



HAL
open science

Vers l'implantation d'un système contrôlé par le produit à l'aide de réseaux de capteurs sans fil

David Gouyon, Michael David

► To cite this version:

David Gouyon, Michael David. Vers l'implantation d'un système contrôlé par le produit à l'aide de réseaux de capteurs sans fil. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 2009, 43 (4-5), pp.537-560. 10.3166/jesa.43.537-560 . hal-00390431

HAL Id: hal-00390431

<https://hal.science/hal-00390431>

Submitted on 2 Jun 2009

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.

Vers l'implantation d'un système contrôlé par le produit à l'aide de réseaux de capteurs sans fil

David Gouyon, Michael David

*Centre de Recherche en Automatique de Nancy
UMR 7036 CNRS Nancy Université
Faculté des Sciences et Techniques – BP 239
F-54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex*

david.gouyon@cran.uhp-nancy.fr, michael.david@cran.uhp-nancy.fr

RÉSUMÉ. Dans le contexte dynamique 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 aux systèmes classiques de production. Parmi les approches possibles, les nouvelles architectures de contrôle par le produit donnent un rôle actif au produit tout au long de sa fabrication. Le travail présenté dans ce papier a pour objectif de valider les possibilités d'implantation du contrôle par le produit à l'aide de la technologie des réseaux de capteurs sans fil. Il propose pour cela des modèles génériques de comportement du produit et d'interaction avec les ressources. Un environnement de validation utilisant ces modèles a été développé autour d'un réel système de production.

ABSTRACT. In the dynamically moving context of mass-customization of products, new manufacturing control architectures, based on the consideration of highly distributed, autonomous, adaptable and efficiently cooperating units integrated by a plug-and-operate approach, seem to be efficient alternatives. Amongst them, the concept of a product-driven distributed control promotes an active role of the product in its manufacturing. This paper aims at validating the possibilities of Wireless Sensor Networks for the implementation of a product-driven control. For this reason, it proposes generic models for the product's behaviour and for the interactions with resources. These models are used as guidelines to develop a validation environment based on a real flexible production system.

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

KEYWORDS: product-driven control, wireless sensor networks, emulated environment.

1 Introduction

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). Les possibilités d'intégration de cette dernière doivent, dans un contexte évoluant dynamiquement, être améliorées en suivant les niveaux de la métrique « Enterprise Integration Capability Model » (Hollocks *et al.* 1997) (EICM, Figure 1).

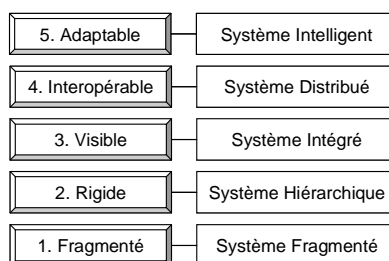


Figure 1. Métrique EICM (*Enterprise Integration Capability Model*)

Des normes, comme l'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 à *certaines instants* (intégration « synchronique » (Galara et Hennebicq 1999)) entre les systèmes de contrôle du niveau entreprise et du niveau de la production, et une intégration à *travers le temps* (intégration « diachronique » (Galara et Hennebicq 1999)) au cours de l'exécution des activités (flux de services assurant la continuité de la cohérence des flux d'informations). La principale difficulté est alors d'assurer la cohérence entre les flux de biens et les flux de services.

Une alternative possible, pour atteindre le niveau 'interopérable' du modèle EICM (Figure 1), et donc d'assurer cette cohérence, est de remettre en question la vision hiérarchique et intégrée du contrôle de l'entreprise telle que celle du Computer Integrated Manufacturing (CIM) (Ranky 1986, Zelm *et al.* 1995) pour une vision plus interopérable, voire intelligente, en considérant le produit comme étant « actif » (Brun-Picard *et al.* 1997), porteur de son information, jouant le rôle du « contrôleur » des ressources de fabrication (McFarlane *et al.* 2003, Morel *et al.* 2005, Valckenaers *et al.* 2009) (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 de biens et les flux de services (Gouyon *et al.* 2007).

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 de systèmes vus comme des unités distribuées, autonomes, adaptables, et non plus intégrées de manière « rigide ». Elles n'interagissent entre elles que par l'intermédiaire du produit et ne nécessitent plus de développement spécifique à leur intégration. Ainsi elles peuvent coopérer de manière agile, 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) (Christensen 1994, Deen 2003).

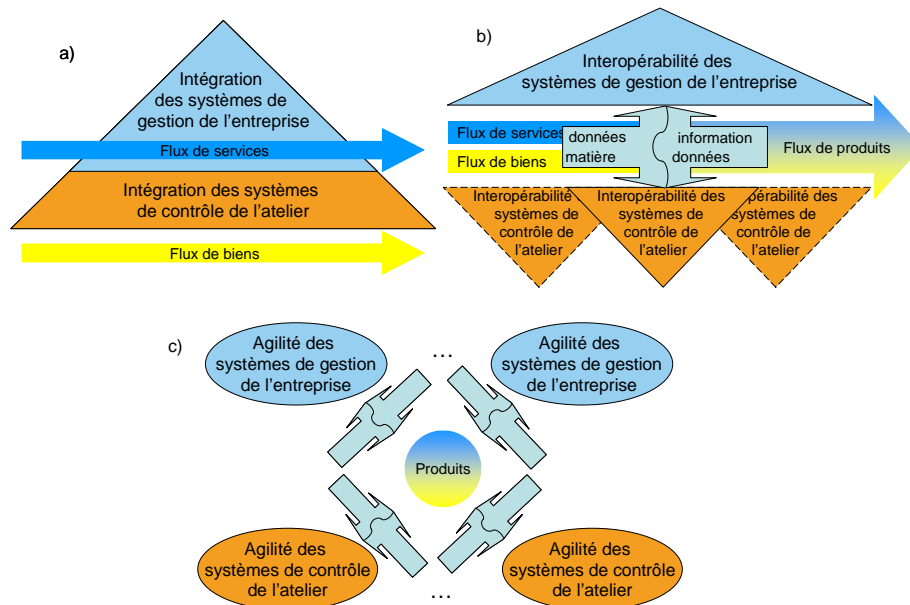


Figure 2. D'une production intégrée vers une production agile

Ce genre d'alternatives 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 intégrant de l'informatique et de l'électronique embarquées (l'« infotronique ») conduit aujourd'hui, dans le cadre du contrôle par le produit (Brun-Picard *et al.* 1997, McFarlane *et al.* 2003), à un rapprochement des résultats de recherche et des implantations réelles : Identification par Radio Fréquence (RFID), réseaux sans fil, nouvelles générations d'automates programmables, support des technologies multi-agents ...

