision, explosant ce problème complexe en problèmes plus simples et plus petits. Par ailleurs, si un événement particulier survient à l'atelier, l'information devra « remonter » dans le système. Ceci peut prendre un temps plus ou moins important et conduire à une décision de réaction trop tardive. Pour réduire ce manque de flexibilité, les architectures de pilotage ont évolué vers des systèmes moins rigides, auto-organisés, hétérarchiques.

8.2.2. Les architectures de pilotage hétérarchiques

Les systèmes hétérarchiques de pilotage de la production s'appuient sur le principe de distribution de toutes les décisions sans vision centralisée de l'état du système physique réel. Dans ce domaine, une des approches les plus utilisées implique l'usage de systèmes multi-agents (MAS), qui s'opposent radicalement aux systèmes hiérarchisés. Les recherches dans ce domaine ont débuté dans les années 1980, avec en particulier pour le niveau atelier des initiatives telles YAMS (*Yet Another Manufacturing Systems*) [PAR 87]. L'architecture multi-agents repose sur le concept d'une intelligence collective du système, émergeant des interactions entre agents. Ceci suppose que les agents soient capables de percevoir leur environnement et d'agir sur celui-ci. Un système de production hétérarchique est habituellement composé d'agents ordres et d'agents postes de charge, ils utilisent un protocole de négociation tel le *Contract Net Protocol* [SMI 80], pour planifier la charge de travail des différentes ressources.

Le problème majeur des MAS est que chaque décision est prise localement, par un ou plusieurs agents, chacun d'eux n'ayant qu'une vision partielle du système global. Par conséquent, il est impossible d'assurer que la solution de pilotage proposée soit optimale. Ainsi, comme [VAL 97] l'ont montré, « l'indépendance des agents interdit l'usage d'informations globales » dans de telles architectures, « rendant impossible des ordonnancements centralisés ou des planifications partagées de ressources ». De plus, des problèmes comme des blocages peuvent apparaître quand la taille de ces systèmes augmente (un blocage est une situation où deux ou plusieurs actions en « compétition » attendent simultanément que l'autre finisse).

8.2.3. Les architectures de systèmes pilotés par le produit

Telles que stipulé en sections 8.2.1 et 8.2.2, les approches hiérarchiques et hétérarchiques présentent avantages et inconvénients. En conséquence, l'idée de coupler ces deux systèmes émergea rapidement, avec pour objectif d'assurer un optimum global tout en gardant la réactivité des systèmes hétérarchiques. Une des majeures tentatives dans ce domaine sont les systèmes holoniques (*Holonic Manufacturing Systems* : HMS) [McF 03] [VAL 06] [MOR 03]. Le terme holon vient du grec *holos*, signifiant *tout*, et du suffixe *on*, signifiant *particule*. Le concept d'holon a été suggéré par Koestler [KOE 67] pour décrire une entité de base d'une organisation biologique ou d'un système social. Koestler observa qu'il n'existe pas d'entité indépendante dans de tels systèmes. Chaque entité pouvant faire partie d'une autre plus grande et pouvant en contenir d'autres plus petites. Le paradigme HMS repose sur la transposition de ce concept dans les systèmes de production, intégrant une hiérarchie dans des systèmes distribués pour combiner réactivité face aux perturbations avec un niveau élevé de performance en prédiction. Parmi les architectures holoniques existantes, on trouve PROSA (*Product Resource Order Staff Agents*) [VAN 98], qui se base sur 4 types d'agents, trois qui représentent des entités de fabrication (figure 8.2), ce sont les ordres, les produits et les ressources et un agent *staff* qui coordonne les autres.

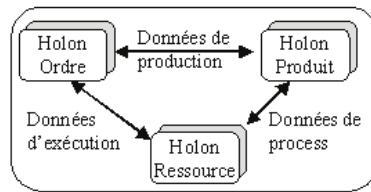


Figure 8.2. Les blocs de construction d'un HMS avec leurs relations

Les holons ordres, produits et ressources sont respectivement en charge des aspects logistiques, produits et *process*, ainsi que de l'optimisation du pilotage des ressources, telle que le contrôle optimal de la vitesse d'une machine ou la maximisation de l'usage de sa capacité. Le 4^e type d'agent, l'holon *staff*, conseille les autres sur les caractéristiques du système de production, telles les priorités d'ordonnancement par exemple.

L'apparition ces dernières années des technologies d'identification, telles les RFID (*Radio Frequency Identification*) a permis d'envisager de réelles implémentations de ce type d'architecture, grâce à l'identification unique des produits et au fait qu'il puisse être doté de capacités de traitement.

Les technologies auto-ID sont communément constituées de deux types de composants : un lecteur et un transpondeur. Le principe physique des technologies RFID n'est pas l'objet de ce chapitre, aussi nous pouvons juste le synthétiser par le fait qu'un produit portant une étiquette électronique (appelé aussi transpondeur, ou *tag*) peut véhiculer ses propres informations. La mémoire associée au produit comporte au moins un code d'identification (sur quelques bits), mais peut cependant avoir une capacité de stockage de plusieurs kilo-octets. Par ailleurs, les lecteurs sont chargés de relier les tags au système d'information. Comme toutes les nouvelles technologies, plusieurs types de matériels coexistent à ce jour, par exemple plusieurs fréquences sont utilisées, certaines partout dans le monde et d'autres très localement.

Certaines normes définissent les interfaces entre lecteur et tag ; en particulier la norme ISO 18000 [ISO 04]. Mais la standardisation du système d'information progresse toujours et l'EPC Global¹ semble être la plus adoptée aujourd'hui.

L'identification des articles individuellement augmente considérablement la visibilité dans les chaînes logistique [McF 02]. Si on néglige les erreurs de lecture, les technologies RFID permettent vraiment de synchroniser les flux d'information avec les flux physiques, par le fait de connaître, en détectant en temps réel les changements, les positions de chaque produit. Face à cela, l'identification de l'article permet de s'assurer que les processus de prise de décision sont mis en œuvre avec des données exactes, évitant de vendre aux clients des produits qui ne sont encore en stock ou de les reproduire s'ils sont déjà fabriqués. Beaucoup d'études analytiques faites dans ce domaine montrent que l'utilisation des RFID améliore considérablement la disponibilité des produits [KAN 04] [SAH 05] [LEE 04]. Notons que ces études étaient statiques et qu'elles ne permettaient pas de considérer les effets dynamiques de l'exactitude et de la disponibilité des informations. En utilisant la simulation, les auteurs montrèrent que cette

1. « The EPC Global Network », 2004. <http://www.epcglobalinc.org/>

augmentation de la précision due aux RFID permettait de réduire de moitié les stocks de produits finis sans avoir de ruptures. Joshi [JOS 00] utilisa aussi la simulation pour évaluer la visibilité de l'information tout au long de la chaîne logistique.

