

IMPLANTATION D'UN CONTRÔLE PAR LE PRODUIT À L'AIDE DE RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL – VALIDATION PAR ÉMULATION D'UN ENVIRONNEMENT DE PRODUCTION

David GOUYON, Michael DAVID

CRAN, UMR 7036 CNRS Nancy Université
 Faculté des Sciences et Techniques – BP 239
 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex
 david.gouyon@cran.uhp-nancy.fr, michael.david@cran.uhp-nancy.fr

RÉSUMÉ : Dans un contexte évoluant dynamiquement, comme par exemple celui de la personnalisation de masse des produits, de nouvelles architectures de contrôle, basées sur une intégration d'unités distribuées, autonomes, adaptables et pouvant coopérer efficacement, font leur apparition et semblent être des alternatives probantes. Parmi ces approches, le concept de contrôle par le produit donne une place active au produit tout au long de sa propre fabrication. Le travail présenté dans ce papier a pour objectif de proposer une validation par émulation et implantation partielle d'une architecture de contrôle de ce type, en utilisant la technologie des réseaux de capteur sans fils.

MOTS-CLÉS : contrôle par le produit, environnement émulé, réseaux de capteurs sans fils

1 DU CONTRÔLE INTÉGRÉ DE LA PRODUCTION VERS UN CONTRÔLE AGILE

L'avancée des nouvelles technologies de l'information et de la communication donnent aux industriels l'opportunité de promouvoir des modèles commerciaux tels que la personnalisation de masse des produits ou la fabrication à l'ordre (Da Silveira *et al.* 2001). Faire face à ce large éventail d'ordres personnalisés en fonction de chaque client a un impact sur l'ensemble des systèmes d'information et de contrôle de l'entreprise (Nof *et al.* 2006), dont les possibilités d'intégration doivent, dans un contexte évoluant dynamiquement, être améliorées selon l'Enterprise Integration Capability Model (Hollocks *et al.* 1997) (EICM).

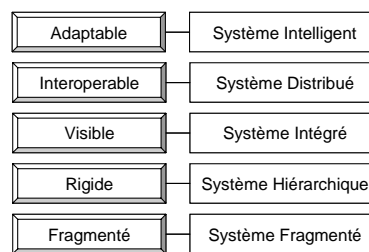


Figure 1. Modèle EICM (Enterprise Integration Capability Model)

Des normes, comme la IEC/ISO 62264 (ISO 2003), dont le développement et la promotion sont assurés par des sociétés techniques telles que le MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association, <http://www.mesa.org>), l'ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society, <http://www.isa.org>) et l'ISO (International Organisation for Standardisation, <http://www.iso.org>), permettent de répondre aux problématiques industrielles d'intégration « Business to Manufacturing » (Morel *et al.* 2003) des systèmes de contrôle de l'entreprise, intégrant ainsi le niveau de la gestion (« Business ») et le niveau du contrôle du procédé de fabrication (« Manufacturing ») (Figure 2a). Dans ce contexte, les MES (Manufacturing Execution Systems) assurent une intégration « synchronique » (à certains instants) entre les systèmes de contrôle du niveau entreprise et du niveau de la production, et une intégration diachronique (à travers le temps) au cours de l'exécution des activités (flux de services). La principale difficulté est alors d'assurer la cohérence entre les flux de produits et les flux d'informations.

Une alternative possible, pour atteindre le niveau 'interopérable' de la matrice EICM (Figure 1), et donc d'assurer cette cohérence, est de remettre en question la vision hiérarchique et intégrée du contrôle de l'entreprise pour une vision plus interoperable, voire intelligente, en considérant le produit comme étant le « contrôleur » des ressources de fabrication

(McFarlane *et al.* 2003, Morel *et al.* 2005) (Figure 2b). Le produit, vu comme un bien par le système de production, et comme un fournisseur d'informations et de services par les systèmes de gestion, assure la cohérence entre les flux physiques et les flux informationnels.

Une autre alternative, soutenue par la communauté IMS (Intelligent Manufacturing Systems, www.ims.org), conduit au développement de nouvelles architectures (Figure 2c) basées sur l'utilisation d'unités distribuées, autonomes, adaptables et pouvant coopérer efficacement dans une approche « plug-and-operate », comme cela est fait dans le domaine des systèmes multi-agents (Marik et Lazansky 2007) et des Systèmes Manufacturiers Holoniques (HMS – Holonic Manufacturing Systems) (Deen 2003).

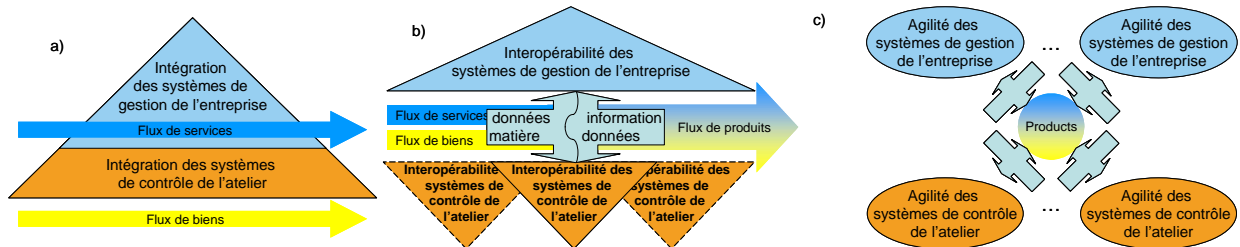


Figure 2. D'une production intégrée à une production agile

Ce genre d'approche est également à l'étude dans le cadre du projet Européen « Pabadis-Promise », dont l'objet est d'étendre l'idée de pilotage distribué à une architecture innovante qui incorpore ressources et produits (www.pabadis-promise.org). L'émergence des technologies infotroniques embarquées conduit aujourd'hui, dans le cadre du contrôle par le produit (McFarlane *et al.* 2003), à un rapprochement des résultats de recherche et des implantations réelles : Identification par Radio Fréquence (RFID – Radio Frequency IDentification), réseaux sans fils, nouvelles générations d'automates programmables, support des technologies multi-agents ...

Ce papier présente un travail préparatoire s'intégrant dans une démarche plus globale cherchant à valider de manière opérationnelle les intérêts du contrôle par le produit, en termes qualitatifs (peut-on assurer une production personnalisée ? assure-t-on individuellement la traçabilité des produits ? un système contrôlé par le produit est-il résilient face à des perturbations ? ...) et quantitatifs (le contrôle par le produit permet-il une productivité accrue ? ...). L'objectif de ce papier n'est donc pas de répondre directement à ces questions, mais de tester les possibilités d'une technologie infotronique (réseaux de capteur sans fils) afin de proposer un environnement de validation et d'évaluation du concept.