Ce papier s'intègre dans le cadre d'une étude en cours dont l'objectif global est de valider de manière opérationnelle les intérêts du contrôle par le produit, en cherchant à répondre à différentes questions qui se posent, en termes qualitatifs (peut-on assurer une production personnalisée (suffisamment flexible) ? assure-t-on individuellement la traçabilité des produits ? un système contrôlé par le produit est-il robuste et tolérant face à des perturbations ? ...) et quantitatifs (le contrôle par le produit permet-il une productivité accrue ? ...). Parmi les différentes facettes du contrôle par le produit (McFarlane *et al.* 2003, Morel *et al.* 2005), ce papier s'intéresse à la possibilité d'assurer la flexibilité de la production qui est nécessaire dans le cadre d'une production personnalisée, tout en garantissant la traçabilité individuelle des produits. Plus concrètement, il s'agit de l'interaction des produits « actifs » avec les ressources de production et leurs systèmes de contrôle / commande et de pilotage tels que automates programmables, superviseurs et MES (Gouyon *et al.* 2007). En particulier, ce papier présente un travail préparatoire dont l'objectif est de tester les possibilités d'une technologie infotronique afin de proposer un environnement de validation et d'évaluation du concept de contrôle par le produit. Il fournit pour cela des modèles génériques de comportement du produit et d'interaction avec les ressources, ainsi qu'un environnement de travail particulier servant de base aux expérimentations.

Après une description dans la section suivante du concept de contrôle par le produit et la proposition de modèles génériques de comportement et d'interaction produit / ressources, la section 3 de ce papier se propose d'étudier l'implantation du contrôle par le produit ainsi spécifié. Pour cela, elle présente différentes technologies d'implantation (RFID et réseaux de capteurs sans fil), et donne une spécification générique d'architecture applicative. La section 4 présente ensuite un exemple concret, implantant un contrôle dans un produit interagissant avec des ressources de production émulées, dont le but est de valider les différents niveaux d'« intelligence » implantables au produit à l'aide de la technologie 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 dans un premier temps pour objectif d'en décrire le concept, et dans un deuxième temps d'en proposer des modèles génériques de comportement du produit et d'interaction avec les ressources.

2.1 Entre produit « instrumenté » et produit « intelligent »

Considérer le produit comme actif lors de sa production amène à lui conférer des capacités d'intelligence technique (Karkkainen *et al.* 2003, Meyer *et al.* 2009). Selon (McFarlane *et al.* 2003), ces capacités, à attribuer au produit, sont les suivantes :

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

En fonction de ces cinq capacités, (McFarlane *et al.* 2003) définissent deux niveaux d'intelligence technique du produit :

- un produit avec une intelligence de niveau 1 est capable de communiquer son état (forme, composition, localisation, critères clés). Ce niveau 1 est orienté vers les informations du produit, il couvre les points 1 à 3 décrits précédemment ;
- un produit avec une intelligence de niveau 2 est capable non seulement de communiquer son état, mais aussi d'influencer les décisions qui sont prises à son égard. Ce niveau 2 est orienté vers la décision, il 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 une possibilité de communication ni une capacité suffisante pour traiter et stocker l'ensemble des informations nécessaires à la fabrication et la traçabilité individuelle des produits. Pour cette raison, des solutions dégradées sont envisagées : les produits sont simplement identifiés et les services relatifs (stockage et traitement des informations) sont effectués par des entités actives hébergées par un

système informatique. Il existe en effet des systèmes de production multi-agents qui sont implantés dans des environnements de production réels (McFarlane *et al.* 2003, Blanc 2006), mais il y a quelques contraintes, liées par exemple à la lecture des puces RFID : le taux de fiabilité de lecture de ces puces n'est pas encore de 100%, et les informations ne sont accessibles que dans la limite du champ des lecteurs. Ainsi le système de production ne peut pas encore être complètement observable en tout point à tout instant.

Dans ces différents travaux, le produit est considéré comme central au problème de l'automatisation, et possède, de manière conceptuelle, 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. Les HMS (Christensen 1994, 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 « *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 se basant sur ce concept, la communauté IMS, et plus spécifiquement celle des HMS (Christensen 1994, Valckenaers 2001, Norrie et Brennan 2002, Deen 2003), développe et fait la promotion d'architectures conceptuelles (Van Brussel *et al.* 1998, Zhang et al. 2003, Brennan 2005, Leitao et Restivo 2006) qui tendent à concéder aux produits un comportement intelligent. Ces HMS (Babiceanu et Chen 2006) sont des systèmes de contrôle distribué 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*. Dans le nom même de cette architecture de contrôle apparaît « produit », montrant ainsi explicitement le rôle actif que peuvent avoir les produits dans le cadre des HMS.

Parmi les avantages de l'approche HMS, figure, comme l'ont évalué (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 (Gouyon *et al.* 2007).

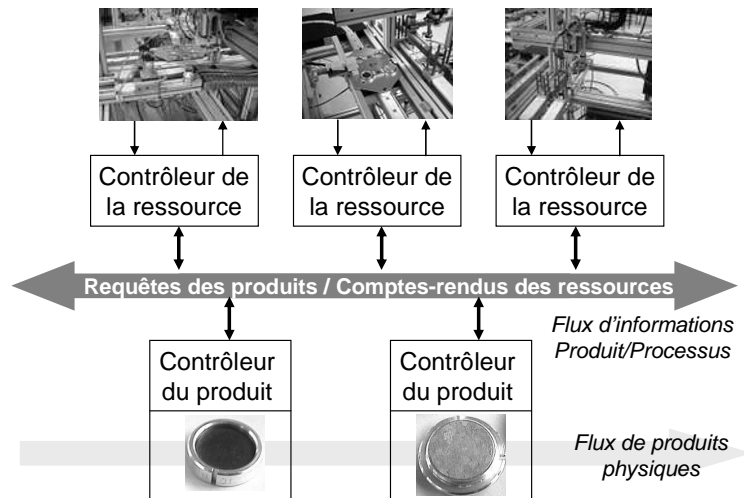


Figure 3. Principe de l'architecture du contrôle par le produit

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.

