

PROPOSITION D'UN ENVIRONNEMENT D'ÉVALUATION POUR LA MISE EN ŒUVRE D'UN PILOTAGE PAR LE PRODUIT

Rémi PANNEQUIN, André THOMAS, Gérard MOREL

Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN)
CNRS UMR 7039, Nancy Université

Rémi.Pannequin@cran.uhp-nancy.fr, Andre.Thomas@cran.uhp-nancy.fr

RÉSUMÉ : Pour répondre aux exigences croissantes de gestion de la variété des produits, dans un environnement de plus en plus incertain, des approches de pilotage par le produit ont été formulées. Cependant, leur développement tant scientifique qu'industriel nécessite des outils d'évaluation permettant l'expérimentation, la validation et la réalisation de démonstrations à destination des industriels et ce, en tenant compte de la dimension et de la complexité de ces contextes industriels. Cet article présente un tel outil, permettant en particulier d'assister un scientifique ou un industriel dans les choix devant être faits lors d'un projet de mise en œuvre d'un pilotage par le produit. Après un état de l'art sur l'évaluation des performances des systèmes de pilotages « intelligents », nous présenterons les particularités de l'évaluation d'un tel pilotage. Ensuite, nous spécifierons une méthodologie d'évaluation accompagnant le projet de pilotage par le produit au cours de ses phases successives, puis nous présenterons un prototype à base de composants logiciels permettant de mettre en œuvre cette méthodologie. Enfin, quelques applications seront présentées.

MOTS-CLÉS : pilotage par le produit, émulation, simulation, évaluation, système multi-agents

1. INTRODUCTION

Les nouvelles exigences de personnalisation en masse des produits (mass-customisation) et de maîtrise d'un environnement devenu très changeant et incertain (raccourcissement du cycle de vie des produits, etc...) contraignent les entreprises à repenser leurs systèmes d'information, pour plus de flexibilité et d'adaptabilité.

Un large consensus au sein des communautés du contrôle holonique (Babiceanu et Chen, 2006) considère que cet objectif d'agilité peut être atteint par l'utilisation conjointe des technologies multi-agents et des technologies infotroniques. Ces dernières permettent de doter chaque entité de l'atelier (machines, produits, opérateurs...) d'une instrumentation permettant de l'intégrer pleinement au sein d'un système d'information. D'autre part, les technologies multi-agents posent les bases formelles du fonctionnement de ces systèmes distribués basés sur la collaboration, et fournissent aussi un outillage précieux pour leur mise en œuvre.

Le *contrôle par le produit* (Morel *et al.*, 2007) est une déclinaison de cette approche distribuée, visant à articuler les diverses activités de l'entreprise autour de produits *actifs* (McFarlane *et al.*, 2003), capables d'informer les acteurs qui gravitent autour de lui (figure 1). Du point de vue du pilotage de la production, le produit pourra en particulier servir à faire coexister des approches réactives et locales de la prise de décision (par exemple des initiatives prises par des équipes d'opérateurs responsabilisés), avec des approches plus prédictives et globales (supportées par exemple par des

proiciels de gestion intégrés ou des systèmes de planification avancés). Les apports espérés du pilotage par le produit sont la simplification du système d'information, centré sur un objet unique, ainsi que la possibilité d'hybrider les approches centralisées et distribuées de la prise de décision, pour arriver à des systèmes à la fois performants et flexibles (Thomas, 2004).

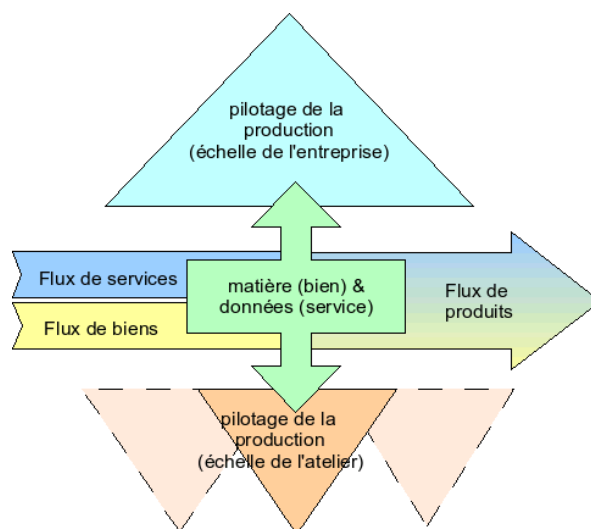


Figure 1 : Le produit actif comme le lien entre les diverses approches de pilotage (Morel *et al.*, 2007)

Cependant, de nombreuses questions restent ouvertes. Ainsi, comme l'ont écrit Marik et Lazanski (2007) au sujet des systèmes multi-agents « Il y a encore un long chemin à parcourir avant que ces architectures ne soient adoptées dans l'industrie ». Certaines difficultés sont d'ordre technique, car les équipements pouvant être embarqués dans les produits sont encore très limités ; cependant, les problèmes plus conceptuels ne sont pas à négliger. Ainsi, on peut s'interroger sur le choix de la nature des informations devant être embarquées dans les produits, ou encore sur le mode d'interaction des produits avec leur environnement.