Après une description dans la section suivante du concept de contrôle par le produit et de différentes technologies d'implantation, la section 3 de ce papier propose un cadre spécifique de modélisation et d'émulation du contrôle par le produit. La section 4 présente ensuite une émulation des ressources de production contrôlées par le produit d'un cas d'étude permettant de valider l'implantation de différents niveaux d'intelligence technique du produit à l'aide des réseaux de capteurs sans fil.

2 CONTRÔLE PAR LE PRODUIT

Le travail présenté dans ce papier étant principalement orienté vers les possibilités d'implantation d'un contrôle par le produit, cette partie a pour objectif de décrire dans un premier temps le concept.

2.1 Entre produit instrumenté et produit intelligent

Considérer le produit comme actif dans sa propre production amène à lui donner une forme d'intelligence technique (Karkkainen *et al.* 2003), qui correspond à différents critères, définis par Wong *et al.* (2002) :

1. Posséder un identifiant unique
2. Pouvoir communiquer avec son environnement
3. Pouvoir retenir ou stocker des données le concernant
4. Déployer un langage pour présenter ses caractéristiques, exigences de production ...
5. Pouvoir assurer ou participer à une prise de décision concernant son devenir.

En fonctions de ces cinq points, Wong *et al.* (2002) définissent deux niveaux d'intelligence du produit :

- une intelligence de niveau 1 d'un produit lui permet de communiquer son état (forme, composition, localisation, critères clés), c'est-à-dire un niveau orienté vers les informations du produit. Le niveau 1 couvre les points 1 à 3 décrits précédemment ;

- une intelligence de niveau 2 d'un produit lui donne la possibilité non seulement de communiquer son état, mais elle lui permet aussi d'apprécier et d'influencer les décisions qui sont prises à son égard, c'est-à-dire un niveau orienté vers la décision. Le niveau 2 couvre les points 1 à 5 décrits précédemment.

D'un point de vue de l'implantation, les choses peuvent être très différentes. En effet, il semble encore pour l'instant difficile d'implanter directement dans un produit, même électronique/instrumenté tous les aspects de l'intelligence décrits ci-dessus. Actuellement, la plupart des équipements électroniques embarqués dans les produits n'ont ni la possibilité de communiquer ni une capacité de traitement suffisante pour toutes les informations qui sont nécessaires à la fabrication des produits. Pour cette raison, des solutions où les entités actives résident dans des ordinateurs, et sont connectées à distance avec les produits et les machines assurant leur production, sont envisagées. Il existe en effet des systèmes de production multi-agents qui sont implantés dans des environnements de production réels (McFarlane *et al.* 2003), mais il y a quelques contraintes, liées par exemple à la fiabilité de la lecture des puces RFID : le taux de succès de lecture de ces puces n'étant pas encore de 100%, le système ne peut pas encore être complètement observable.

Dans ces différentes approches, le produit est considéré comme central au problème de l'automatisation, et possède, de manière logique, des capacités de stockage, de traitement et de communication de l'information. Il peut ainsi être actif dans l'ordonnancement et le contrôle de l'exécution des tâches de production le concernant (point 5). Les HMS (Deen 2003) constituent alors un cadre permettant de formaliser ce concept de contrôle par le produit.

2.2 Les Systèmes Manufacturiers Holoniques (HMS)

Koestler (Koestler 1967) a introduit le concept de l'*holon*, qui correspond à une entité capable de fonctionner comme un ensemble autonome (un « tout »), tout en agissant simultanément comme une « partie d'un tout » dans un système hiérarchiquement structuré. En d'autres termes, un système holonique est une combinaison d'un système hétérarchique et d'éléments centralisés.

En se basant sur ce concept, la communauté IMS, et plus spécifiquement celle des HMS (Vackenaers 2001, Deen 2003, Leitao et Restivo 2006), développe et fait la promotion d'architectures conceptuelles qui tendent à concéder aux produits un comportement intelligent. Ces HMS (Babiceanu et Chen 2006) sont des systèmes distribués considérant que les holons, qui peuvent être des entités autonomes de production, coopèrent afin de fabriquer des produits dans un environnement dynamiquement reconfigurable (McFarlane *et al.* 2003). L'une des architectures de HMS les plus utilisées et citées dans la littérature est l'architecture de référence PROSA (Van Brussel *et al.* 1998), dont l'acronyme signifie *Product – Resource – Order – Staff Architecture*, montrant ainsi explicitement le rôle actif des produits.

Parmi les avantages de l'approche HMS, figure, comme l'ont évalué Chirn et McFarlane (Chirn et McFarlane 2005), la capacité de ces systèmes à être modulaires et facilement reconfigurables. Ainsi, ils peuvent s'adapter pour faire face à des séries de changements concernant les produits à fabriquer (quantités, caractéristiques ...).

2.3 Automatisation par le produit

En accord avec les concepts des HMS, l'approche utilisée dans ce papier s'intéresse à un système distribué de contrôle par le produit (Figure 3) (Pétin *et al.* 2007), basé sur une coopération entre :

- les contrôleurs des produits qui assurent que leur routage sur les différentes ressources de production respecte une liste ordonnancée d'opérations devant être suivie par le produit pour être fabriqué ; ces contrôleurs sont spécifiques à chaque instance de produit afin de tenir compte des particularités propres à chacun d'entre eux,
- les contrôleurs des ressources qui assurent l'exécution correcte des opérations de transport, de stockage et de transformation morphologique des produits, tout en fournissant des comptes-rendus précis ; la flexibilité du contrôle peut alors reposer soit sur le réglage des paramètres d'appel des objets fonctionnels qui coordonnent et contrôlent les opérations élémentaires que les ressources sont capables de réaliser, soit sur le téléchargement de règles spécifiques de contrôle embarquées dans les produits.

Cette coopération consiste en l'échange de requêtes (notées RQ) émises par les contrôleurs des produits à destination des contrôleurs des ressources de production, et de comptes-rendus notés (RP) émis par les contrôleurs des ressources à destination des contrôleurs des produits.