La définition des différents contrôleurs est basée, d'une part, sur le modèle des capacités du système de production, décrivant sa topologie et les opérations possibles sur chacune des ressources, et d'autre part, sur le modèle 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.

Pour les mêmes raisons, l'hypothèse d'un niveau 2 d'intelligence du produit (McFarlane *et al.* 2003) qui est faite ici porte sur son autonomie pour le contrôle de l'exécution de sa gamme. L'allocation des ressources, restant un problème de recherche opérationnelle sans impact direct sur notre étude, est considérée pour l'instant comme extérieure au produit (résidant par exemple dans un superviseur centralisé), et fera l'objet de travaux ultérieurs.

2.4 Deux technologies d'implantation

Comme cela est écrit plus haut, 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 des tags RFID et des réseaux de capteurs sans fil. Ceci permettra d'en sélectionner une en vue 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).

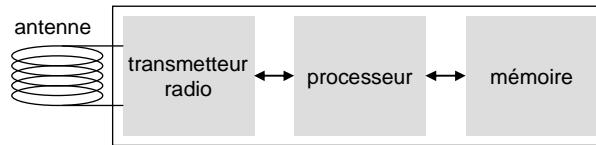


Figure 4. Structure d'un tag RFID

Les tags les plus utilisés, qui sont aussi les moins chers, sont dits « passifs » car n'ayant pas d'alimentation interne, et ne contenant 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 de la microélectronique et des communications sans fil permettent, à l'heure actuelle, la réalisation de très petits capteurs (Figure 5). Ces éléments sont dotés d'une alimentation électrique embarquée, de capacités de détection, de traitement et de communication sans fil de l'information (Akyildiz *et al.* 2002) et sont utilisés comme des briques élémentaires pour construire des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks – WSN).

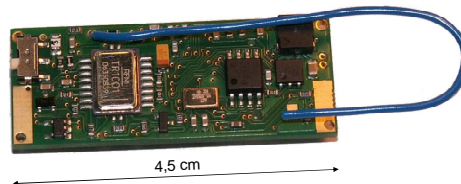


Figure 5. Exemple de nœud de réseau de capteur sans fil

Ces nœuds miniaturisés de réseaux de capteurs sans fil 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. 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). Des applications de contrôle par le produit les utilisent également en logistique, afin de fournir des fonctionnalités de sécurité active (Dobre et Bajic 2008).

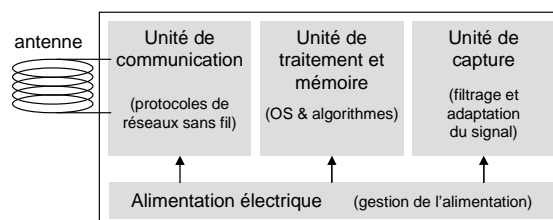


Figure 6. *Vue des composants fonctionnels d'un mote*

2.4.3 *A propos 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. En se basant sur la littérature et les descriptifs techniques des fabricants de tags RFID (Finkenzeller 2003) et de réseaux de capteurs sans fil (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 (McFarlane *et al.* 2003), 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 de capteurs sans fil semblent quant à eux permettre une intelligence de niveau 2, car ils sont capables d'embarquer une fonctionnalité de prise de décision. 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) et peuvent être eux-mêmes à l'origine d'une communication. De plus, alors que le taux de lecture des tags n'est pas encore à l'heure actuelle de 100%, les réseaux de capteurs utilisent des protocoles réseaux de haut niveau qui permettent d'assurer une certaine fiabilité (redondance d'envois, accusés de réception ...). 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 émulées.

Capacités techniques 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 lorsqu'il est dans leur champ de lecture	Oui, les antennes RFID peuvent lire le contenu du tag lorsqu'il est dans leur champ de lecture	Oui, des données peuvent être envoyées <i>via</i> des protocoles de haut niveau
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 non interprétées	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, le processeur est capable de prendre une décision réflexe	Oui, le processeur est capable de prendre une décision élaborée en utilisant un algorithme embarqué

Tableau 1. Comparaison des possibilités d'implantation des capacités d'intelligence du produit entre tags RFID et notes

3 Vers une implantation du contrôle par le produit à l'aide de notes

3.1 Proposition de modèles de comportement et d'interaction pour le 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 sur un système de production réel du concept de contrôle par le produit, cette partie détaille dans un premier temps une proposition de modèles de comportement des produits dans leur environnement, et donne ensuite une spécification d'architecture applicative générique.

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

Lors de son cycle 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 « active » de chaque produit (son contrôleur) 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.

3.1.1.1 Différents états du produit et de son support actif

Les produits sont conceptuellement considérés comme acteurs lors de leur cycle de production, mais pourront redevenir des produits « classiques » (ou passifs, c'est-à-dire sans partie intelligente capable de prendre des décisions sur leur fabrication) lorsqu'ils arrivent chez le client. Dans le cadre de cette étude, les éléments assurant la partie « active » des produits 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 éléments actifs pourront ainsi être utilisés de manière cyclique sur plusieurs produits.

Les activités successives d'un produit assurant le contrôle de sa fabrication et de son support actif, instrumenté par une technologie infotronique (puce RFID ou capteur sans fil), sont :

- A0 : le support n'est pas configuré, sa mémoire est vide et la fabrication d'aucun produit ne lui est affectée ; il diffuse régulièrement un message signalant qu'il est disponible pour réaliser un nouveau produit ;
- 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 support et lui envoie sa configuration ;
- A2 : le produit est en cours de fabrication, le support 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 mémorise les données et paramètres de production ;
- A3 : les opérations de transformation physique du produit sont terminées, la mémoire du support est téléchargée pour être stockée dans une base de données de production (de type MES par exemple), le support est désolidarisé du produit physique, puis est réinitialisé (mémoire et configuration remises à zéro) pour revenir dans l'activité A0.