Nous pouvons noter que l'enjeu majeur des RFID réside dans l'impact de l'amélioration de l'exactitude du système d'information en vigueur, mais personne ne considère l'option de changer radicalement de processus de pilotage des flux. Quelques travaux se sont portés sur l'évaluation d'architectures de pilotage activant le même système opérant. Brennan [BRE 01] proposa un outil de comparaison de performances, basé sur la simulation, mais pour lequel le système représenté était adapté pour remplir parfaitement les objectifs. Par exemple, le postulat d'embarquer des RFID conduisant « à rendre intelligent » le produit, permet l'implémentation de systèmes pilotés par le produit [WON 02] [MOR 03]. Dans un premier temps, cela sera possible par des mécanismes de collaboration qui associent à chaque produit un agent informatique. Considérant cela, le produit passe donc d'un rôle d'entité basique fabriquée à un outil de synchronisation entre les flux physique et informationnel. Effectivement, l'information concernant un produit ne peut être désynchronisée si elle est portée par le produit lui-même. De plus, le « produit intelligent » pourrait prendre même des décisions à l'atelier en fonction des événements vécus. Ces décisions pourraient être, *via* le produit, synchronisées avec celles venant de l'ERP (le système centralisé).

Quelques travaux de recherche montrent que le produit pourrait être une solution aux problèmes d'intégration de systèmes *Business to Manufacturing* (B2M) [GOU 04], changeant en cela la vision de la traditionnelle pyramide de la structure de gestion d'entreprise (figure 8.3).

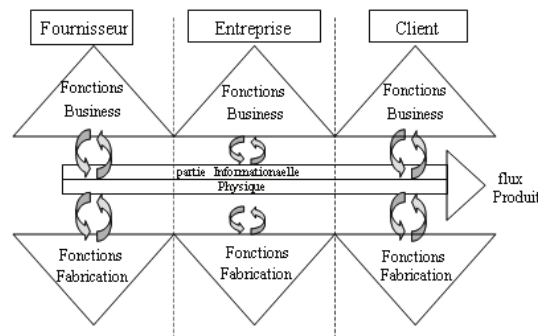


Figure 8.3. La chaîne logistique pilotée par le produit

Pour cela la simulation peut permettre d'atteindre différents buts :

- valider le concept holonique et étudier sa possible adaptation aux systèmes réels. La simulation permettra de montrer les performances de tels systèmes en comparaison aux systèmes hiérarchiques. Dans les systèmes hétérarchiques, le comportement global émerge des comportements locaux. En dehors de la simulation, peu de moyens existent pour analyser le comportement global ;
- créer un système d'aide à la décision pour les HMS. Un problème important des HMS réside dans le processus de prise de décision du fait de la vision locale. En conséquence, il est impossible d'assurer qu'une solution globale optimale soit élaborée. La simulation peut donc être un outil très utile pour aider le décideur à estimer l'impact futur de ses décisions. Il s'agit là du concept de simulation proactive.

8.3. Validation par simulation d'un HMS ou d'un système piloté par le produit

Le pilotage d'atelier par un HMS est assez différent du pilotage par un système hiérarchique traditionnel. En effet, l'utilisation de l'émergence, dans lequel la solution de pilotage est générée en cours du fonctionnement, est tout à fait nouvelle, comparé aux systèmes prédictifs classiques, dans lesquels les solutions sont générées *a priori* par des algorithmes puissants.

Il y a un réel besoin de valider une telle proposition, d'étudier son applicabilité à des systèmes réels, ainsi que de démontrer ses meilleures performances par rapport aux systèmes hiérarchiques. Valckenaers *et al.* [VAL 97] ont identifié trois sortes d'approches pour valider cette pertinence :

- implémentation sur une plate-forme de laboratoire,
- implémentation sur un projet pilote dans un atelier,
- utilisation de modèles de simulation.

Déterminer et mettre en place un système de pilotage nécessite des conditions expérimentales stables et reproductibles. Pour autant, on ne peut garantir que le système physique concerné permettra la répétabilité des expériences. De plus, le coût de la mise en place d'un pilote à l'atelier avec l'informatique nécessaire semble être prohibitif à ce jour. Il semble donc que la simulation puisse être une bonne réponse.

L'utilisation de plate-formes devrait permettre d'aborder des problèmes intéressants, en permettant de reproduire des perturbations proches d'événements réels, mais le faire à l'échelle des problèmes industriels semble encore difficile. En effet, il est dans ce contexte réellement important de mettre en œuvre ces

technologies, telles les RFID, en prenant en compte les phénomènes proches de la réalité, ne serait-ce que pour valider les taux de lecture, par exemple.

L'utilisation d'un modèle de simulation permet d'étudier des systèmes de pilotage à cette échelle si le modèle reflète la complexité industrielle. Correctement développé, un modèle de simulation devrait être, tel un émulateur, capable de vérifier et mettre au point un système de pilotage avant de le *pluger* sur l'atelier réel.

8.3.1. Le concept d'émulation

Un modèle d'émulation ne doit contenir aucune règle de décision, c'est-à-dire que chaque point où une décision doit être prise sera converti en un point de synchronisation: un message, appelé « événement de synchronisation », est envoyé au modèle de pilotage et à ce moment, l'exécution est mise en pause jusqu'au retour de l'ordre correspondant. A la réception d'un événement de synchronisation, le modèle de pilotage calcule puis envoie des informations ou des paramètres au modèle d'émulation dans l'objectif de le piloter. Par exemple, devant une machine, le modèle de pilotage envoie le programme de celle-ci, ou au moment de sortir d'un point de stock, il envoie les informations sur l'étape suivante du processus où les pièces doivent être envoyées.

La méthodologie propose pour la construction d'un modèle d'émulation est basée sur la décomposition systémique du système de production [MOI 84]. Puisque ce sont les produits qui sont le centre d'intérêt de notre approche, nous avons souhaité représenter leur évolution physique. Ces évolutions peuvent être modélisées comme des transformations de forme, d'espace et de temps [PAN 07], [KLE 07].

Ainsi la première étape de la méthodologie de modélisation est l'analyse du système de production (atelier) afin de déterminer toutes les étapes du cycle de vie produit possibles. Une approche « état-transition » est utilisée, l'état correspond aux positions et formes stables du produit, alors que les transitions représentent les transformations morphologiques et spatiales possibles.

Dans une seconde étape, nous cherchons à modéliser l'activation des produits. Les transitions entre les différents états des produits sont implémentées par les équipements de l'atelier. Par conséquent nous avons mis en œuvre deux blocs génériques de modélisation, des *transformations de forme et d'espace*. Ces blocs doivent pouvoir prendre en compte les contraintes physiques du type temps de cycle, temps de réglage, capacité, etc. De plus un troisième bloc a été défini, une *transformation de temps*, utilisée pour modéliser des produits qui attendent entre deux autres transformations.