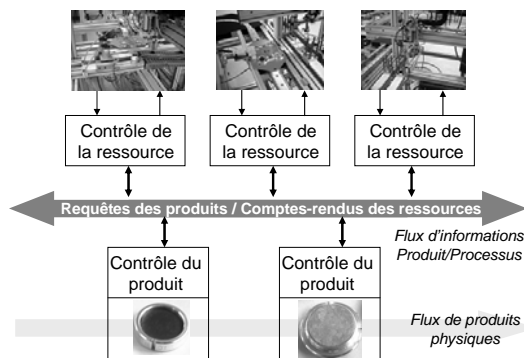


Figure 3. Principe de l'architecture du contrôle par le produit

La définition des différents contrôleurs est basée, d'une part, sur la modélisation des capacités du système de production, décrivant sa topologie et les opérations possibles sur chacune des ressources, et d'autre part, sur la modélisation des spécifications des produits, en termes d'opérations que le produit doit subir pour être fabriqué (sa gamme logique). Ces contrôleurs peuvent être obtenus de manière automatique et formelle à l'aide de modèles issus des Systèmes à Événements Discrets (Cassandras et Lafortune 1999) et de techniques de synthèse de la commande (Ramadge et Wonham 1987), comme cela est proposé dans (Pétin *et al.* 2007). Cette synthèse est en dehors du cadre de ce papier qui s'intéresse principalement aux aspects d'implantation du contrôle par le produit.

2.4 Deux technologies d'implantation

Comme présenté dans le paragraphe 2.1, de nombreuses technologies infotroniques peuvent être utilisées pour implanter le concept de contrôle par le produit. Parmi elles, ce paragraphe se propose de comparer les caractéristiques techniques, telles que décrites par les documentations techniques des fabricants, des tags RFID et des réseaux de capteurs sans fil, afin d'en sélectionner une qui permettrait de valider le concept de contrôle par le produit dans un environnement de production émulé.

2.4.1 La technologie des tags RFID

La RFID est une technologie d'IDentification par Radio Fréquence qui repose sur la lecture et l'écriture à distance d'informations sur des puces électroniques (appelées couramment « tags » RFID ou transpondeurs) (Finkenzeller 2003). Il existe différents types de tags RFID, mais tous comportent au moins une puce et une antenne. En particulier, les tags « actifs » peuvent contenir un processeur, une mémoire, une alimentation électrique et un transmetteur radio (Figure 4).

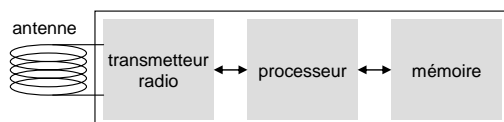


Figure 4. Structure d'un tag RFID

Les tags les plus utilisés, qui sont aussi les moins chers, sont dits « passifs » car n'ayant pas d'alimentation interne, et ne contiennent pas de processeur. Ils peuvent être utilisés par exemple pour l'identification des produits ou des lots de produits. De nombreuses applications existent dans le domaine des systèmes d'inventaires, dans la logistique et dans les bibliothèques (voir par exemple la revue RFID Journal, <http://www.rfidjournal.com>).

2.4.2 La technologie des réseaux de capteurs sans fil

Les progrès des technologies infotroniques, de même que les avancées dans les domaines de la microélectronique et des communications sans fils, permettent à l'heure actuelle la réalisation de très petits capteurs. Ces éléments sont dotés d'une alimentation électrique embarquée, de capacités de capture, de traitement et de communication sans fil de l'information (Akyildiz *et al.* 2002) (Figure 5), et sont utilisés comme des briques élémentaires pour construire des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks – WSN).

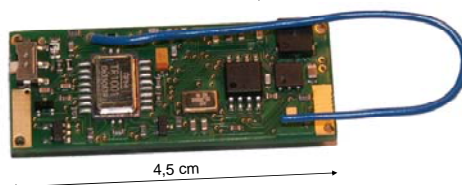


Figure 5. Exemple de nœud de réseau de capteur sans fil

Ces nœuds miniaturisés de réseaux de capteurs sans fils sont communément appelés « motes ». Avec leurs capacités, ils sont capables de sentir (capter) leur environnement, de recevoir des messages via le réseau sans fil, et réagir en prenant une décision et/ou en envoyant un message. La Figure 6 présente la structure fonctionnelle d'un mote.

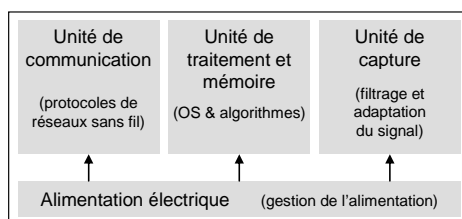


Figure 6. Vue des composants fonctionnels d'un mote

Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans des applications militaires et environnementales pour faire de la surveillance, ou encore dans des applications robotiques ou logistiques (Arampatzis *et al.* 2005).

2.5 De l'implantation de l'intelligence du produit dans les tags et les motes

Les deux technologies présentées ci-dessus présentent des capacités qui permettent d'envisager une implantation plus ou moins directe du concept de contrôle par le produit dans des produits physiques (du monde réel). En se basant sur la littérature et les descriptifs techniques des fabricants de tags RFID (Finkenzeller 2003) et de réseaux de capteurs sans fils (Akyildiz *et al.* 2002), le Tableau 1 résume les aptitudes des tags RFID passifs, actifs, et des motes à permettre l'implantation des différents aspects de l'intelligence technique du produit définis par (Wong *et al.* 2002), et présentés au paragraphe 2.1. Ainsi, un tag RFID passif semble permettre l'implantation d'une intelligence de niveau 1, alors qu'un tag RFID actif comprenant un processeur ou un mote de réseau capteur sans fil semblent quant à eux permettre une intelligence de niveau 2, car ils sont capables d'embarquer une fonctionnalité de prise de décision.