3.1.1.2 Échanges entre le produit et son environnement

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

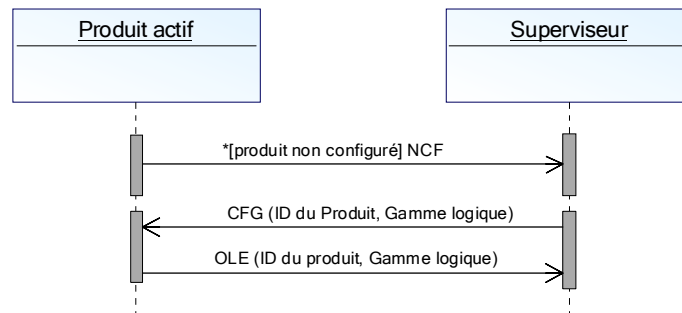


Figure 7. Diagramme de séquence UML montrant la configuration d'un produit par le superviseur (activités A0 et A1)

Initialement, le support n'est pas affecté à la fabrication d'un produit particulier. Il peut alors diffuser périodiquement sur le réseau de capteurs un message (NCF) indiquant qu'il n'est pas affecté, et qu'il peut être configuré (activité A0). Lorsqu'un nouvel ordre de fabrication est lancé, le superviseur pourra alors choisir de l'affecter (activité A1), 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 produit accuse réception de sa configuration (OLE) (Figure 7).

Le produit 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 produit 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_OPi_WS_j : réponse émise par le superviseur à destination du produit : « le poste WS_j est capable de faire cette opération OP_i » (dans l'hypothèse où le poste de travail est choisi 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_OP_i_WS_j : requête émise par le produit à la ressource de transport : « déplacement sur le poste WS_j pour l'opération OP_i » ;
- RPT_OP_i_WS_j : compte-rendu de la ressource de transport à destination du produit : « maintenant sur le poste WS_j pour l'opération OP_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 produit assure l'exécution (activité A3) 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 8), qui est répétée autant de fois que d'opérations nécessaires à la fabrication.

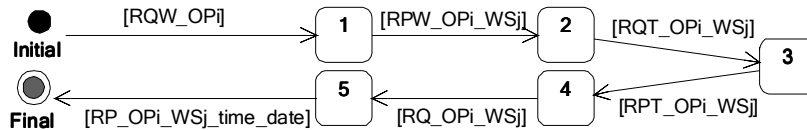


Figure 8. Séquence générique pour contrôler une opération OP_i par le produit

A partir de ce comportement interne et du langage défini ci-dessus, il est possible de représenter les séquences de messages entre le produit et son environnement comme le montre la Figure 9.

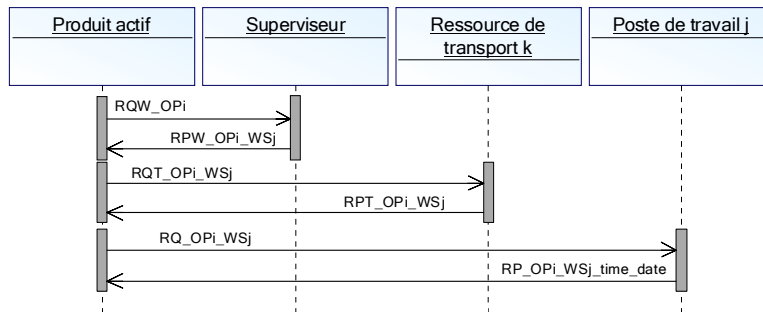


Figure 9. Séquence générique des échanges de messages entre un produit et son environnement pour réaliser une opération OP_i (activité A2)

3.2 Proposition d'une architecture applicative générique du contrôle par le produit

Les messages qui sont échangés entre le produit et son environnement, tels que présentés au paragraphe précédent, permettent d'identifier différentes applications formant une architecture applicative de contrôle par le produit (Figure 10). 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.

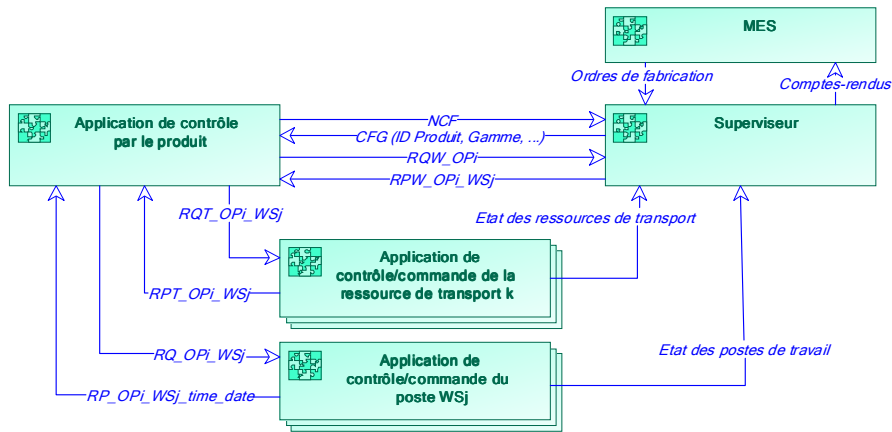


Figure 10. Principe d'une architecture applicative de contrôle par le produit

Afin de supporter successivement le contrôle de la fabrication de différents produits, les motes plutôt que d'embarquer des applications téléchargées successivement qui seraient adaptées aux spécificités de produits successifs, embarquent une application de contrôle qui est suffisamment générique et paramétrable afin de s'adapter aux caractéristiques des différents produits (Figure 11). 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. Les séquences (Figure 8) de requête et comptes-rendus nécessaires au contrôle de la fabrication du produit sont alors générées dynamiquement par cette application générique d'accueil.