Les réponses à ces questions résident sans doute dans la formulation de méthodes génériques de développement des systèmes contrôlés par le produit. Mais cet objectif ne saurait être atteint sans la possibilité d'évaluer la pertinence d'un système de pilotage par le produit en regard d'une situation d'application particulière. Nous avons donc besoin d'un outil :

- pour *expérimenter* afin de formuler et de valider de nouvelles architectures de contrôle par le produit,
- pour *démontrer* la pertinence des travaux de recherche, et faciliter leur transfert vers l'industrie.
- pour *valider* les choix lors de la mise en place industrielle d'un pilotage par le produit,

Cet article propose une réponse à ces besoins, sous la forme d'un environnement d'évaluation adapté au pilotage par le produit.

Nous présenterons tout d'abord l'état de l'art sur l'évaluation des systèmes de pilotage distribués de la production, en présentant les particularités du pilotage par le produit. Dans un second temps, nous distinguerons les différentes approches de l'évaluation de pilotage par le produit, et nous proposerons une méthode permettant de les intégrer à chaque phase d'un projet de mise en œuvre industrielle de pilotage par le produit. Ensuite, nous définirons les composants logiciels qui constituent l'environnement d'évaluation. Enfin, nous présenterons leur application à des cas d'étude.

2. ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE PILOTAGE INTELLIGENTS

2.1. Approches d'évaluation par simulation

La proposition de nouvelles architectures de simulation est parallèle à la formulation d'approches novatrices du pilotage de la production, telles que les systèmes holoniques, ou plus généralement les systèmes « intelligents » de production (IMS). En effet, l'évaluation des performances d'un système de contrôle novateur est un point crucial pour son adoption industrielle (Parunak, 1993).

On peut distinguer de manière globale trois approches pour l'évaluation des performances d'un système de pilotage :

- le déploiement à l'atelier réel, à un pilote, ou à une plateforme de laboratoire,
- l'étude analytique des performances, par exemple en utilisant la théorie des files d'attente,
- la simulation du système.

L'évaluation par simulation offre de nets avantages par rapport aux deux autres méthodes. En effet l'utilisation de l'atelier réel est très coûteuse et contraignante, puisqu'elle influe sur la production. Cette difficulté peut être contournée en employant une plate-forme d'essais en laboratoire. Cependant, ces plate-formes, qui restent coûteuses et longues à mettre en place, sont nécessairement beaucoup plus simples que les cas d'étude industriels, alors que c'est justement la maîtrise de la complexité qui est le cœur du problème. De la même manière, une étude analytique est contrainte par les limitations de la théorie, et un cas réaliste est souvent trop complexe pour pouvoir être résolu. Par ailleurs, les formalismes permettant d'estimer le comportement d'un système distribué sont rares.

La simulation apparaît donc comme la seule démarche permettant l'évaluation d'un pilotage distribué dans un tel contexte (Marik et Lazansky, 2007).

2.2. Vers des environnements de benchmarking

Le point de départ des travaux d'évaluation par simulation consiste à comparer deux types de pilotage pouvant être antagonistes, typiquement le système proposé et le système existant, sur un cas d'étude simulé. Ainsi une coordination décentralisée, s'inspirant des mécanismes de marché, a été comparée à une autre hiérarchique (basée sur un agent superviseur) (Cavalieri *et al.*, 2000), en utilisant le modèle de simulation d'un cas simple. Par ailleurs, des méthodes de pilotage prédictives et réactives ont aussi été comparées, à l'aide d'un dispositif expérimental modulaire (Brennan *et al.*, 2000).

Mais ces premiers travaux se basaient sur des cas d'études particuliers, les modèles d'essais étaient difficilement réutilisables. De plus, les cas d'applications modélisés étaient souvent assez simplistes.

Des travaux ont donc été entrepris pour augmenter la généralité des modèles, afin de fournir à l'ensemble de la communauté de recherche une base d'évaluation homogène. C'est sur ces objectifs qu'a été fondé le quatrième groupe d'intérêt spécifique du réseau d'excellence IMS (IMS-NoE SIG4). Il s'est consacré à la définition et au développement d'un service de benchmarking (Cavalieri *et al.*, 2003) (Valckenaers *et al.*, 2006) ayant pour but de fournir un environnement de modélisation ainsi qu'une bibliothèque de cas de tests accessible mondialement.

Malgré le succès mitigé du groupe, un tel service est hébergé, et continue d'être développé, par l'université

catholique de Louvain¹. De plus, la problématique de la simulation des systèmes complexes a été abordée (Monch, 2006), ce qui a conduit à proposer une architecture logicielle assez similaire à celle évoquée par les membres du SIG4. Les travaux de notre équipe sont inscrits dans ce contexte et ont permis d'apporter quelques éléments répondant à cette problématique (Pannequin et Thomas, 2004), (Klein et Thomas, 2006), (El Haouzi *et al.*, 2005).

2.3. Architecture des environnements d'évaluation

On constate donc une convergence des architectures de ces dispositifs vers une forme commune, consistant à séparer le ou les systèmes de pilotage à tester, du cas industriel servant de base aux différents tests.

Cette architecture introduit la notion d'*émulation*. Celle-ci consiste à remplacer un composant concret d'un système par un modèle informatique capable de reproduire de manière transparente son comportement. L'émulation est utilisée de longue date en génie automatique, pour tester les programmes des automates avant leur mise en production. Pour l'évaluation des systèmes de pilotage, l'émulation consiste à utiliser un *atelier virtuel* pour lui appliquer le système de pilotage.