Aspect de l'intelligence technique du produit		Tag RFID passif	Tag RFID actif	Mote de réseau de capteurs sans fils
1	Posséder un identifiant unique	Oui	Oui	Oui
2	Pouvoir communiquer avec son environnement	Oui, les antennes RFID peuvent lire le contenu du tag	Oui, les antennes RFID peuvent lire le contenu du tag	Oui, des données peuvent être envoyées via des trames UDP
3	Pouvoir retenir ou stocker des données le concernant	Oui, possède une mémoire embarquée	Oui, possède une mémoire embarquée	Oui, possède une mémoire embarquée
4	Déployer un langage pour présenter ses caractéristiques, exigences de production ...	Non, la mémoire possède des données, pas d'information	Oui, le processeur peut interpréter les données en mémoire en information pour communiquer avec l'environnement	Oui, le processeur peut interpréter les données en mémoire en information pour communiquer avec l'environnement
5	Pouvoir assurer ou participer à une prise de décision concernant son devenir	Ne possède pas de capacité de prise de décision	Oui, leur processeur est capable de prendre une décision en utilisant un algorithme embarqué	Oui, leur processeur est capable de prendre une décision en utilisant un algorithme embarqué

Tableau 1. Comparaison des possibilités d'implantation de l'intelligence du produit entre tags RFID et motes

Pour implanter un contrôle par le produit, il est nécessaire qu'à tout instant, entre les produits et les ressources, des messages puissent être envoyés et reçus. Pour communiquer, les tags RFID ont besoin d'être en liaison directe avec une antenne, ce qui limite les capacités de communications avec les ressources aux zones de lecture couvertes par l'infrastructure mise en place. A l'inverse, l'organisation ad-hoc des réseaux de capteurs semble être plus flexible, car les motes servent eux-mêmes de relais (en termes d'architecture spécifique, une seule passerelle peut être suffisante pour communiquer avec les ressources). De plus, alors que le taux de lecture des tags n'est pas encore à l'heure actuelle de 100%, les réseaux de capteurs peuvent utiliser des protocoles réseaux plus fiables. Pour ces diverses raisons, les motes ont été choisis dans cette étude en vue d'expérimenter une implantation du contrôle par le produit sur un cas d'application, l'Atelier Inter-établissement de Productique Lorrain, dont les ressources de production (machines, superviseur...) sont émuloées.

3 CADRE DE MODÉLISATION ET DE VALIDATION DU CONTRÔLE PAR LE PRODUIT

L'objectif de ce papier étant d'étudier dans quelle mesure la technologie des réseaux de capteurs sans fil permet la projection du concept de contrôle par le produit, cette partie détaille dans un premier temps les modèles de comportement des produits dans leur environnement, en prenant l'hypothèse d'un niveau 2 d'intelligence du produit (Wong *et al.* 2002), et propose par la suite une spécification d'architecture applicative générique permettant leur implantation.

3.1 Comportement du produit en vue d'assurer le contrôle de sa production

Lors de son cycle de vie de production, le produit (physique) va devoir passer de l'état de matières premières à l'état de semi-fini, puis de produit fini. Pour cela, la partie « intelligente » de chaque produit va devoir assurer la coordination des différentes actions menées par les ressources de production afin de suivre la gamme logique de fabrication qui lui est propre, et ce tout en historisant les données de production afin d'assurer individuellement la traçabilité.

3.1.1 Différents états du produit

Les produits sont ici conceptuellement considérés comme acteurs lors de leur cycle de production, mais pourront redevenir des produits « classiques » (sans partie intelligente capable de prendre des décisions sur leur fabrication) lorsqu'ils arrivent chez le client. Dans le cadre de cette étude, comme la technologie des réseaux de capteur est envisagée pour valider le concept de contrôle par le produit, les motes pourront être désolidarisés des produits physiques qu'ils instrumentent dès lors que le produit quitte son cycle de production. Il s'agit donc d'une projection dégradée du concept de contrôle par le produit, puisque l'instrumentation du produit pourra être portée par son conteneur (ou sa palette), et non être une partie intégrante du produit. Les motes pourront ainsi être utilisés de manière cyclique sur plusieurs produits.

Dans le cadre proposé, les activités successives (Figure 7) d'un produit instrumenté assurant le contrôle de sa propre fabrication à l'aide d'un mote sont :

- A0 : le mote n'est pas configuré, sa mémoire est vide et la fabrication d'aucun produit ne lui est affectée ;
- A1 : sur lancement d'un ordre de fabrication, le superviseur (et/ou le MES suivant le niveau de granularité auquel le contrôle par le produit est implanté) affecte le contrôle de la fabrication d'un produit au mote et lui envoie sa configuration ;
- A2 : le produit est en cours de fabrication, le mote assure la coordination des différentes opérations de production, en envoyant les requêtes nécessaires et en réagissant aux comptes-rendus des ressources de production et du superviseur (ou MES), et historise les données et paramètres de production ;
- A3 : les opérations de transformation physique du produit sont terminées, la mémoire du mote est téléchargée pour être stockée dans une base de données de production (de type MES par exemple), le mote est désolidarisé du produit physique, puis est réinitialisé (mémoire et configuration remises à zéro).

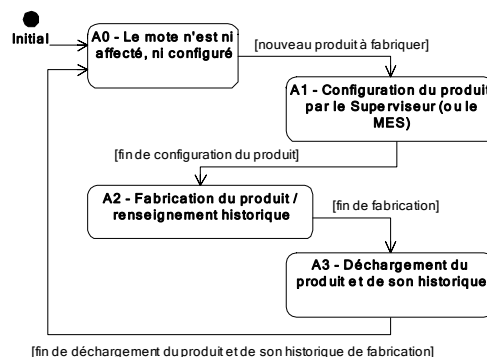


Figure 7. Diagramme d'activités UML montrant les différents états d'un mote pendant la fabrication

3.1.2 Échanges entre le produit et son environnement

L'objectif ici est de définir et spécifier de manière générique un « protocole de communication / d'échange » entre le produit et son environnement. Plusieurs types d'échanges sont définis dans ce protocole (Figure 7), en fonction de l'état courant du produit.

Initialement, un mote n'est pas affecté à la fabrication d'un produit particulier. Il peut alors (activité A0 de la Figure 7) diffuser périodiquement sur le réseau de capteurs un message (NCF) indiquant qu'il n'est pas affecté, et qu'il peut être configuré. Lorsqu'un nouvel ordre de fabrication est lancé, le superviseur pourra alors choisir de l'affecter (Activité A1 de la Figure 7), en envoyant une configuration (CFG) spécifique. Cette configuration comprendra au minimum un identifiant propre au produit et la gamme logique à suivre, mais pourra également intégrer d'autres informations telles qu'un nom de produit, un type de produit ... Une fois configuré, le mote peut accuser réception de son affectation (OLE) (Figure 8).