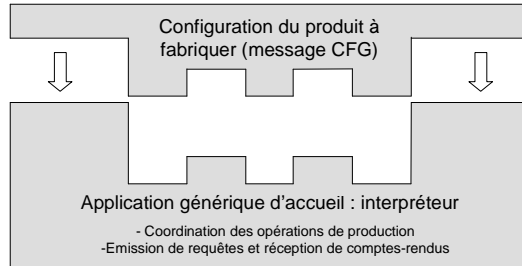


Figure 11. L'application de contrôle embarquée dans le produit est paramétrable pour différents produits

4 Application à une cellule flexible d'assemblage en vue de tester les possibilités techniques des motes

Après avoir proposé 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 sans fil et sur une émulation des ressources du Système Flexible de Production (SFP) de l'Atelier Inter-établissement de Productique Lorrain (<http://www.aip-primeca.net>). Cette émulation permet, en vue de la mise en place d'un contrôle par le produit sur le SFP, de réaliser des tests de validation préalables sans nécessiter pour autant des développements spécifiques complets.

4.1 Présentation du SFP

Le SFP se compose d'un convoyeur autour duquel s'organisent un poste de travail et de chargement, 4 postes d'assemblage identiques et un poste de déchargement et de contrôle (Figure 12).

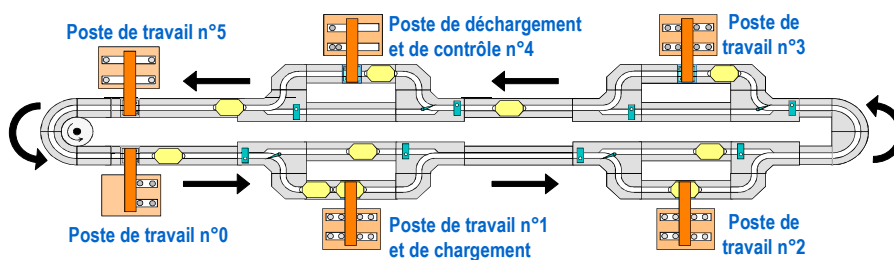


Figure 12. Vue d'ensemble du SFP

Les différents postes de travail possèdent plusieurs magasins de composants. Ceci permet au SFP d'avoir de la flexibilité sur les produits pouvant être fabriqués. Ils peuvent ainsi assembler à l'aide d'un manipulateur pneumatique 6 types de composants pour former différents produits (Figure 13).

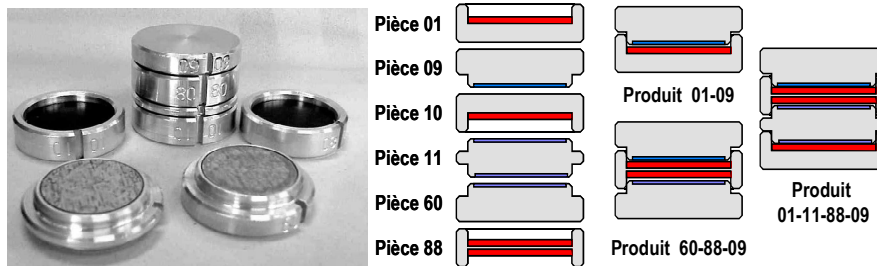


Figure 13. Types de pièces et exemples de produits assemblés sur le SFP

Dans le scénario de validation, les hypothèses suivantes seront considérées afin d'associer notes 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

Différents travaux, comme ceux de (Pannequin 2007), portent sur le développement d'un environnement d'émulation permettant de comparer les performances des systèmes contrôlés par le produit à celles des systèmes plus « classiques » de type hiérarchique par exemple. L'objectif de notre étude étant uniquement de valider les possibilités techniques des notes, et non la performance de l'architecture proposée, l'émulation ne portera pas sur l'ensemble du système (ressources + produits), mais uniquement sur les différentes ressources d'assemblage et sur le superviseur. Le contrôle par le produit est quant à lui réellement implanté dans les produits.

Les palettes du SFP sont dans notre cas équipées chacune avec un mote (dans le cas présent, les notes P-Particle© de Particle Computer ont été employés, <http://particle.teco.edu/>). Une application générique de contrôle par le produit (Figure 11) respectant les spécifications définies dans la partie 3.1.1, a été développée en C et transférée dans les différents notes. La communication entre les notes embarqués et les ressources de production est assurée par une passerelle XBridge© qui transmet les paquets UDP utilisés par les notes pour communiquer du

réseau de capteurs sans fil au réseau Ethernet industriel reliant les ressources de production entre elles, et vice versa (Figure 14).

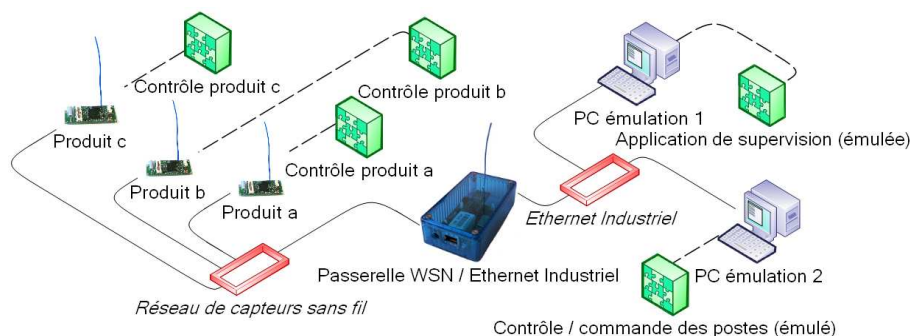


Figure 14. Principe de l'architecture technique employée

Dans l'architecture technique utilisée les produits et leurs motes sont « réels », mais les ressources de production, de même que le superviseur, sont émulées. Cela permet de valider, dans une première phase, l'implantation possible des différents niveaux d'intelligence technique du produit avec la technologie des réseaux de capteurs. A terme, l'objectif est de valider sur une architecture industrielle si les résultats sont probants.

4.3 Développement d'une émulation des ressources du SFP

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 fil, ont été développées et/ou utilisées.

4.3.1 Structure de l'émulation

Comme présenté sur le schéma de principe de la Figure 14, 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 9). 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). 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 15).