L'émulation implique trois entités. Il s'agit du système de contrôle *SC*, du système opérant *SO* devant être contrôlé, et d'un objectif de performance *P*. L'évaluation consiste alors à mettre en relation *SC* et *SO*, pour vérifier que l'objectif de performance *P* est atteint.

Le système de contrôle et le système opérant peuvent apparaître soit sous leur forme réelle SO_r et SC_r , soit comme modèles (on les désigne alors comme SO_m et SC_m). Il existe donc quatre modes d'expérimentation, qui résultent des diverses combinaisons (Pfeiffer *et al.*, 2003) :

- (SO_r, SC_r) L'expérimentation consiste à déployer le système de pilotage au système opérant réel ; c'est le cas le plus classique
- (SO_r, SC_m) Un modèle du système de pilotage est appliqué au système réel. Cette configuration peut être employée pour le prototypage du système de pilotage, par exemple en pilotant manuellement l'atelier pour faire apparaître les règles de bon comportement
- (SO_m, SC_r) Le système de pilotage réel est appliqué à l'atelier virtuel
- (SO_m, SC_m) Le système de pilotage et le système opérant sont tout deux présents sous forme de modèle.

2.4. Particularités du pilotage par le produit

L'expérimentation sur des modèles peut cependant être mise en doute ; en effet, la modélisation peut introduire un certain biais, puisqu'elle fait abstraction de nombreux aspects de la réalité.

Le problème de la validation des modèles a été posé de nombreuses fois dans le domaine de la simulation, mais il apparaît un peu différemment dans le cadre de l'émulation. En effet, il ne s'agit pas seulement que ce qui est représenté dans le modèle corresponde à la réalité, mais en plus que le modèle comporte effectivement tous les aspects de la réalité ayant une importance par rapport au pilotage.

Ainsi, la séparation des flux de différentes natures est primordiale pour pouvoir expérimenter des cas relatifs au concept de pilotage par le produit. En effet, la séparation a priori entre le produit, vu comme matière dans l'atelier, et le produit acteur dans le système de décision, permet de faire la distinction entre le pilotage par le produit et les approches classiques.

Enfin, le pilotage par le produit nécessite aussi de tenir compte de toutes les possibilités d'évolution des produits dans le modèle d'émulation. Cela inclut aussi bien le routage du produit que la flexibilité de son élaboration (gamme alternatives). La granularité avec laquelle le système opérant est modélisé doit, elle aussi, être adaptée au pilotage par le produit.

3. MÉTHODE INCRÉMENTALE D'ÉVALUATION

L'environnement d'évaluation que nous proposons permet d'assister le praticien à chaque phase d'un projet de mise en place d'un pilotage par le produit. Nous distinguons, selon un découpage assez classique, trois phases successives dans un tel projet : définition, développement, déploiement.

Cette décomposition permet de réduire la complexité de chaque étape : le système de pilotage est d'abord défini abstraitement, en faisant abstraction des aspects techniques, mais ceux-ci sont progressivement pris en compte, permettant de réduire la complexité de chaque étape pour mieux la maîtriser.

3.1. Définition : évaluation des algorithmes

D'abord, le projet passe par une phase de *définition*. Il s'agit de définir les informations devant être associées aux produits, ainsi que la manière dont ces informations sont initialisées et exploitées par les divers acteurs du pilotage.

Dans cette phase du projet, on manipule donc des règles de décisions locales ou globales, qui constituent le pilotage par le produit. Il s'agit par exemple d'un algorithme permettant de décider d'un changement de série sur une ligne, ou de décider de diriger un produit vers l'une ou l'autre des ressources pouvant l'admettre. Les problématiques spécifiquement abordées sont donc de nature *algorithmique*.

La pertinence des divers algorithmes de décision pouvant être mis en place dépend de leur impact sur la productivité du système. Des indicateurs tels que le délai global, le taux de service client, l'occupation des

¹ <http://www.mech.kuleuven.be/benchmarking/>

ressources ou les niveaux d'en-cours peuvent être utilisés.

Le dispositif d'expérimentation doit permettre à ce stade une formulation rapide et facile des algorithmes de décision. De plus, pour pouvoir réaliser de nombreuses expériences, et pouvoir prendre en considération de longues périodes, l'émulation doit être plus rapide que la réalité. Pour ces deux raisons, le mode expérimental (SO_m , SC_m) est le plus adapté. En effet, le fait d'utiliser deux modèles facilement intégrables dans un même environnement de simulation, permet de réaliser facilement des simulations à événements discrets, qui permettent la simulation de longues durées (figure 2).

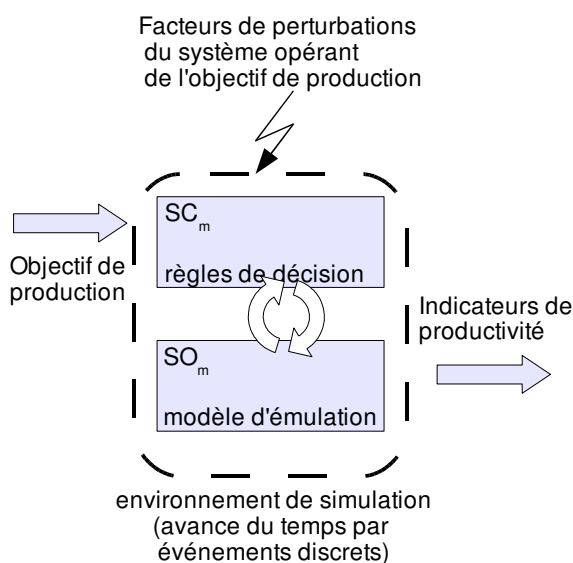


Figure 2: configuration du dispositif expérimental au cours de la phase de définition

De plus, la formulation du système de pilotage comme un modèle permet de s'abstraire de nombreux problèmes de développement, ce qui facilite le choix du meilleur mode de pilotage, et ce, grâce à l'intégration du modèle d'émulation et des règles de décision au sein d'un même environnement.