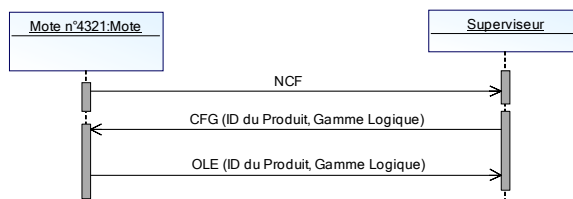


Figure 8. Diagramme de séquence UML montrant la configuration d'un mote par le superviseur

Le mote va, dans l'activité A2, assurer la coordination des opérations nécessaires à la fabrication du produit physique auquel il est rattaché. Pour cela, le contrôle est assuré par un échange de requêtes (RQ) envoyées par le mote à destination des ressources de production, et de comptes-rendus (RP) qu'il va recevoir en retour des ressources. Le langage commun suivant est alors défini :

- RQW_op_i : requête diffusée par le produit : « quelle ressource peut m'effectuer l'opération op_i ? » ;
- RPW_WS_j : réponse émise par le superviseur à destination du produit : « le poste WS_j est capable de faire cette opération » (dans l'hypothèse où le poste de travail est choisi par le superviseur en fonction d'un critère d'optimisation, par exemple le taux de charge des différents postes pouvant assurer cette opération, ou le temps d'attente avant traitement) ;
- RQT_WS_j_op_i : requête émise par le produit à la ressource de transport : « déplacement sur le poste WS_j pour l'opération op_i » ;
- RPT_WS_j_op_i : compte-rendu du convoyeur à destination du produit : « maintenant sur le poste WS_j pour l'opération i » ;
- RQ_op_i_WS_j : requête du produit au poste de travail WS_j : « lancement de l'opération op_i » ;
- RP_op_i_WS_j_time_date : compte-rendu du poste de travail au produit indiquant que l'opération op_i est terminée, à l'heure *time* et à la date *date*.

Un algorithme embarqué dans le mote assure l'exécution (activité A3 de la Figure 7) de la gamme du produit (qui ne se compose en réalité que de la suite logique des opérations). Pour cela l'ordre dans lequel les requêtes vont être émises par le produit suit une séquence générique (Figure 9), qui est répétée autant de fois que d'opérations nécessaires à la fabrication.

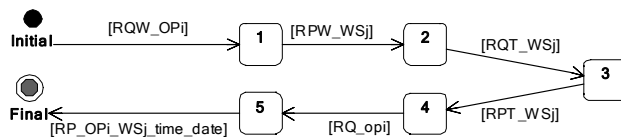


Figure 9. Séquence générique du comportement interne du contrôle du produit

A partir de ce comportement interne et du langage spécifié ci-dessus, il est possible de représenter les séquences de messages entre le produit et son environnement comme le montre la Figure 10.

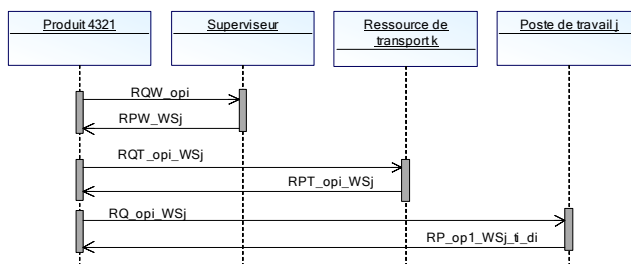


Figure 10. Échanges de messages entre un produit et son environnement pour réaliser une opération *opi*

3.2 Spécification d'une architecture d'implantation générique d'un contrôle par le produit

Les messages, tels que présentés au paragraphe précédent, qui sont échangés entre le produit et son environnement, permettent d'identifier différentes applications formant une architecture applicative de contrôle par le produit (Figure 11). Il est ainsi possible de proposer une architecture générique composée : d'une application de contrôle par le produit distribué dans chacun des produits, d'applications de contrôle / commande des ressources de production, et d'une application de supervision assurant le contrôle de la cellule, l'affectation des fabrications des produits aux différents motes et la répartition des charges sur les ressources.

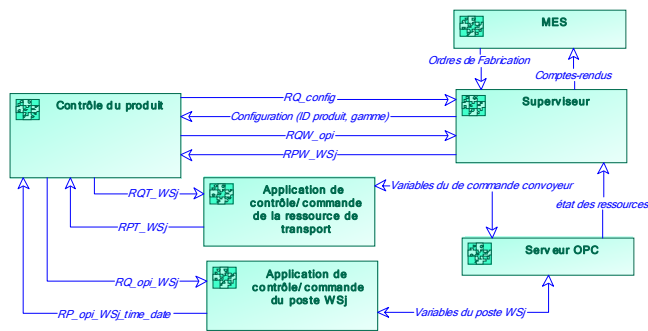


Figure 11. Principe d'une architecture applicative de contrôle par le produit

Afin de supporter successivement le contrôle de la fabrication de différents produits, les motes embarqueront une application de contrôle qui devra être suffisamment générique et paramétrable afin de pouvoir s'adapter aux caractéristiques des différents produits (Figure 12), plutôt que d'applications téléchargées successivement qui seraient adaptées aux spécificités de produits successifs. Cela réduit d'autant le travail de développement du programme à embarquer, car une simple liste de paramètres, extractible automatiquement des données du MES (ID produit, gamme logique ...), est dans ce cas nécessaire et suffisante au contrôle embarqué dans le produit.

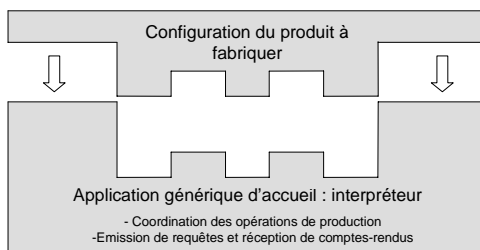


Figure 12. L'application de contrôle embarquée dans le produit sera paramétrable pour différents produits

4 ÉMULATION D'UNE CELLULE FLEXIBLE D'ASSEMBLAGE

Après avoir spécifié de manière générique dans le paragraphe précédent un comportement à embarquer dans les motes pour assurer le contrôle par le produit, ce paragraphe s'intéresse aux possibilités réelles d'implantation, en se basant pour cela sur la technologie des motes de réseaux de capteurs et sur une émulation des ressources de production du Système Flexible de Production (SFP) de l'Atelier Inter-établissement de Productique Lorrain (<http://www.aip-primeca.net>).

4.1 Présentation du SFP

Le SFP se compose d'un convoyeur autour duquel s'organisent un poste de chargement, 4 postes d'assemblage identiques et un poste de déchargement (Figure 13).