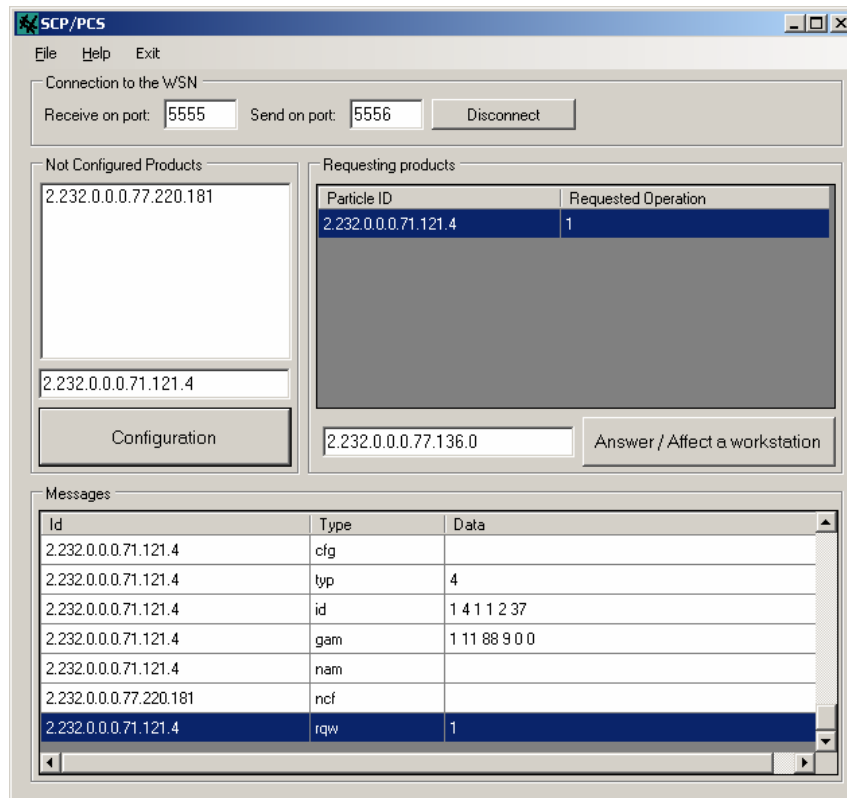


Figure 15. Écran principal de l'application

L'écran principal permet d'observer et de trier toutes les requêtes exprimées par les produits. Ainsi, l'application est notamment capable de :

- montrer les messages envoyés par les différents produits (fenêtre 'Messages'). Sur l'écran de la figure 16, on peut observer 3 identifiants de notes (ex : 2.232.0.0.0.71.121.4), soit 3 produits en cours de fabrication,
- lister les notes qui ne sont pas affectés envoyant des messages NCF (fenêtre 'Not Configured Products'), et les configurer en leur affectant une configuration particulière ou un type de produit (Figure 16) en fonction des ordres de fabrication à exécuter,
- lister les notes ou produits qui demandent un poste de travail (requêtes RQW) pour une opération particulière (fenêtre 'Requesting products'), et leur répondre (Figure 17) ; le choix du poste est pour l'instant laissé à l'utilisateur, dans le futur, le produit décidera seul du poste sur lequel il veut se rendre.

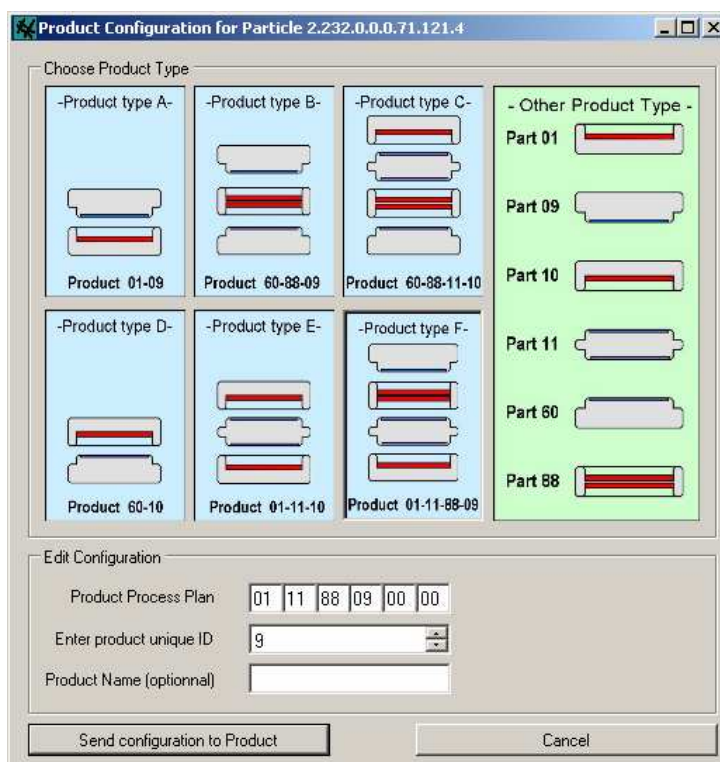


Figure 16. Écran permettant la configuration des notes pour la fabrication de différents assemblages

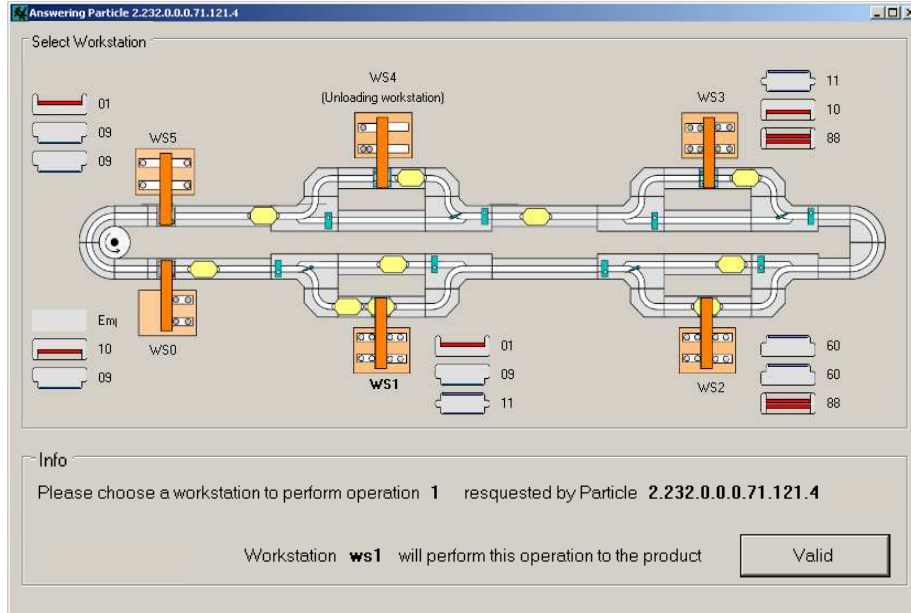


Figure 17. Écran permettant le choix d'un poste pour une opération (superviseur)