3.2. Développement : évaluation des logiciels

La phase précédente a permis d'obtenir un ensemble d'algorithmes de décision validés. Sur la base de ces algorithmes, il faut maintenant développer le logiciel de pilotage.

La phase de développement se focalise sur les problématiques de stockage et de transfert de l'information, dont on avait fait abstraction dans la phase précédente. Elle permet aussi de tenir compte des délais nécessaires à la prise de décision. Ces aspects peuvent en effet conduire à une désynchronisation entre l'état réel de l'atelier et la vision qu'en a le système de pilotage. Il est donc particulièrement intéressant d'évaluer la pertinence du pilotage par le produit par rapport à ce risque de de-

synchronisation. L'expérimentation porte donc sur des problématiques *logicielles*.

En effet, pour un ensemble donné de règles comportementales, il existe très souvent plusieurs manières de développer le logiciel de pilotage par le produit. Ainsi, il est possible d'utiliser des approches orientés-agents, en utilisant divers protocoles pour réaliser le transfert de la bonne information au bon acteur. De même, il est possible de projeter les comportements distribués vers une architecture plus centralisée reposant sur une base de données centrale. Il faut donc évaluer la pertinence des choix d'implémentation. Deux qualités principales sont requises : d'une part, la facilité de développement et de maintenance du code (capacité à s'adapter aux changements à long terme) et, d'autre part, la performance du logiciel, en terme de charge des ressources informatiques, ainsi qu'en terme de robustesse face aux divers types de perturbations.

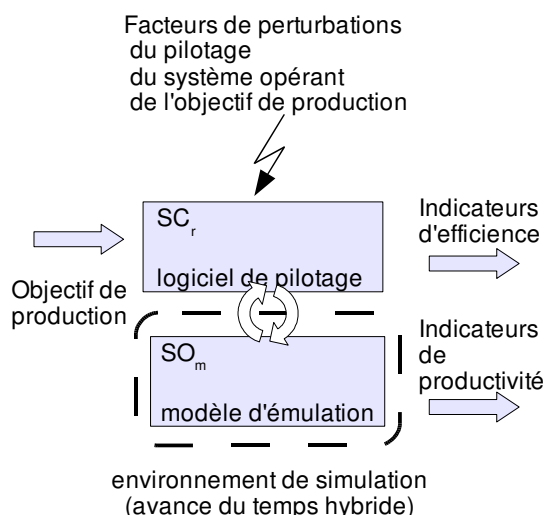


Figure 3: configuration du dispositif expérimental au cours de la phase de développement

La facilité d'écriture et de maintenance du code est, par sa nature subjective, et donc très difficile à évaluer objectivement ; on se focalise alors sur des indicateurs mesurant l'efficacité du logiciel de pilotage. Ce type d'indicateurs est beaucoup moins usuel que les indicateurs de productivité. Cependant, une mesure de base pourrait être la quantité de données devant être transmises entre chaque acteur, la taille des bases de données (au sens large) utilisées, ou encore les délais de prise de décision.

Pour pouvoir expérimenter sur ce type de problématiques, le logiciel réel doit être utilisé. On se trouve donc dans la situation (SO_m , SC_r), dans laquelle le système de pilotage réel est connecté à l'atelier émulé. De plus, pour une prise en compte des délais de prise de décision, l'émulation doit se dérouler en « temps réel », c'est à dire être synchronisée sur l'horloge de l'ordinateur exécutant l'émulation. Cependant, il est possible d'accélérer le déroulement des expériences, en utilisant

un mode hybride d'avancement du temps (Germain *et al.*, 2003). Celui-ci repose sur une alternance entre une gestion du temps par événements discrets, lorsque le pilotage est en attente, et une gestion en temps réel, lorsqu'une décision est en cours.

3.3. Déploiement : évaluation des technologies

Enfin, la dernière phase du projet est relative au déploiement effectif du pilotage par le produit dans un atelier. En effet, les précédentes étapes avaient fait l'hypothèse d'un produit *actif* dont les états informatique et physique pouvaient être synchronisés. Il faut donc effectivement choisir une instrumentation du produit pour réaliser cette synchronisation.

Il nous faut, à cette étape, tenir compte des caractéristiques réelles des équipements instrumentant le produit, du point de vue de leur fiabilité, de leur rapidité, de l'étendue de leur champ de perception, ainsi que de l'impact des conditions particulières de l'atelier (perturbations électromagnétiques, agressions thermiques, mécaniques ou chimiques, poussières...) sur ces paramètres de fonctionnement.

L'émulation ne semble pas la méthode adaptée pour représenter ces contraintes. En effet il est difficile d'obtenir des données de fiabilité tenant compte de l'ensemble de ces facteurs. De plus, le modèle d'émulation ne comporte que les limitations connues des équipements, mais seule l'utilisation de l'équipement réel permet de faire apparaître les limitations qui n'étaient pas a priori connues.