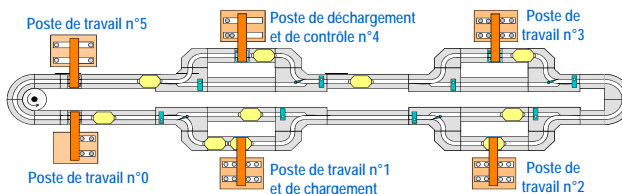


Figure 13. Vue d'ensemble du SFP

Les différents postes de travail ont différents magasins de composants, ce qui leur permet d'avoir une certaine flexibilité sur les produits qui peuvent être fabriqués sur le SFP. Ils peuvent assembler 6 types de composants pour former différents types de produits (Figure 14) à l'aide d'un manipulateur pneumatique.

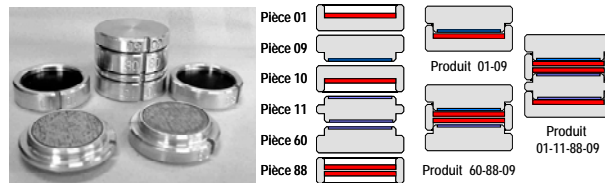


Figure 14. Types de pièces et exemples de produits assemblés sur le SFP

Dans le scénario de validation, les hypothèses suivantes seront considérées afin d'associer motes et produits : les produits resteront sur la même palette durant leur fabrication, et il n'est possible d'assembler qu'un seul produit par palette, la palette étant le support liant physiquement le mote et le produit.

4.2 Architecture émulée de contrôle par le produit

Les palettes du SFP sont donc considérées dans notre cas équipées chacune avec un mote (dans le cas présent, les motes P-Particle© de Particle Computer ont été employés, <http://particle.teco.edu/>). Une application générique de contrôle par le produit (Figure 12) respectant les spécifications définies dans la partie 3, a été développée en C et transférée dans les différents motes. La communication entre les motes embarqués et les ressources de production est assurée par une passerelle XBridge© qui transmet les paquets UDP utilisés par les motes pour communiquer du réseau de capteurs sans fil au réseau Ethernet industriel reliant les ressources de production entre elles, et vice versa (Figure 15).

Dans l'architecture technique proposée les produits et leurs motes sont « réels », mais les ressources de production, de même que le superviseur, sont émulées. Cela permet de valider dans un premier temps les possibilités d'implantation des différents niveaux d'intelligence technique du produit avec la technologie des réseaux de capteurs, l'objectif étant à terme de valider sur une architecture industrielle si les résultats de cette émulation sont probants.

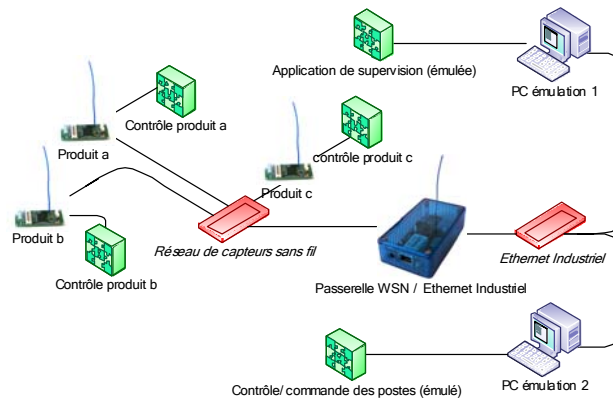


Figure 15. Principe de l'architecture technique employée

4.3 Développement d'une émulation des ressources du SFP contrôlées par le produit pour évaluer le niveau d'intelligence technique du produit

Pour la mise en place de l'émulation des postes de travail du SFP et de son superviseur, différentes applications, incluant des bibliothèques spécifiques aux réseaux de capteurs sans fils, ont été développées et/ou utilisées.

4.3.1 Structure de l'émulation

Comme présenté sur le schéma de principe de la Figure 15, une application émule le superviseur, et d'autres émulent les ressources de production. L'émulation des ressources est la plus simple, car, le but étant de valider le comportement du produit, les postes qui reçoivent les requêtes n'ont, d'un point de vue informationnel, qu'à répondre que les opérations ont été effectuées (Figure 10). Pour cela, l'émulation des postes de travail et du convoyeur repose sur l'utilisation de l'outil Particle Analyser, téléchargeable sur le site du Telecooperation Office (Teco) de l'Université de Karlsruhe (http://particle.teco.edu/software/development_tools/index.html). Cet analyseur capture les paquets échangés sur UDP entre les produits et les ressources, et permet l'envoi de messages adressés à des motes particuliers.

L'émulation du superviseur est quant à elle plus complexe. Le superviseur doit en effet être capable d'affecter, en fonction des ordres de fabrication à exécuter, le contrôle de l'assemblage d'un produit à un mote particulier. À ce stade

du développement, le mote, bien qu'il soit capable de contrôler l'exécution de la séquence nécessaire à la fabrication, n'est pas encore capable de prendre seul une décision sur la répartition des charges de la cellule. Il faudrait pour cela qu'il interroge tous les postes, puis prenne une décision en fonctions d'un critère de recherche opérationnelle. Le superviseur doit donc, conformément au scénario décrit plus haut, être capable, à partir des informations sur l'état de chacun des postes d'assemblage (pièces en magasin, nombre de produits en file d'attente, ...), de répartir les produits afin d'optimiser la productivité de la cellule. Une application prototype, basée sur les bibliothèques fournies par Particle pour communiquer avec les motes, a été développée (Figure 16).

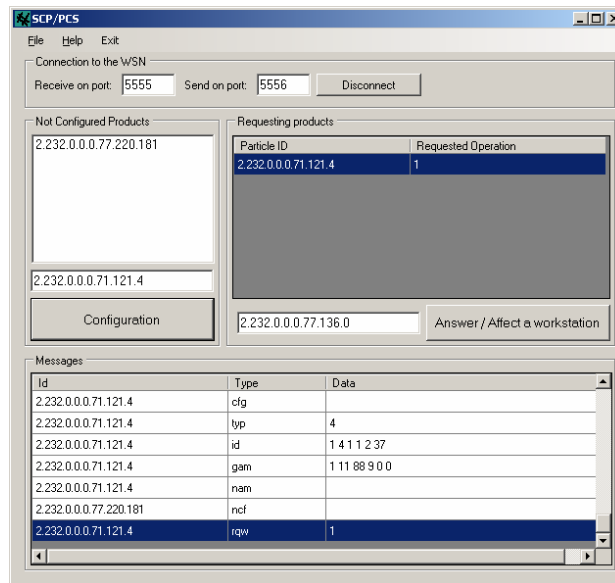


Figure 16. Écran principal de l'application

Cette application est notamment capable de :

- montrer les messages envoyés par les produits (fenêtre 'messages),
- lister les motes qui ne sont pas affectés (fenêtre 'requesting products'), et les configurer en leur affectant une configuration particulière (Figure 17) en fonction des ordres de fabrication à exécuter,
- lister les motes qui demandent un poste pour une opération particulière et leur répondre (Figure 18) ; le choix du poste est pour l'instant laissé à l'utilisateur.