4.4 Évaluation des possibilités techniques des notes à l'aide du cas d'étude

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

D'après la définition de (McFarlane *et al.* 2003), le niveau 1 de l'intelligence technique du produit correspond à son aptitude à couvrir les capacités 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 développée et le comportement programmé dans les notes, il est possible de configurer un mote pour assurer l'assemblage d'un produit (Figure 7). Lors de l'activité de configuration A1, le mote reçoit un message contenant sa configuration, puis, afin d'en accuser réception, renvoie le contenu de cette configuration (Figure 15), dont son identifiant (champs ID du message CFG). Cela montre d'une part que le produit peut avoir un identifiant propre (capacité 1) (en plus de l'identifiant du mote), et d'autre part qu'il peut communiquer (capacité 2) à une application externe des données le concernant (capacité 3). Il semble donc possible d'implanter au moins une intelligence de niveau 1 avec de tels notes.

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

Le niveau 2 de l'intelligence technique du produit correspond, en plus des capacités de niveau 1, à la capacité d'utiliser un langage (capacité 4), et à la capacité de jouer un rôle dans la prise de décision concernant son devenir (capacité 5). Avec leur programme spécifique embarqué, les motes sont capables d'interpréter les messages qui leur 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 répond alors en donnant sa configuration (Figure 18) composée de son type (TYP), son identifiant (ID), sa gamme (GAM, composée des opérations 01, 11, 88, 09), et son nom (NAM). Il est donc capable d'interpréter des données reçues en requêtes informatives. Il est également capable d'émettre des requêtes, comme sur la dernière ligne (en surbrillance) de la Figure 18, 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 un langage pour communiquer avec son environnement (capacité 4).

Id	Type	Data
2.232.0.0.0.71.121.4	clg	
2.232.0.0.0.71.121.4	typ	4
2.232.0.0.0.71.121.4	id	1 4 1 1 2 3 7
2.232.0.0.0.71.121.4	gam	1 11 88 9 0 0
2.232.0.0.0.71.121.4	nam	
2.232.0.0.0.77.220.181	ncf	
2.232.0.0.0.71.121.4	rqw	1

Figure 18. Réponse à un message (CF?) demandant sa configuration à un produit

A partir de la gamme qui lui a été affectée, et de l'application générique qu'il comporte (Figure 8 et Figure 11), le mote est capable, de manière autonome, de générer des séquences de contrôle pour assurer sa production. En effet, il interprète les différents comptes-rendus qu'il reçoit, et ordonnance les requêtes à destination des ressources de production qui vont permettre de le fabriquer (Figure 19), prenant ainsi une part active dans le contrôle de sa production (capacité 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 19. Échanges de messages entre un produit et les différentes ressources pour réaliser l'opération 60

Pour réaliser la prochaine opération dans sa gamme de fabrication (assemblage pièce 60), la première requête envoyée par le produit est RQW. Le poste de travail choisi pour réaliser cette opération est le poste 4. Une réponse (message RPW) contenant le champ « 4 » est donc adressée uniquement au produit demandant (message CAD). Le produit demande ensuite à être transporté au poste 4 par RQT. Le système de production lui répond quand la ressource de transport l'a déposé à destination (message RPT). La dernière requête RQ concerne la réalisation effective de l'opération 60 par le poste 4. Enfin, à la fin de l'opération et pour assurer la traçabilité, le numéro du poste, la date et l'heure, auxquels a été effectuée l'opération, sont renvoyés au produit (message RP) et stockés dans le mote.

Ainsi, un mote équipant un produit semble 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 et perspectives

Par rapport à un système de production plus classique, géré de manière hiérarchique et centralisée, un système contrôlé par le produit a pour but d'assurer la synchronisation continue des flux de biens et de services. Les avantages sont relatifs d'une part à la traçabilité individuelle des produits, et d'autre part à la flexibilité et à la robustesse 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, ...). En effet, 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.

Ce papier s'intéresse à des technologies infotroniques et utilise les possibilités des motes (nœuds de réseaux de capteurs sans fil), qui sont capables, à la différence des puces RFID, d'être à l'initiative d'une communication, et proposent une architecture de communication flexible permettant une interconnexion locale ou à distance. Un système flexible de production, partiellement émulé a permis de valider de manière opérationnelle ces possibilités, montrant ainsi qu'il serait possible d'implanter une intelligence technique de niveau 2 telle que définie par (McFarlane *et al.* 2003) dans un produit qui intégrerait une technologie similaire aux motes de réseaux de capteurs sans fil. Il montre la possibilité d'assurer la flexibilité et la traçabilité individuelle par le produit (et non plus par lots). Des développements complémentaires sont actuellement en cours, ils permettront d'utiliser non plus une émulation des ressources de production, mais les ressources réelles du SFP. De plus,

la capacité de détection des motes sera par la suite utilisée. Les produits pourront par exemple, grâce à leurs capteurs de température ou d'accélération, détecter que les conditions de production dans lesquelles ils se trouvent ne sont pas adaptées ou risquent de les endommager, et réagir en fonction de cela par l'émission de requêtes.

Si cette étude permet de valider les possibilités technologiques des motes en vue d'une implantation de contrôle par le produit, il reste encore 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). Pour cela, des travaux complémentaires, comme ceux de Pannequin (2007), portent sur le développement d'émulation à grande échelle, avec pour objectif de comparer les performances en termes de productivité des systèmes contrôlés par le produit avec des systèmes plus classiques. En plus de ces aspects relatifs à la performance, des études sont à mener en vue d'une implantation réelle à grande échelle pour mettre en évidence les problèmes relatifs à la communication des produits (interférences radio, problèmes de conflits, de gestion de l'accès au médium partagé, ...) et à leur géolocalisation.