Chaque transformation de forme et d'espace a une interface qui permet à un système externe en interaction de la piloter. Des messages de contrôle permettent d'envoyer des requêtes pour lancer l'opération. Par opposition, des messages de compte-rendu permettent de savoir l'état courant de la transformation. L'utilisation de ces trois blocs de base permet la description générique de tout atelier.

Au final, le modèle d'émulation, pour être complet, doit comprendre un moyen d'observer les produits. Ainsi, la troisième étape de la méthodologie concerne la détection des produits. Ces blocs de base incluent des lois physiques, telles les spécifications de détection ou de portée. Un tag RFID est un exemple-type d'un équipement d'atelier modélisé comme un détecteur de produit.

En conclusion, ces blocs de modélisation permettent de construire des modèles d'émulation selon un point de vue logistique. Ils permettent de modéliser des lois de la physique contraignant l'activation des produits, leurs transformations et leurs détections tout en offrant des interfaces avec les pilotes et les capteurs.

8.3.2. La modélisation de simulation avec un émulateur et un système de pilotage

8.3.2.1. Le modèle d'émulation

Comme cela a été évoqué précédemment, chaque type d'élément du système physique est représenté par un bloc de base, qui peut être réglé en fonction de ce système physique (taille de lots, temps de transfert, etc.). Un bloc de base est constitué de cinq composants (figure 8.4) :

- un label d'entrée,
- un premier point de synchronisation, appelé pré-synchronisation, en charge d'activer correctement la ressource concernée,
- un bloc générique représentant le *process* mis en œuvre, tel qu'on le fait dans un modèle de simulation standard,
- un second point de synchronisation, appelé post-synchronisation, permettant l'évacuation de la pièce et le lancement du prochain travail à faire sur la machine,
- un point de sortie où l'entité est « routée » à l'étape suivante.

La procédure de synchronisation est assez simple : si une entité en mouvement arrive à un point de synchronisation, un message de blocage de l'entité et d'identification de la localisation est envoyé au système de contrôle, alors l'entité est maintenue en position jusqu'à ce que le système de contrôle renvoie un ordre de mouvement.

La procédure est montrée à la figure 8.5. Le nombre de type d'événements est fini : nous pouvons en définir un pour la pré-synchronisation et un pour la post-synchronisation de chaque ressource.

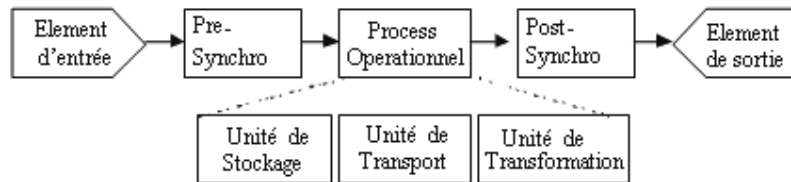


Figure 8.4. Les composants des blocs de base

En opposition aux modèles de simulation classiques, les entités en mouvement ont seulement un seul identifiant, lequel se réfère à la donnée correspondante dans le modèle de contrôle. En conséquence, le modèle d'émulation ne peut fonctionner sans un modèle de contrôle, du fait que les données relatives à une entité ne sont pas stockées en tant qu'attribut (de cette entité) mais intégrées dans une base de données du modèle de pilotage.

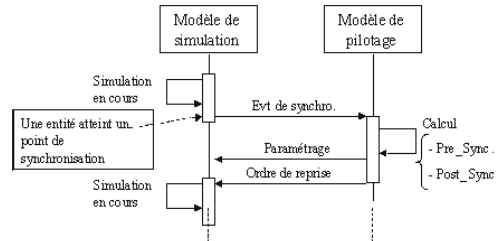


Figure 8.5. Procédure de synchronisation

8.3.2.2. Le modèle de pilotage (de contrôle)

Le modèle de pilotage est un système à événements discrets qui réagit aux événements venant du modèle d'émulation, d'un utilisateur ou d'une autre quelconque source. Pour être capable de prendre des décisions, le modèle de pilotage a besoin d'une représentation du système physique et du *process* de prise de décision. Ces éléments peuvent être séparés ou non.

Pour assurer l'échange entre les deux modèles, une interface de communication a été définie, ceci permet des messages standards entre ces deux modèles. Ceux-ci contiennent les informations suivantes :

- l'identifiant du point de synchronisation qui permet d'identifier la ressource, son type et le type de synchronisation (pré ou post) ;
- l'identifiant de l'entité qui pointe sur la description de celle-ci dans la base de données.

Ces informations permettent au modèle de pilotage de mettre à jour le système d'information et de mettre en œuvre la décision attendue. Cette décision conduit au paramétrage du modèle d'émulation (choix de la route ou du *process*) et alors un « signal de reprise » permettra à la simulation de reprendre son cours.

Le premier modèle de pilotage que nous avons conçu représente un système industriel réel.

Une méthode de modélisation orientée-objet a été choisie dans lequel les composants du système et les entités en mouvement ont été modélisés en tant qu'objets (figure 8.6). Les données relatives à ces objets sont stockées en tant qu'attributs et les *process* de décision sont inclus dans les méthodes.

Les produits sont représentés en tant que classes « pièces » ou « lots de pièces ». Ils contiennent seulement des attributs et des méthodes pour initialiser ou mettre à jour ces attributs.

Par ailleurs, des attributs relatifs aux ressources et des méthodes de décision sont attachés aux blocs pré et post-synchronisation.

Généralement, la procédure de pré-synchronisation dépend de la mise à jour du statut des produits et d'un paramétrage d'une ressource (temps opératoire, capacité, taille de lot, lois de distribution des temps morts).

Les règles de décision sont intégrées à la procédure de post-synchronisation qui doit piloter le lot de pièces et affecter une nouvelle tâche à la ressource.

Les objets « pièces » avec les objets « localisation » correspondent à là où elles sont, *via* la classe « opération ». L'ensemble d'objet « opération » permet de réaliser la traçabilité, aussi bien relative aux ressources (*tracking*) qu'aux produits (*tracing*).

Ces informations peuvent, bien sûr, être enrichies par une description de l'opération ou de toute autre information pertinente.