L'expérimentation en phase de déploiement doit être réalisée sur le système opérant réel. Il s'agit par exemple d'un atelier pilote ou encore une plate-forme d'essais de laboratoire. Celle ci doit représenter des problématiques de pilotage suffisamment similaires à ce qu'on observe sur le terrain.

L'expérimentation sur une telle plateforme d'essais permet de confronter le logiciel de pilotage par le produit à des perturbations réelles, afin d'évaluer son adaptabilité et sa robustesse.

3.4. Synthèse

La figure 4 et le tableau 1 présentent de manière synthétique la méthode que nous proposons. Celle-ci repose sur un raffinement progressif des contraintes, et permet d'intégrer l'évaluation à chaque étape du projet, tout en distinguant les problématiques relatives à la définition des algorithmes de pilotage, de leur implémentation sous forme logicielle, et sous forme technique.

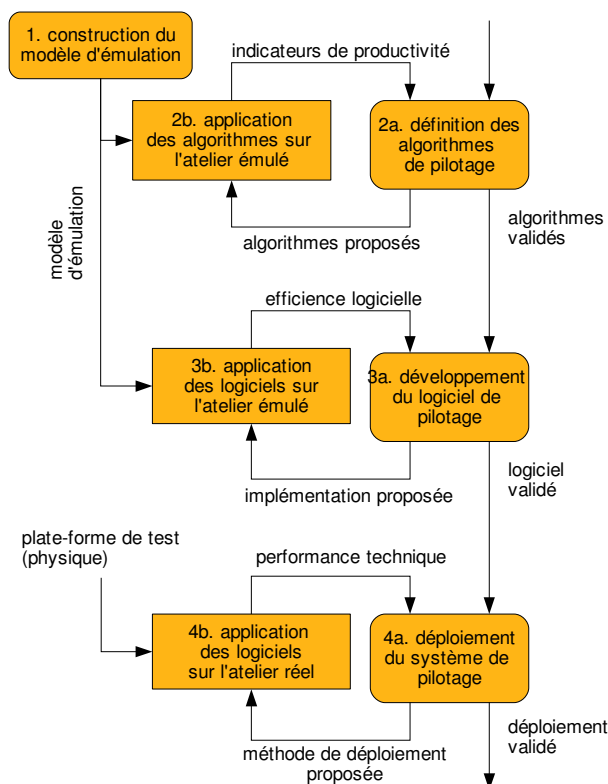


Figure 4: les étapes de la méthodologie d'évaluation

Phase	mode d'expérimentation		avance du temps	éléments étudiés
Définition	modèle d'émulation de l'atelier	modèle du système de pilotage	par événements discrets	informations associées aux produits algorithmes de décision positionnement des points de synchronisation
Développement		logiciel de pilotage réel	hybride: événements discrets / temps réel	architecture logicielle mode de collaboration entre pairs mode de stockage des informations
Déploiement	atelier réel ou plate-forme d'essais		temps réel	instrumentation des produits

Tableau 1 : Caractéristiques de chaque phase de la méthodologie d'évaluation.

4. SPÉCIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT

4.1. Architecture globale de l'environnement

L'environnement d'évaluation est constitué de deux éléments principaux :

- le premier sert à créer les modèles d'émulation, et à les exécuter suivant les différents modes d'interaction,
- le second permet de construire facilement un système de pilotage par le produit selon diverses configurations.

Le premier, l'outil de création et d'exécution des modèles d'émulation, est basé sur une architecture à base de composants. En effet, la modélisation repose sur l'utilisation de *modules d'émulation*, dont l'assemblage constitue le modèle. Ces modules sont dotés d'une interface, qui leur permet d'interagir avec le système de pilotage (par l'émission de comptes-rendus et la réception d'ordres). La modularité de l'interface permet la connexion avec un système de pilotage intégré à l'émulateur, programmé sous la forme d'un ensemble de fonctions, ou avec un système de pilotage réel, à distance à travers le réseau (figure 5).

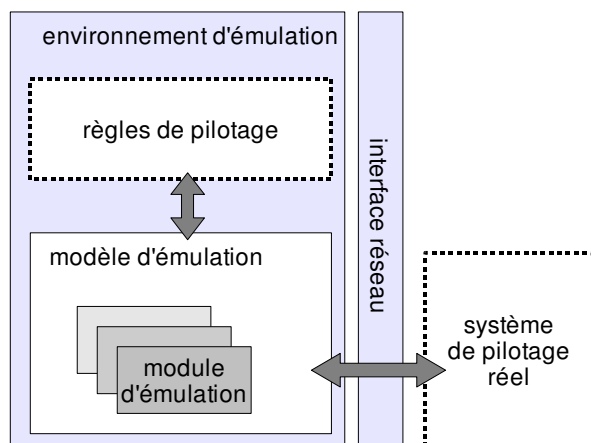


Figure 5: architecture de l'environnement d'émulation, mode de contrôle local ou distant

Le second est l'infrastructure multi-agents de pilotage par le produit. Il s'agit d'un ensemble d'agents, que l'on peut facilement configurer pour adopter diverses configurations de prise de décision.

Ces deux éléments, dont l'implémentation constitue un prototype de l'environnement d'évaluation spécifié, sont présentés dans les parties suivantes.