6 Bibliographie

- Akyildiz I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, « Wireless sensor networks: a survey », *Computer networks*, 38, pp. 393-422, 2002.
- Arampatzis Th., J. Lygeros, S. Manesis, « 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, 2005.
- Babiceanu R. F., F. F. Chen , « Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey », *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, pp. 111-131, 2006.
- Blanc P., Pilotage par approche holonique d'un système de production de vitres de sécurité feuilletées, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2006.
- Brennan, R. « An Initial Automation Object Repository for OOONEIDA », *Lecture Notes In Computer Science*, vol. 3593, pp. 154-164, Springer, 2005.
- Brun-Picard D., H. Bouvet, H. Baboli, Z. Binder, « The product as an active element of distributed production control », *IFAC-IFIP-IMACS Conference on control of industrial systems, CIS'97*, Vol. 3, p. 359-365, Belfort, France, 1997.
- Cassandras C.G., S. Lafortune, *Introduction to discrete event systems*, Kluwer Academic, ISBN 0-7923-8609-4, 1999.
- Chirn J.-L., D. McFarlane, « Evaluating holonic control systems: a case study », *Proceedings of the 16th IFAC World Congress in Prague*, Elsevier, ISBN 008045108X, 2005.

- Christensen J. H., « Holonic Manufacturing Systems: Initial Architecture and Standards Directions », *Proc 1st Euro Wkshp on Holonic Manufacturing Systems*, HMS Consortium, Hannover, Germany, 1 December 1994.
- Da Silveira G., D. Borenstein, F.S. Fogliatto, « Mass customization: literature review and research directions », *Int. Journal of Production Economics*, 72, pp 1-13, 2001.
- Deen, S.M. (Editeur), *Agent-based manufacturing - Advances in the holonic approach*, Springer, ISBN 3-540-44069-0, 2003.
- Dobre D., Bajic E., « Active product modeling for chemical security management based on smart object concept », *7^e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'08*, Paris, du 31 mars au 2 avril 2008.
- Finkenzeller K., *RFID handbook: fundamentals and application in contactless smart cards and identification*, J. Wiley and Son, ISBN 0-470-84402-7, 2003.
- Galara, D., J. Hennebicq, « Process control engineering trends », *Annual Reviews in Control*, Elsevier, 23, 1-11, 1999.
- Gouyon, D., J.-F. Pétin, G. Morel, « A Product-Driven Reconfigurable Control for Shop Floor Systems », *Studies In Informatics And Control*, Informatics And Control Publications, 16(1), 2007.
- Hollocks B.W., H.T. Goranson, D.N. Shorter, F.B. Vernadat, « Assessing enterprise integration for competitive advantage », *ICEIMT'97, International Conference on Enterprise Modelling and Modelling Technology*, Berlin, 1997.
- International Organisation for Standardization *ISO 62264: enterprise-control system integration*, 2003.
- Karkkainen M., J. Holmstrom, K. Framling, K. Artto, « Intelligent products – a step towards a more effective project delivery chain », *Computers in Industry*, 50, pp. 141-151, 2003.
- Koestler A., *The ghost in the machine*, ISBN 0-14-019162-5, 1967.
- Leitão P., F. Restivo, « ADACOR: A Holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control », *Computers in Industry*, 57, pp. 121-130, 2006.
- Marik V., J. Lazansky, « Industrial application of agent technologies », *Control Engineering Practice*, 15(11), pp. 1364-1380, 2007.
- McFarlane D., S. Sarma, J.L. Chirn, C.Y. Wong, K. Ashton, « Auto id systems and intelligent manufacturing control », *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 16 (4), pp. 365-376, 2003
- Meyer, G. G., K. Främling, Holmström J., « Intelligent products: a survey », *Computers in Industry*, 2009.
- Morel G., H. Panetto, M. Zaremba, F. Mayer, « Manufacturing enterprise control and management system engineering: rationales and open issues », *IFAC Annual Reviews in Control*, 27 (2), 2003.
- Morel G., P. Valckenaers, J.M. Faure, C. Pereira, C. Diedrich, « Survey paper on manufacturing plant control challenges and issues », *Proceedings of the 16th IFAC world congress in Prague*, ISBN 008045108X, 2005.

- Nof S. Y., G. Morel, L. Monostori, A. Molina, F. Filip, « From plant and logistics control to multi-enterprise collaboration », *IFAC annual reviews in control*, 30 (1), pp. 55-68, 2006.
- Norrie D.H., R.W. Brennan (éditeurs) « Special Issue on Holons: Autonomous and Cooperative Agents for Industry », *Integrated Computer-Aided Engineering*, 9(3), 2002.
- Pannequin R., Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, 2007.
- Pétin J.-F., D. Gouyon, G. Morel, « Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell », *Control Engineering Practice*, 15, pp. 595-614, 2007.
- Ramadge P.J., W.M. Wonham, « Supervisory control of a class of discrete event processes », *SIAM J. Control and Optimization*, Vol. 25, n° 1, 1987.
- Ranky P., *Computer Integrated Manufacturing: an introduction with case studies*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, ASIN : 0131656554 1986.
- Valckenaers P. (Editeur), « Special issue: Holonic Manufacturing Systems », *Computers In Industry*, 46 (3), pp. 233-331, 2001.
- Valckenaers P., B. Saint Germain, P. Verstraete, J. Van Belle, Hadeli, H. Van Brussel, Intelligent products: Agere versus Esse, *Computers in Industry*, 2009.
- Van Brussel H., J. Wyns, P. valckenaers, L. Bongaerts, P. Peeters, « Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA », *Computers in Industry*, 37 (3), pp. 255-274, 1998.
- Zhang J., L. Gao, F.T.S. Chan, L. Peigen, « A holonic architecture of the concurrent integrated process planning system », *Journal of Materials Processing Technology*, 139, pp. 267-272, 2003.
- Zelm M., F. B. Vernadat, K. Kosanke, « The CIMOSA business modelling process », *Computer In Industry*, 27, pp. 123-142, 1995.