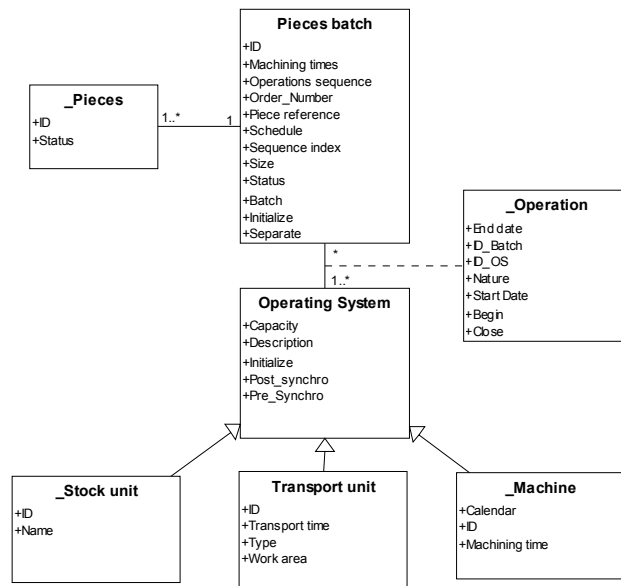


Figure 8.6. Modèle du système de contrôle

8.4. La simulation : un outil d'aide à la décision pour les systèmes contrôlés par le produit

De par la distribution de l'intelligence qui les caractérise, les systèmes contrôlés par le produit remplacent des décisions prédictives par des décisions réactives et locales. Nous pourrions ainsi penser que toutes les décisions globales seraient appelées à disparaître. Mais ceci n'est pas vrai. En effet, à la base du concept de *supply chain* on trouve nécessairement une vision globale du système industriel. Un objectif important de cette *supply chain* est « d'améliorer les flux de produits entre les fournisseurs et les clients le plus rapidement possible » [PRO 06]. Cet objectif implique des décisions managériales globales qui ne pourraient disparaître complètement dans un système industriel piloté par le produit. De plus, même des décisions prises localement nécessitent parfois la connaissance du comportement global du système.

Dans un système contrôlé par les produits, ces derniers utilisent des règles de décision. Pour prendre sa décision, le produit applique ces règles à ses paramètres afin de déterminer quels seront ses choix. Mais dans la plupart des cas, le produit n'est pas le seul acteur de sa prise de décision. La décision sera prise par

conjointement par le produit et par un centre de décision pilotant plus globalement la ligne.

Prenons l'exemple de la règle de rangement des produits dans une file d'attente devant une machine de production. Un produit arrivant dans cette file doit décider quelle sera sa place dans cette file d'attente. A partir de ces paramètres (date de livraison, priorité, etc.) il applique une règle de rangement (priorité au plus petit temps opératoire, priorité à la date de livraison la plus proche, etc.) pour connaître sa position dans la file. Mais c'est le centre de décision du système de production qui, à tout instant, choisit la règle de décision qui sera appliquée par le produit. Ainsi, la décision est prise conjointement par le produit et par la ressource de production, à deux niveaux hiérarchiques différents.

Dans une démarche de prise de décision, le centre de décision a un ensemble donné d'alternatives et il cherche à prévoir les conséquences de chacune d'elles. De façon générale, la décision nécessite donc deux conditions. D'une part, le décideur doit connaître tous les paramètres influençant son choix. D'autre part, il doit posséder un outil de prévision lui permettant d'anticiper les conséquences de son choix. Pour faire le bon choix, le décideur local doit souvent avoir une vision globale du comportement du système de production.

Le problème est que dans un système contrôlé par le produit, le comportement global émerge de toutes les décisions prises localement en temps réel. Il est donc à la fois difficile pour le décideur de connaître l'état courant du système de production (problème de *vision*) et de se projeter dans l'avenir pour connaître son état futur (problème de *prévision*).

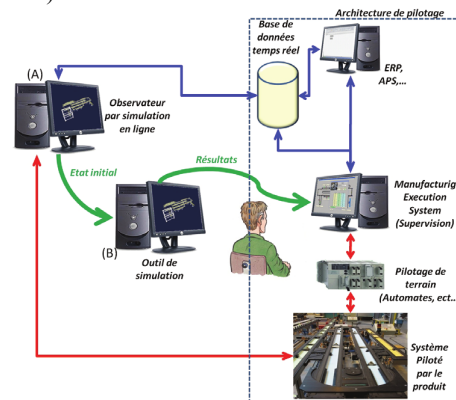


Figure 8.7. Architecture d'aide à la décision par simulation pour un système contrôlé par le produit

Une nouvelle perspective consiste à considérer la simulation de flux comme un outil d'aide à la décision dans le contexte d'un système piloté par le produit. Dans les années 1990 plusieurs études ont été menées concernant le futur de la simulation. L'idée maîtresse développée alors était le passage d'une simulation uniquement utilisée dans la phase de conception d'un système à une simulation utilisée, comme outil d'aide à la décision pour le pilotage de ce même système. Ce nouveau concept a été défini dans [DAV 98] comme « simulation en ligne ». Ce concept s'applique particulièrement bien au pilotage par le produit.

Le problème majeur du concept de simulation en ligne est l'initialisation de la simulation. La plupart des outils de simulation commencent leur exécution avec un modèle « vide et inactif ». Cependant, dans un contexte d'aide à la décision, lorsque le pilote veut lancer une simulation, le système de production n'est ni vide ni inactif. Il y a des produits en cours de production. Aussi, est-il nécessaire d'initialiser le simulateur avec un état non vide.

Dans [CAR 07], Olivier Cardin propose d'utiliser deux simulateurs pour réaliser un outil d'aide à la décision. Comme le montre la figure 8.7, le premier simulateur (A) sert d'observateur du système. En tant que tel, il reproduit le comportement du système réel. Ses connections avec le M.E.S. permettent de corriger les possibles dérives du simulateur (A) au cours du temps. Quand le pilote de la ligne veut prévoir le futur comportement de sa ligne, il lance une simulation en ligne (B). Alors, l'observateur (A) fournit au simulateur en ligne (B) son état actuel (qui est une bonne image de l'état du système réel) pour initialiser la simulation. A la fin de la simulation en ligne (B), le résultat est transmis au M.E.S afin d'aider le pilote dans sa prise de décision.

8.5. Applications industrielles

8.5.1. Le cas d'une entreprise de meubles

8.5.1.1. Contexte

Le cas d'étude concerne l'atelier d'une entreprise de meubles en kit (figure 8.8). Cet atelier est composé de huit postes de charge organisés en cellules de production. Le premier poste de charge est un *process* de découpe : des panneaux de particules y sont découpés en débits de la taille des pièces finies. Ce processus n'étant pas le sujet de ce chapitre, nous nous intéresserons aux postes de charge suivants, le perçage et le défonçage. Chacun d'eux a des caractéristiques particulières et est capable de réaliser plusieurs opérations. En conséquence, plusieurs séquences d'opérations sont possibles, et la diversité de pièces (plus de 1 800 références de meubles, soit plus de 10 000 références de pièces) rend complexes les flux physiques et leur pilotage. De plus, plus de 70 lots de taille moyenne (environ 400

unités) sont lancés chaque jour ; en conséquence on trouve différents lots de tailles variables à l'atelier en même temps. La ligne d'emballage termine le processus, dans laquelle les pièces sont groupées par référence de meuble. Bien sûr, toutes les pièces d'une nomenclature de meuble doivent être finies pour pouvoir commencer l'emballage. Trois stocks intermédiaires régis en FIFO servent de tampons entre les postes de charge.