4.2. Composants orientés-objets pour l'émulation

La création du modèle d'émulation est basée sur une vision systémique et processive de l'atelier. En effet, nous nous focalisons sur les produits, et nous cherchons à en représenter l'évolution physique. D'après la systémique, ces évolutions peuvent être vues comme des

transformations de forme, d'espace et de temps (Le Moigne, 1984).

Ainsi, la première étape de modélisation est l'analyse de l'atelier, nous permettant de déterminer l'ensemble des états possibles des produits et de les caractériser en terme de position (espace) et de morphologie (forme). Les produits émulés seront caractérisés par ces deux attributs. Nous introduisons donc deux modules d'émulation : le premier a pour fonction d'introduire les produits dans le modèle d'émulation, tandis que le second représente les périodes d'attente des produits.

Ensuite, nous représentons les actions sur les produits. Il s'agit de modéliser les équipements de l'atelier en fonction des transformations d'espace et de forme qu'ils peuvent effectuer sur les produits. Pour assurer l'indépendance du modèle d'émulation par rapport au système de pilotage, toute transformation physiquement possible doit être représentée. Pour représenter l'action sur les produits, deux primitives de modélisation sont introduites, les actionneurs de forme et d'espace. Ces primitives tiennent compte des contraintes physiques qui régissent l'action, par exemple des contraintes de capacité, de vitesse maximale, de temps de réglage, etc...

Enfin, il nous faut représenter les fonctions d'observation des produits, en tenant compte des caractéristiques d'identification (détection d'une présence, d'un type de produit, d'une instance précise d'un produit), et de la nature de l'observation (observation d'espace, ou perception de la morphologie du produit) et des contraintes physiques d'observation (par exemple un champ de perception limité, ou un délai de traitement). L'observation des produits est réalisée grâce à une primitive d'événement produit.

Un prototype basé sur ces spécifications a été développé comme une extension au logiciel de simulation à événements discrets Arena, en utilisant la capacité de ce logiciel à développer des bibliothèques d'objets spécifiques. Les fonctions de communication avec les modules ont, quant à elles, été réalisées sous la forme d'une bibliothèque de fonctions (dll).

L'utilisation de cette approche systémique nous permet de spécifier un ensemble de module d'émulation à la fois génériques et bien adaptés au pilotage par le produit.

4.3. Composant multi-agents pour la représentation du système de pilotage

Les technologies multi-agents sont particulièrement adaptées à l'étude du pilotage par le produit, dans la mesure où elles permettent de tenir compte du fort parallélisme de l'exécution de ces systèmes ; elles forcent aussi à une formulation explicite des transferts d'information entre agents, et permettent d'ailleurs l'analyse de ces échanges.

Cependant, malgré l'existence de kit de développement comme par exemple la bibliothèque JADE, la mise au point d'un système multi-agents reste difficile et requiert

une forte spécialisation. Pour rendre plus accessible le développement d'un système multi-agents de pilotage par le produit, nous avons développé un ensemble d'agents pouvant être facilement configurés.

Le fonctionnement du système repose sur l'association d'un *agent physique* à chaque élément du système opérant. Les agents physiques sont dotés de divers sous-systèmes, permettant en particulier l'interaction avec le système opérant (traitement des perceptions, et commande des actionneurs) ainsi que la communication avec les autres agents. Ces sous-systèmes sont structurés autour d'une base d'attributs qui représente l'état de l'entité physique auquel l'agent est associé, ainsi que les paramètres internes de l'agent. Enfin, chaque agent peut être doté d'une règle comportementale qui déclenche des actions en fonction de la valeur d'attributs (figure 6).

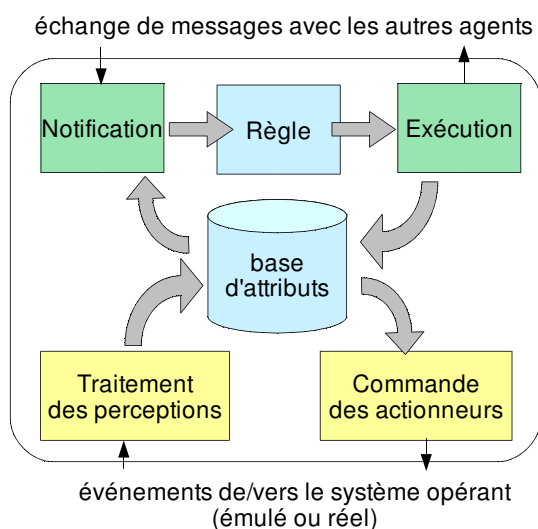


Figure 6 : structure d'un agent physique

Le mode de communication entre les agents est basé sur les systèmes à base de règles par notification (Simao, 2005). Ainsi, lors de leur initialisation, les agents physiques déclarent les attributs qu'ils possèdent à leurs pairs. Les agents voulant être informés de la valeur de certains attributs, « s'abonnent », et sont ensuite notifiés lors des changements de valeurs. À la réception d'un message le notifiant de la nouvelle valeur prise par un attribut (par exemple, l'attribut « état » de la ressource M1 devient « disponible »), la règle embarquée dans l'agent est évaluée, et peut produire une action. Les différents types d'actions possibles sont :

- le déclenchement d'une opération par un pair,
- l'interrogation sur la valeur d'un attribut
- le changement de la valeur d'un attribut d'un pair.

La configuration des agents physiques est réalisée à travers le paramétrage de la base d'attribut (sous forme d'un fichier XML), et de la règle (sous la forme d'une classe java). Le paramétrage du système de pilotage est donc très nettement simplifié.