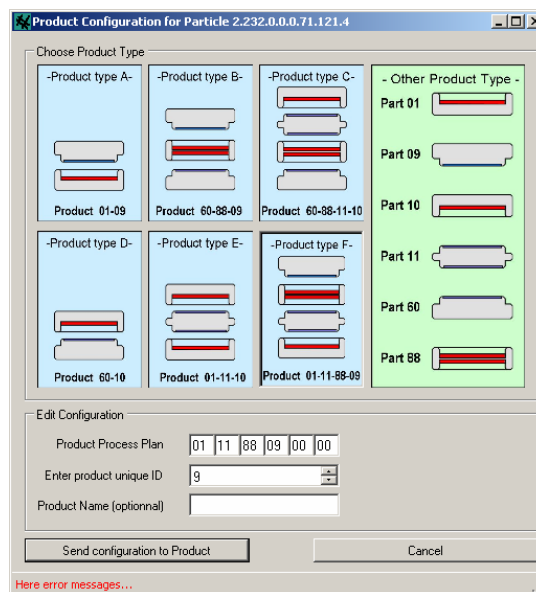


Figure 17. Écran permettant la configuration des motes pour la fabrication de différents assemblages

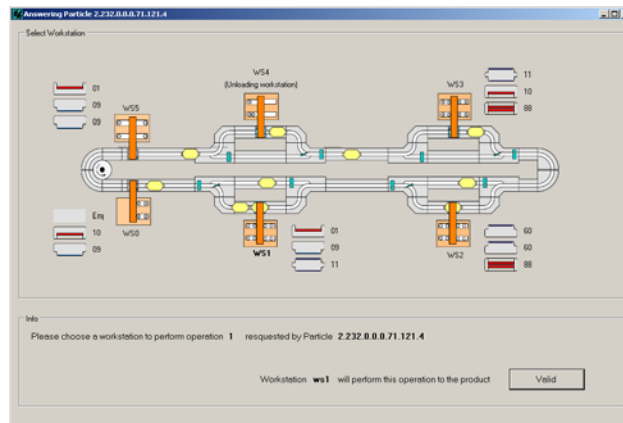


Figure 18. Écran permettant le choix d'un poste

4.3.2 Validation du niveau 1 d'une intelligence technique du produit

D'après la définition de (Wong *et al.* 2002), le niveau 1 de l'intelligence technique du produit correspond à son aptitude à couvrir les points 1 à 3 de la définition : un identifiant unique, la capacité de communiquer avec son environnement, et la capacité de stocker de l'information le concernant. Avec la plateforme d'émulation telle que présentée (plus particulièrement avec l'application qui a été développée) et le comportement programmé dans les nœuds, il est possible de configurer un mote rattaché à un produit (Figure 8). Lors de l'activité de configuration, le mote reçoit un paquet UDP contenant sa configuration, c'est-à-dire l'identifiant du produit physique à fabriquer (ID), sa gamme (GAM), et éventuellement d'autres paramètres tels qu'un type de produit (TYP) ou son nom (NAM). Comme le montre la fenêtre des messages émis par les motes de la Figure 16, le produit est capable, lorsqu'on interroge, de renvoyer sa configuration.

Cela montre d'une part, que le produit peut avoir un identifiant propre (point 1) (en plus de l'identifiant du mote), et d'autre part qu'il peut communiquer (point 2) à une application externe des données le concernant (point 3). Il semble donc possible d'implanter au moins une intelligence de niveau 1 avec de tels motes.

4.3.3 Validation du niveau 2 d'une intelligence technique du produit

Le niveau 2 de l'intelligence technique du produit correspond, en plus des caractéristiques de niveau 1, à l'aptitude à utiliser un langage, et à l'aptitude à jouer un rôle dans la prise de décision concernant son devenir. Avec leur programme spécifique embarqué, les motes sont capables d'interpréter les paquets UDP qui leurs sont envoyés en fonction de leur type, et de répondre à une sollicitation. Par exemple, il est possible de demander à un produit sa configuration par une requête adressée de type « CF? », le produit répondra en donnant sa configuration. Il est donc capable d'interpréter des données envoyées dans des paquets UDP en requêtes informatives. Il est également capable d'émettre des requêtes, comme par exemple sur la dernière ligne de la Figure 19, où le mote demande sur quel poste (RQW) peut lui être assemblé une pièce de type 01. Cela montre qu'avec un mote, un produit est capable d'utiliser une forme de langage pour communiquer avec son environnement (point 4).

Id	Type	Data
2.232.0.0.71.121.4	cfg	
2.232.0.0.71.121.4	typ	4
2.232.0.0.71.121.4	id	1 4 1 1 2 3 7
2.232.0.0.71.121.4	gam	1 1 1 8 8 9 0 0
2.232.0.0.71.121.4	nam	
2.232.0.0.77.220.181	ncf	
2.232.0.0.71.121.4	rqw	1

Figure 19. Réponse à un message demandant quelle est la configuration d'un produit

A partir de la gamme qui lui a été donnée, et du comportement générique qu'il comporte (Figure 9 et Figure 12), le mote va être capable, de manière autonome, d'assurer le contrôle de la production du produit. Pour cela il est capable d'interpréter les différents comptes-rendus qu'il reçoit, et d'ordonnancer les requêtes à destination des ressources de production qui vont permettre de fabriquer le produit (Figure 20), prenant ainsi une part active dans le contrôle de la production (point 5).