Pour synthétiser, le but de l'atelier est de livrer des kits de meubles à temps aux clients. La production de l'usine est tributaire de la production de l'emballage, toutes pertes de productivité sur cette dernière conduit à une perte pour l'entreprise.

Par ailleurs, les pièces sont poussées dans l'atelier par le poste de charge de découpe. Le service logistique a fixé comme règle de maintenir un stock de protection entre deux bornes haute et basse. Ainsi, l'ordonnancement des machines est relativement important, eu égard à la nature et au niveau des en-cours. Ceci nous a conduits à nous intéresser, dans un premier temps, au stock tampon entre la découpe et le poste suivant. Celui-ci est composé de trois perceuses (1, 2 et 3). La plupart des pièces doivent être percées, puis elles sont finies ou nécessitent un usinage complémentaire dans un poste de charge.

Par conséquent, les décisions d'ordonnancement relatives aux perceuses ont un impact sur l'utilisation des autres postes de charge et de la ligne d'emballage. Ainsi nous pouvons classer les objectifs des décisions d'ordonnancement relatives aux perceuses en deux groupes : décisions d'impacts locaux ou globaux.

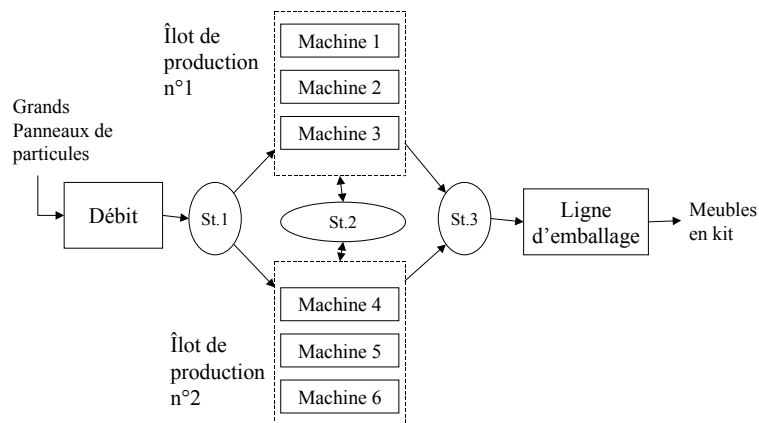


Figure 8.8. *Vue synthétique de l'atelier*

D'autre part, les impacts locaux sont relatifs à la productivité des perceuses :

- l'ordonnancement peut être modifié afin de réduire les temps de changement de séries, lesquels ne sont pas pris en compte au moment de l'ordonnancement prédictif détaillé. Des groupements sont faits en fonction des ordres et des pièces disponibles ;
- le choix d'utiliser des gammes alternatives peut aussi être fait pour faire face aux divers temps morts et pour équilibrer la charge des perceuses. En effet, l'ordonnancement prédictif est réalisé statiquement, sans aucune visibilité sur l'évolution des en-cours au cours du temps, ce qui entraîne régulièrement des congestions aux points de stocks ;
- compte tenu des infrastructures physiques, certains produits sont moins accessibles que d'autres, en conséquence, les opérateurs peuvent décider de changer les ordres de lancement en fonction de la facilité d'accéder aux différents lots.

Par ailleurs, il est possible aussi d'identifier l'impact global qui prend en compte toutes les machines et la ligne d'emballage :

- si le lot de pièces est fini dès la sortie des perceuses, il sera placé directement dans le stock de protection de la ligne d'emballage et donc impactera son niveau ;
- si les pièces doivent encore être transformées sur d'autres machines, elles pourront y être acheminées directement afin qu'il n'y ait pas de rupture d'approvisionnement ou au contraire attendre sur place, afin d'éviter des engorgements devant une machine plus lente.

Si les opérateurs chargés de l'alimentation des postes peuvent aisément évaluer l'impact local de leurs décisions (s'ils ont les bonnes informations), il semble difficile qu'ils puissent évaluer l'impact global par manque de visibilité sur l'en-cours de tout l'atelier.

8.5.1.2. *L'architecture proposée*

Le pilote installé a pour but d'améliorer la pertinence des décisions prises en entrée des perceuses (WIP 1), du point de vue de l'impact tant local que global, en donnant aux opérateurs d'alimentation de ce poste toutes les informations nécessaires, sans le « noyer » pour autant.

L'architecture physique du projet pilote est décrite en figure 8.9a :

- les palettes sont « tagées » et associées aux lots de pièces qu'elles supportent,
- les chariots sont équipés de lecteurs et peuvent détecter chaque mouvement de palettes,
- un *middleware* récupère toutes les informations issues des lecteurs et les transmet aux applications.

L'application de localisation remet à jour la cartographie des flux et les écrans opérateurs et gère aussi l'écart entre système physique et système d'information.

Dans un premier temps, nous avons proposé de maintenir le *plan industriel et commercial* (PIC) ainsi que le *programme directeur de production* (PDP) du système centralisé. En effet, ces plans de long terme dont les objectifs sont, pour le PIC, de dimensionner le système de production en fonction des prévisions de demande, et pour le PDP, de mettre en œuvre la charge de travail de manière réaliste et équilibrée, ont besoin d'être mis en œuvre de façon centralisée afin d'assurer une vision globale.

Au niveau de l'ordonnancement détaillé les deux solutions sont possibles. Avoir une vue globale du système permet d'obtenir un programme optimisé mais n'assure pas de le garder suite à un événement imprévu. D'autre part, construire un programme de manière distribuée n'assure pas son optimalité. Nous proposons de générer un ordonnancement détaillé prédictif qui servira de cadre initial et de mettre en œuvre une technologie agents pour le suivre et le faire évoluer grâce à leur « intelligence » propre. Cette solution présente l'avantage de suivre, autant que cela est possible, le programme optimisé obtenu de manière centralisé et de minimiser les pertes de performances si des écarts apparaissent.

On peut distinguer deux éléments utiles pour avoir un pilotage efficient des flux de produits (figure 8.9b) :

- un cadre optimisé globalement, obtenu de manière centralisé à partir de données venant de tous les services de l'entreprise,
- des informations dynamiques, venant des produits et des ressources, donnant en temps réel une vue de la situation globale. Les ressources transmettent leurs informations sur leurs statuts et leurs performances courantes. Le fait que le produit donne des informations sur sa séquence courante de fabrication, sur sa position et sur les options qui le concerne, contribue à avoir une vue globale des en-cours en atelier.

Le système de pilotage dépend d'un ERP classique (doté des fonctions de PIC, PDP et ordonnancement détaillé), ainsi le système d'information global est toujours adapté. La question qui reste à traiter est quelles informations (en particulier celles portées par le produit) et quelles procédures de collecte seront pertinentes pour un pilotage efficient de la production. Le système de pilotage décrit ici n'est pas encore implémenté, et pour valider ce futur processus de prise de décision, les opérateurs ont encore à faire des choix à partir des informations portées par le produit.