5. APPLICATIONS

5. Application à un cas d'étude industriel

L'environnement d'évaluation a tout d'abord été appliqué à un cas d'étude industriel. L'entreprise considérée est une filiale de l'industrie automobile, caractérisée par de forts volumes de production, et une forte variété des produits. De précédentes études de ce cas avaient permis de mettre en avant la dualité entre pilotage centralisé et pilotage distribué (Pannequin et Thomas, 2004).

L'atelier est découpé en une dizaine de cellules de fabrication, dédiées à un client particulier. Dans chaque cellule, la production est réalisée en deux étapes (figure 7) : d'abord, des produits semi-finis sont assemblés sur une ligne de production ; ensuite, l'assemblage final a lieu sur trois lignes parallèles. La réalisation des produits semi-finis étant environ trois fois plus rapide que l'assemblage final, la cellule est globalement équilibrée. Cependant, le problème de pilotage consiste à décider des changements de série, de manière à respecter les délais de livraison aux clients, tout en minimisant les en-cours de produits semi-finis et en évitant la famine sur les lignes en aval.

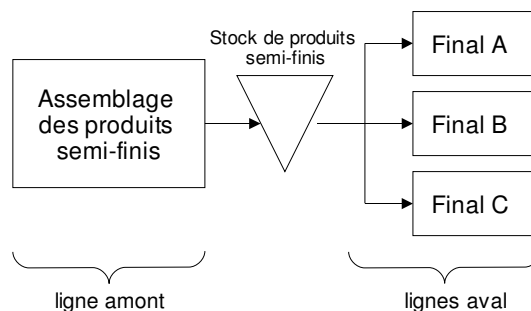


Figure 7 : Schéma des flux dans la cellule de production étudiée

Nous souhaitons étudier la pertinence d'algorithmes de pilotage par le produit par rapport à un pilotage centralisé classique, ce qui correspond aux problématiques de la phase de définition.

Après avoir réalisé le modèle d'émulation de la cellule de production, diverses règles de pilotage ont été définies : il s'agissait d'une part d'un pilotage centralisé, nous servant de base de comparaison, et d'autre part de deux types de pilotage par le produit. Le premier (désigné comme PP-contraint) soumet entièrement les décisions locales à la valeur des attributs des produits, ces derniers étant initialisés par un ordonnancement centralisé. Le second (PP-autonome) prend en compte, en plus des attributs des produits, les paramètres de fonctionnement locaux, comme les niveaux d'en-cours.

L'environnement d'évaluation nous a dans un premier temps permis de valider les algorithmes de décision utilisés. Il s'agit de vérifier le bon fonctionnement des

règles comportementales définies. L'environnement d'évaluation a ainsi permis pendant le développement de détecter et d'éliminer les bogues, par exemple ceux qui conduisent à un blocage du système de pilotage. Par ailleurs, il nous a permis de prouver l'absence d'erreurs majeures dans les algorithmes définis, en montrant un niveau de performance comparable entre les différentes configurations du système de pilotage, sur un cas non-perturbé.

Ensuite, l'environnement d'évaluation nous a permis de comparer la performance des trois modes de pilotage en fonction des perturbations grâce à un plan d'expériences (figure 8). Plus de détails sur le protocole expérimental et l'interprétation des résultats pourront être trouvés dans (Pannequin *et al.*, 2007), toutefois, le fait même de pouvoir obtenir des résultats quantitatifs montre bien l'utilité du dispositif expérimental.

5.2. Application à la plateforme d'essais Tracilog

La section précédente a montré l'utilité de l'environnement d'évaluation dans la phase de définition du pilotage par le produit. Malheureusement, nos partenariats industriels ne sont pas assez avancés pour nous permettre d'appliquer notre méthodologie d'évaluation dans les phases suivantes.

Cependant, des essais ont pu être réalisés sur une plateforme de laboratoire. Ceux-ci nous ont permis de valider les composants multi-agents proposés, par une application concrète. Ces essais correspondent donc aux phases de développement et de déploiement.

La plateforme utilisée est un système automatisé classique, mais dotée d'une instrumentation RFID (identification par radio-fréquences). Elle comporte deux postes d'assemblage, deux aiguillages, reliés entre eux par un système de convoyage.

Un modèle d'émulation de la plateforme a été créé, et a servi pour une première mise en oeuvre du système multi-agents. Comme dans le cas précédent, la possibilité de tester le bon fonctionnement du système de pilotage au cours de son développement est appréciable. Ainsi, nous avons pu paramétrer les agents en utilisant des règles simples, puis en complexifiant le système progressivement.

Après cette phase de développement, le système de pilotage a été déployé au système automatisé réel. Ceci a été réalisé, du côté agent, en utilisant un composant spécifique chargé de gérer la communication avec le middleware de la plateforme, et, du côté middleware, en ajoutant une interface exposant les principales fonctionnalités des automatismes (contrôle des équipements et identification des produits).

De cette manière, il devient possible de substituer très facilement le système automatisé par son modèle d'émulation. Lors des expériences de déploiement, nous avons pu constater l'influence de paramètres techniques, comme la fiabilité des lecteurs RFID, ou les délais de transmission des événements. Cependant, une étude expérimentale complète n'a pas encore pu être menée.