Sender ID	S...	T...	Type	Data	Time	Date	Location
2.232.0.0.0.77.220.181	22	2...	RQW	60	15:33:31	20/09/2007	114.111.1
1.1.1.1.192.168.8.79	7	1...	RPW	4	15:33:35	20/09/2007	114.111.1
1.1.1.1.192.168.8.79	7	1...	CAD	2.232.0.0.0.77.220.181	15:33:35	20/09/2007	114.111.1
2.232.0.0.0.77.220.181	23	2...	RQT	60.4	15:33:38	20/09/2007	114.111.1
1.1.1.1.192.168.8.79	8	2...	RPT	4	15:33:59	20/09/2007	114.111.1
1.1.1.1.192.168.8.79	8	1...	CAD	2.232.0.0.0.77.220.181	15:33:59	20/09/2007	114.111.1
2.232.0.0.0.77.220.181	24	2...	RQ	60.4	15:34:07	20/09/2007	114.111.1
1.1.1.1.192.168.8.79	9	1...	RP	60.4.15.35.20.9.7	15:35:06	20/09/2007	114.111.1
1.1.1.1.192.168.8.79	9	1...	CAD	2.232.0.0.0.77.220.181	15:35:06	20/09/2007	114.111.1
2.232.0.0.0.77.220.181	25	2...	RQW	88	15:35:11	20/09/2007	114.111.1

Figure 20. Échanges de messages entre un produit et les différentes ressources

Ainsi, un mote équipant un produit serait capable, en plus d'assurer un niveau d'intelligence 1 au produit, d'utiliser un langage et de prendre des décisions en réaction à des informations qu'il reçoit, et donc d'implanter une intelligence de niveau 2.

5 CONCLUSION

Par rapport à un système plus classique, géré de manière hiérarchique et centralisée, un système contrôlé par le produit doit permettre d'assurer la synchronisation continue des flux physiques et informationnels. Les avantages sont relatifs d'une part à la traçabilité individuelle des produits, et d'autre part à la résilience d'un système contrôlé par produit (possibilité de faire face à des changements fréquents de la production / personnalisation des produits, à des pannes ou indisponibilités des machines, ...).

Ce papier s'intéresse à des technologies infotroniques (RFID, réseaux de capteurs), et met en évidence les possibilités théoriques des motes, capables, à la différence des puces RFID, d'être à l'initiative d'une communication, et utilisant une architecture réseaux plus flexible. Un environnement de production émulé a permis de valider de manière opérationnelle ces possibilités théoriques, montrant ainsi qu'il serait possible d'implanter une intelligence technique de niveau 2 telle que définie par (Wong *et al.* 2002) dans un produit qui intégrerait une technologie similaire aux motes de réseaux de capteurs sans fil.

La capacité de capture des nœuds n'est pas encore utilisée. Ils pourront par exemple, grâce à leurs capteurs de température ou d'accélération, détecter que les conditions dans lesquelles se trouvent les produits (température élevée, vibrations ...) ne sont pas adaptées ou risquent de les endommager, et réagir en fonction de cela par l'émission de requêtes.

Il reste à démontrer de manière opérationnelle l'intérêt d'un tel contrôle par le produit en termes qualitatifs et quantitatifs, notamment en intégrant le facteur d'échelle (nombre important de produits dans un même environnement). Ce dernier va poser des problèmes relatifs aux priorités entre les produits, aux interférences radio, à la géolocalisation des produits, à la congestion du flux ... Le contrôle par le produit propose des pistes intéressantes, par exemple dans le cas de problèmes de convoyage : un produit « égaré » ou bloqué pourra être identifié et réintégré dans le flux grâce aux informations qu'il porte et aux requêtes qu'il émet.

REFERENCES

- Akyildiz I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38, pp. 393-422.
- Arampatzis Th., J. Lygeros, S. Manesis (2005). A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks, Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, Limassol, Cyprus, June 27-29.
- Babiceanu R. F., F. F. Chen (2006). Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, pp. 111-131.
- Cassandras C.G., S. LAFORTUNE (1999), *Introduction to discrete event systems*. Kluwer Academic. ISBN 0-7923-8609-4.
- Chirn J.-L., D. McFarlane (2005). Evaluating holonic control systems: a case study. Proceedings of the 16th IFAC World Congress in Prague, Elsevier, ISBN 008045108X.
- Da Silveira G., D. Borenstein, F.S. Fogliatto (2001). Mass customization: literature review and research directions. *Int. Journal of Production Economics*, 72, pp 1-13.
- Deen, S.M. (Editor) (2003). *Agent-based manufacturing - Advances in the holonic approach*, Springer, ISBN 3-540-44069-0.
- Finkenzeller K. (2003). *RFID handbook: fundamentals and application in contactless smart cards and identification*, J. Wiley and Son, ISBN 0-470-84402-7.
- International Organisation for Standardization (2003). *ISO 62264: enterprise-control system integration*.

- Hollocks B.W., H.T. Goranson, D.N. Shorter, F.B. Vernadat (1997). Assessing enterprise integration for competitive advantage, *ICEIMT'97, International Conference on Enterprise Modelling and Modelling Technology*, Berlin.
- Karkkainen M., J. Holmstrom, K. Framling, K. Artto (2003). Intelligent products – a step towards a more effective project delivery chain, *Computers in Industry*, 50, pp. 141-151.
- Koestler A. (1967). *The ghost in the machine*, ISBN 0-14-019162-5.
- Leitão P., F. Restivo (2006). ADACOR: A Holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control, *Computers in Industry*, 57, pp. 121-130.
- Marik V., J. Lazansky (2007). Industrial application of agent technologies, *Control Engineering Practice*, 15(11), pp. 1364-1380.
- McFarlane D., S. Sarma, J.L. Chirn, C.Y. Wong, K. Ashton (2003). Auto id systems and intelligent manufacturing control, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 16 (4), pp. 365-376.
- Morel G., H. Panetto, M. Zaremba, F. Mayer (2003). Manufacturing enterprise control and management system engineering: rationales and open issues. *IFAC Annual Reviews in Control*, 27 (2).
- Morel G., P. Valckenaers, J.M. Faure, C. Pereira, C. Diedrich (2005). Survey paper on manufacturing plant control challenges and issues, Proceedings of the 16th IFAC world congress in Prague, ISBN 008045108X.
- Nof S. Y., G. Morel, L. Monostori, A. Molina, F. Filip (2006). From plant and logistics control to multi-enterprise collaboration, *IFAC annual reviews in control*, 30 (1), pp. 55-68.
- Pétin J.-F., D. Gouyon, G. Morel (2007). Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell, *Control Engineering Practice*, 15, pp. 595-614.
- Ramadge P.J., W.M. Wonham (1987). Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Control and Optimization*, Vol. 25, n° 1.
- Valckenaers P. (Editor) (2001). Special issue: Holonic Manufacturing Systems, *Computers In Industry*, 46 (3), pp. 233-331.
- Van Brussel H., J. Wyns, P. valckenaers, L. Bongaerts, P. Peeters (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in Industry*, 37 (3), pp. 255-274.
- Wong C.Y., D. McFarlane, A. A. Ahmad Zaharudin, V. Agarwal (2002). The intelligent product-driven supply chain, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.