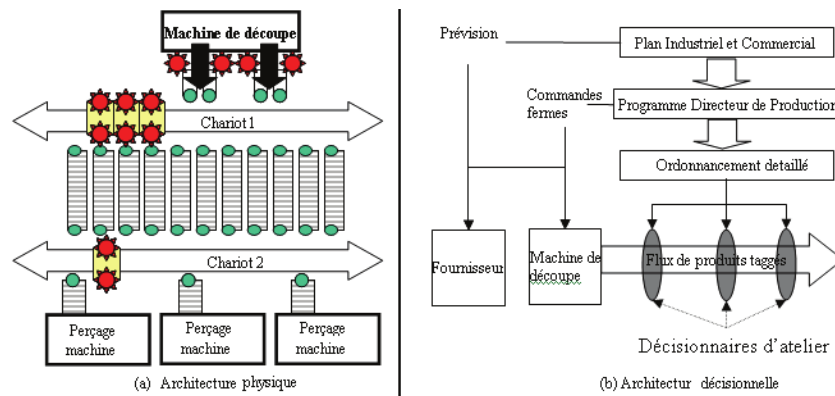


Figure 8.9. Architecture proposée

Le bénéfice essentiel tient dans l'automatisation de la capture des données. Premièrement, cela signifie qu'il y a capture de données à chaque fois qu'il y a un événement. Cette architecture procure ainsi une détection en temps réel des événements vécus à l'atelier. Deuxièmement, elle permet de réduire les niveaux d'agrégation des données. En effet, précédemment seulement les débuts et fins d'opérations étaient tracés ; et en conséquence, une opération n'avait que deux statuts : commencé ou fini. Aujourd'hui, la capacité de savoir le nombre de palettes lancées pour un lot de meubles permet d'évaluer plus précisément les tâches en-cours, évaluer des chevauchements de lots par exemple. De plus, l'identification de chaque lot donne une vue précise des en-cours (niveau, nature, etc.). Par exemple, identifier des cas où, avec de haut niveaux d'en-cours, on ne soit néanmoins pas capable d'emballer un quelconque lot car tous les composants ne seraient pas disponibles. Troisièmement, l'amélioration de la qualité des données est fortement liée aux performances du système RFID. Une installation adaptée permet aujourd'hui d'être proche de 100 % de taux de lecture et des procédures de consolidation adaptées permettent d'avoir alors une vue parfaite des en-cours (WIP). La seule faiblesse restante est relative aux quantités : le fait d'avoir des *tags* sur les palettes implique de saisir les quantités par palette, un risque d'erreur subsiste alors.

Précédemment, les opérateurs n'avaient aucun système de prise de décision à leur disposition. Les essais précédents de création d'outil de simulation avaient échoué pour deux raisons : la maintenance du modèle et le maintien de la pertinence des données d'entrée. Les nouvelles capacités offertes par le système proposé permettent de pallier ces faiblesses en permettant de raffiner de manière continue les

paramètres du modèle et ainsi d'améliorer sa pertinence. De plus, une autre raison conduisant à des erreurs d'évaluation par ces simulations était l'initialisation du modèle. Les données issues du système RFID et capturées de manière continue, sont alors plus pertinentes pour cette phase d'initialisation. Par ailleurs, un effet indirect de l'implémentation de RFID réside dans l'informatisation de l'atelier permettant aux opérateurs d'accéder aux données techniques (comme les gammes alternatives par exemple) et au système de décision.

La mise en œuvre d'une décision sera améliorée par l'accélération du *process* de mise à disposition de l'information qui permet d'avoir un suivi détaillé de l'impact de celle-ci. La localisation instantanée des pièces réduira le temps d'application d'une décision en diminuant le temps de recherche du lot et en évitant de mettre en œuvre un lot incomplet. Deuxièmement, l'opérateur qui alimente les perceuses sera maintenant capable d'évaluer quantitativement l'impact d'une décision qu'il a prise juste avant, à la place d'une évaluation approximative et qualitative venant du responsable de l'emballage. Ceci devrait même permettre un apprentissage dynamique et ainsi conduire à une meilleure réaction à l'occurrence suivante du même événement. La traçabilité des lots devrait aussi permettre de proposer de nouvelles « routes » alternatives sur la base de ce qui s'est réellement fait.

Finalement, le bénéfice premier et évident de l'usage de RFID est de donner au décideur de l'atelier de bonnes informations. Mais ceci peut conduire à un optimum local au niveau des perceuses et à des ruptures au niveau de l'emballage, par exemple. Un besoin apparaît donc d'enrichir les données techniques (statiques) par des informations dynamiques, relatives aux flux physiques, aux délais, aux statuts des ressources afin de piloter la cellule de perçage en fonction des autres cellules, vues alors comme des clients. Dans un premier temps, nous avons identifié toutes les informations utiles en listant tous les impacts que peut avoir une décision sur le point de découplage et en les mettant à disposition des décideurs locaux. Une analyse de la conception et de la sélection des règles de priorité (afin de les modéliser, d'éventuellement améliorer les règles existantes et de les implémenter dans le système de prise de décision distribuée) a été faite en utilisant le simulateur présenté précédemment. Concrètement, les bénéfices attendus d'un tel système sont :

- réduction des temps d'alimentation des machines, du fait de la localisation instantanée des lots de pièces (suppression du temps de recherche des lots). Notons que là, quand le niveau du WIP1 est assez haut, les temps morts entre deux lots lancés sont proches de 150 % du temps de réglage ;
- visibilité exacte et temps réel des WIP permettant une réduction des ruptures à l'emballage. Des simulations ont montré que contrôler l'alimentation des perceuses en fonction du WIP3 et de sa nature, permettait de réduire de moitié les temps morts à l'emballage (ce qui représente la charge de 10 opérateurs) ;

- réduction des papiers et données associées aux produits en améliorant leur pertinence et leur synchronisation (par rapport à leur utilisation) ;
- amélioration du pilotage des ressources en fonction des besoins et de la situation de la ligne d'emballage, grâce à l'outil d'évaluation permettant de voir l'effet des divers scénarii de décision ;
- amélioration de la qualité du fait de l'automatisation du contrôle des références sur la ligne d'emballage. En effet, le système RFID génère immédiatement une alarme si la ligne est alimentée par de mauvaises références. De telles confusions ne sont pas réellement fréquentes, mais chacune d'elles est très coûteuse et induit des volumes de stocks résiduels importants et à traiter manuellement.

8.5.2. Synchronisation multi-lignes

8.5.2.1. Le contexte industriel

L'entreprise TRANE fabrique des appareils de climatisation pour des entreprises ou des particuliers. Les 29 sites de production sont conçus selon les concepts du DFT (*Demand Flow Technology*). Cette approche de *juste à temps* conduit à avoir des lignes d'assemblage à l'atelier organisées de manière strictement identiques (figure 8.10).

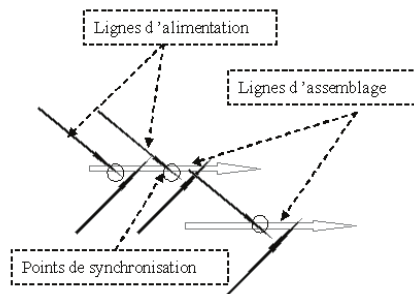


Figure 8.10. La structure DFT

Le but est d'optimiser la production grâce à une standardisation des procédés. La production est organisée en flux tirés ; les produits finis étant assemblés sur une ligne d'assemblage principale.

Afin d'assurer qu'un composant (semi-fini) arrive au bon moment sur la ligne d'assemblage, et d'éviter ainsi les problèmes de rupture, il y a un point de stock entre la ligne d'assemblage et chaque *feeder* (dénommé *in process Kanban* ou IPK).

Les autres composants sont gérés grâce à un Kanban classique. De plus, la gestion doit se conformer aux objectifs mensuels définis dans le plan tactique suggéré par le progiciel de gestion intégré. Ces objectifs sont détaillés à l'échelle de la semaine dans des plans directeurs de production (PDP).

En résumé, bien que ce mode d'organisation permette une grande flexibilité et réactivité du point de vue de la gestion des flux de matière, il comporte de nombreux défis : le premier est la synchronisation entre les lignes d'assemblage et les *feeders*.

Le second est de donner plus de visibilité au système d'information sur l'état de l'atelier. En effet, les consommations de matière première des composants gérés par Kanban (qui représentent 80 % des composants) ne peuvent être connues qu'*a posteriori* (*backflushing*). La troisième question est comment améliorer la réactivité en cas de perturbation ? Chaque sous-ensemble du système physique ayant son propre modèle, ces problématiques conduisent par conséquent à synchroniser les modèles de simulation ou d'émulation utilisés pour assurer un pilotage du système.

8.5.2.2. Architecture du système TRANE

8.5.2.2.1. Présentation du pilote

Pour répondre aux questions soulevées dans l'introduction, un pilote a été choisi pour évaluer la pertinence de l'approche de pilotage par le produit. Le pilote, nommé « PilotAB » s'organise autour d'un *feeder* composé de quatre postes de travail. Ce *feeder* doit alimenter la ligne d'assemblage principale du site « A », mais il doit aussi satisfaire les besoins d'un autre site de production « B » (figure 8.11).

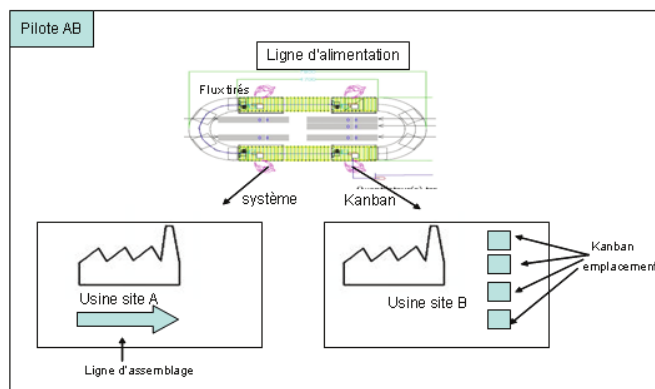


Figure 8.11. Schéma du « Pilot AB »

L'approvisionnement du site A est géré par un système de flux tiré tandis que la gestion se fait par Kanban pour le site B. Les demandes du site A doivent être traitées en priorité, mais toutes les requêtes Kanban venant quotidiennement du site B doivent être satisfaites.

La simulation à événements discrets a été choisie pour répondre aux questions clés d'évaluation des temps de cycles et d'occupation des files d'attente. Arena a été choisi pour sa facilité d'utilisation et sa capacité à déployer le modèle pour une utilisation ultérieure, sans coût supplémentaire.

En effet, le logiciel Arena permet la simulation du comportement de la ligne d'assemblage, et les statistiques issues de ces simulations sont utiles aux ingénieurs pour la mise en place d'un système de traçabilité et de contrôle.

8.5.2.2.2. Architecture proposée

Dans ce cas d'étude, nous utilisons la même architecture que celle présentée précédemment. Le système de pilotage est composé d'un système de communication connecté à Oracle et à l'ERP et d'interfaces homme-machine pour assister l'opérateur dans ses tâches, en affichant les procédures à suivre et la nomenclature du produit (figure 8.12).

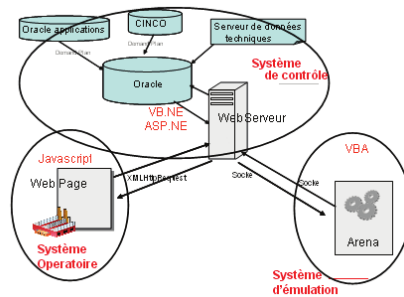


Figure 8.12. L'architecture générale du système d'émulation développé

8.5.2.2.3. Description du système de pilotage

Le système de pilotage a été développé comme une application *web* à cause du contexte multi-sites en utilisant les technologies ASP.NET et VB.Net.

Le rôle industriel du *feeder* pilote est la production de ventilateurs en prenant en compte le routage des composants sur les divers postes de travail. Pour assurer la

8.5.2.2.4. Interface de communication

La suite présente le protocole de communication utilisé pour assurer la communication entre les deux sites (les deux modèles d'émulation), l'application *web* et l'interface utilisateur.

L'application *web* envoie un ordre de fabrication (OF) vers Arena, qui crée une entité correspondant aux caractéristiques de cet OF.

Ensuite, le système d'émulation (Arena) émule la lecture de code à barres et renvoie les informations scannées (référence interne à la Trane, numéro d'ordre de travail, etc.).

Lorsque ces données sont reçues, le système de pilotage les mémorise, tandis qu'une requête est envoyée vers le poste de l'opérateur (via un objet XMLHttpRequest).

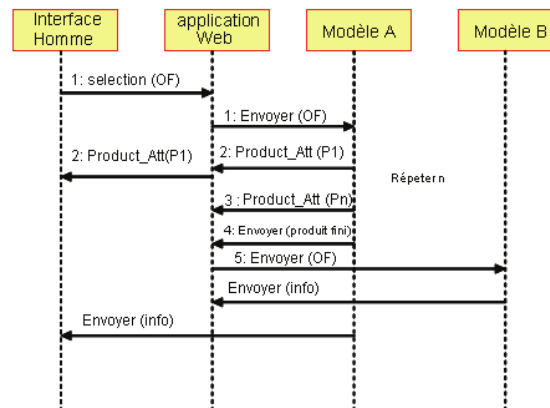


Figure 8.14. Diagramme UML du protocole de communication

Au démarrage de l'application *web*, une connexion est établie avec Arena, sous la forme d'un *socket*, mis en œuvre dans Arena, grâce à une librairie *SocketClient* écrite en VB.Net. Celle-ci représente l'unique moyen de communication entre le modèle Arena et le système de pilotage, tandis que l'échange d'objets XMLHttpRequest est l'unique moyen de communication entre les postes de travail et le système de pilotage.

Ce système permet une communication efficiente entre les composants de l'architecture, mais il ne permet pas de valider le fonctionnement correct de l'application *web*.

8.5.2.3. *Limites et perspectives*

Pour synthétiser, nous avons proposé un moyen de synchroniser plusieurs modèles de simulation. Nous avons proposé une architecture spécifique pour gérer le flux de matière entre deux sites, et assurer la traçabilité. Cette architecture est composée d'une véritable application de pilotage connectée, soit au système manufacturier, soit à son modèle d'émulation. Grâce à ce dernier, il est possible d'évaluer l'effet d'un processus de prise de décision avant de déployer au (véritable) système de production.

Toutefois, la principale difficulté de cette proposition réside dans la gestion du temps. En effet, les périodes d'ordonnancement sont différentes entre le modèle d'émulation et l'application *web*, ce qui peut représenter un problème dans certaines circonstances. HLA est un bon moyen de résoudre ce problème, et le chapitre suivant est dédié à ce sujet.

8.5.3. *Cas American Glass Product*

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés par Pascal Blanc, durant sa thèse de doctorat [BLA 06]. Dans ce cas industriel, une politique de fabrication sur commande est utilisée pour un produit hautement personnalisable. Ce produit est très sensible aux problèmes de qualité.

Le processus de production est principalement manuel, et sujet à de nombreux aléas. De plus, l'entreprise a une grande activité en recherche et développement. Ainsi, de nombreux flux normaux et dégradés, dus aux rejets ou à la répétition d'opérations, se mêlent.

En outre, l'utilisation rationnelle des matières premières et la maximisation de la productivité sont aussi des objectifs principaux. Ainsi, des mécanismes dynamiques coopératifs et/ou compétitifs de constitution de lot et d'ordonnancement doivent être développés.

Piloter un système si complexe et à un tel niveau, exige la coordination de plusieurs modèles complexes, autant que l'intégration de ce contrôle dans une structure existante.

Un modèle de simulation de cette application industrielle a été réalisé en utilisant Arena pour modéliser le système physique et une plate-forme multi-agents, en tant que système de pilotage.

8.5.3.1. Contexte

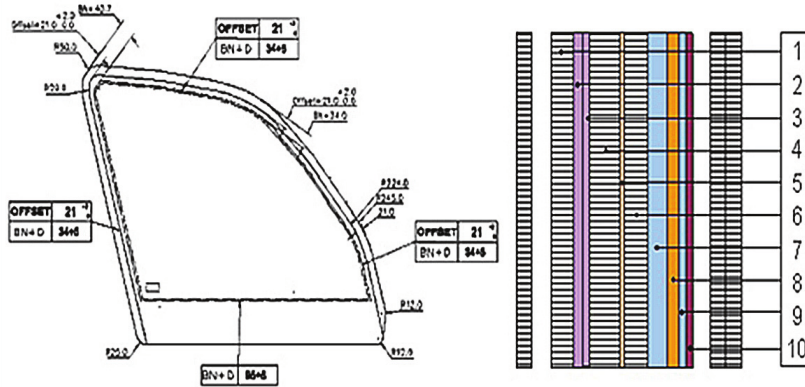


Figure 8.15. Le produit d'AGP

American Glass Product (AGP, Curitiba, Brésil) produit des vitres feuilletées de sécurité, pour des véhicules. Le produit se définit par sa géométrie (dimension, courbe), ses caractéristiques sérigraphiées (logo du client, contour de la vitre, antenne, grille de désembuage) et sa composition (figure 8.15).

AGP utilise principalement une politique de conception et de fabrication sur commande.

Le procédé se décompose en trois étapes principales (figure 8.16) : la préparation des verres, la découpe des plastiques, et l'assemblage final.

La préparation des verres consiste à découper les lames de verres, dégrossir et polir les bords, appliquer la sérigraphie et courber les piles de verres qui composeront le produit final. Les films plastiques sont alors découpés en fonction de la formulation du produit, puis l'ensemble est finalement assemblé.

Des informations additionnelles et une description complète de ce procédé sont disponibles dans [BLA 04].

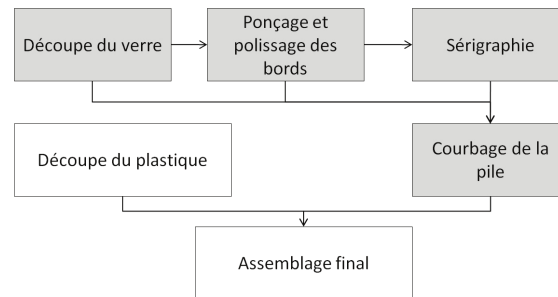


Figure 8.16. Synoptic diagram of the process

8.5.3.2. Architecture proposée

Pour construire ce HMS, de nombreuses méthodologies génériques de conception de système multi-agents ont été étudiées. L'approche voyelle (AEIO), développée par [DEM 95], vise à définir un cadre conceptuel pour la spécification d'un système multi-agents. AEIO signifie : *Agent* (structure, fonction et comportement), *Environnement* (ensemble d'objets existants dans le système multi-agents), *Interaction* (langage et protocoles) et *Organisation* (relations, dépendances, autorité). Cassiopée, développé par [DRO 98], est basé sur la définition de rôles : individuels, relationnels et organisationnels et propose cinq étapes (ou niveaux) pour la conception d'un SMA : définition des rôles individuels, des dépendances, des rôles relationnels, des groupes et enfin des rôles organisationnels. Gaia [WOO 00] propose six modèles structurés dans une hiérarchie à trois niveaux : états des besoins, rôles et interactions, et finalement, agents, services et relations. Ces méthodologies sont génériques, et dans ce sens, elles peuvent être utilisées pour n'importe quel type de système. De plus, elles permettent de décrire la structure du MAS, sans imposer l'utilisation d'une plate-forme spécifique. Elles ont en commun deux niveaux de spécifications : le niveau micro (définition des agents) et le niveau macro (définition de l'interaction entre les agents).

L'utilisation de l'architecture PROSA, permet de simplifier grandement la conception du MAS correspondant, l'étape d'analyse étant pratiquement réalisée puisque les rôles des agents et leurs interactions sont déjà décrits. L'architecture conceptuelle et l'étape d'implémentation sont aussi enrichies en utilisant l'*Holonic Component-Based Approach*, décrite dans [CHI 00].

Nous pouvons à présent décrire un mécanisme réaliste et détaillé pour que chaque agent puisse jouer son rôle, au niveau micro et au niveau macro.