Cette application démontre la capacité de l'architecture d'émulation à se substituer de manière transparente au système automatisé réel, et sa pertinence dans les phases de développement du système de pilotage. Nous avons pu aussi constater le bon fonctionnement du système multi-agents proposé, de par sa capacité à contrôler un système réel.

6. CONCLUSION

Cet article a proposé un environnement d'évaluation adapté à l'expérimentation sur le pilotage par le produit. Cet environnement a été appliqué à différents modes de fonctionnement, et nous a donc permis de montrer la

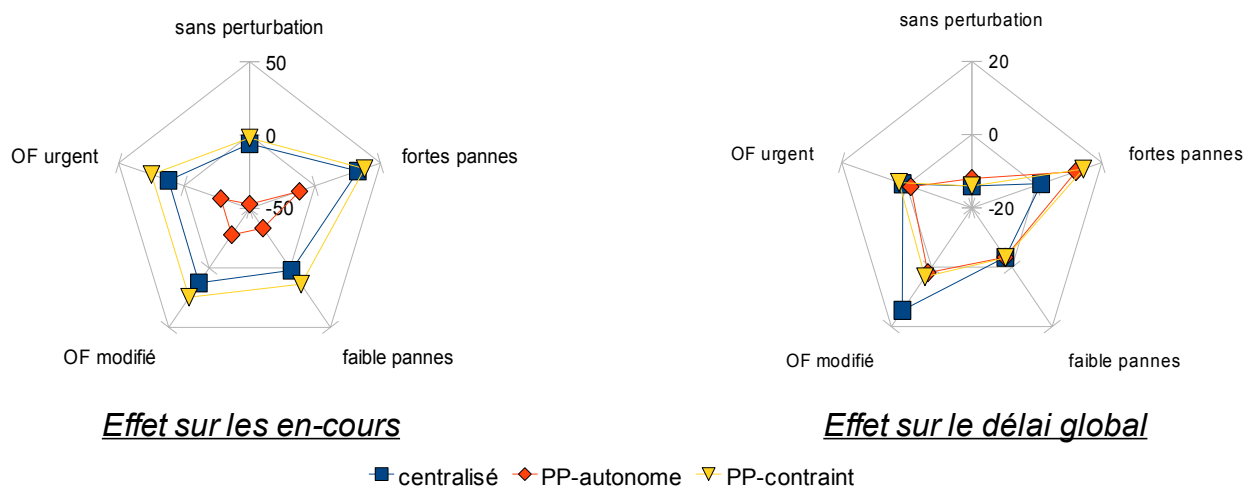


Figure 8: Effet des facteurs de perturbation sur le niveau d'en-cours et sur le délai global

manière dont ceux-ci peuvent être exploités au cours des différentes étapes d'un projet de mise en œuvre d'un pilotage par le produit.

Ainsi, partant de la création d'un modèle d'émulation de l'atelier, il est possible d'évaluer d'abord les règles comportementales des acteurs d'un pilotage par le produit, et ensuite la manière de mettre en œuvre ces comportements. Enfin, il s'agira de substituer au modèle d'émulation de l'atelier, l'atelier réel.

La méthodologie d'évaluation permet donc de distinguer les aspects algorithmiques, logiciels et techniques d'un projet de mise en place d'un pilotage par le produit. L'environnement proposé facilite de plus les allers et retours entre ces trois phases.

Le prototype développé est ainsi une aide précieuse pour que les réponses aux questionnements sur le pilotage par le produit puissent être soutenues par des mesures expérimentales objectives.

En perspective de nos travaux, nous envisageons de continuer le développement du prototype de l'environnement d'évaluation, afin d'améliorer sa facilité de prise en main, et sa fiabilité. Nous prévoyons aussi de continuer son application à notre plateforme d'essais et à des cas industriels.

REFERENCES

- Babiceanu, R. and F. Chen, 2006: Development and applications of holonic manufacturing systems: A survey. *Journal of Intelligent Manufacturing* 17/1: 111–131
- Brennan, R.W., 2000: Performance comparison and analysis of reactive and planning-based control architectures for manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 16/2-3: 191–200
- Cavalieri, S., Garetti, M., Macchi, M., Taisch, M. (2000): An experimental benchmarking of two multi-agent architectures for production scheduling and control. *Computers in Industry* 43/2: 139–152
- Cavalieri, S., Macchi, M., Valckenaers, P., 2003: Benchmarking the performance of manufacturing control system: design principles for a web based simulated testbed. *Journal of Intelligent Manufacturing* 14: 43–58
- EiHaouzi H. and A. Thomas, 2005: A Methodological Approach to Build Simulation Models of Manufacturing Systems with Distributed Control, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Marrakech, Morocco.
- Germain, B.; Valckenaers, P.; Zamfirescu, C.; Bochmann, O. & Vanbrussel, H. 2003: Benchmarking of Manufacturing Control Systems in Simulation Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Performance Measurement (IfIP WG5.7), Bergamo, pp 357-369
- Klein T. and A. Thomas, 2006: Développement d'un modèle de simulation pour l'évaluation des systèmes de pilotage distribués. *6^{ème} conférence francophone de modélisation et simulation*, Maroc, 3-5 avril 06
- Le Moigne J.-L., (1984) *La théorie du système général*, Presses Universitaires de France.
- Marik, V. and J. Lazansky, 2007: Industrial application of agent technologies. *Control Engineering Practice*. In Press
- Mcfarlane, D., Sarma, S., Chirn, J.L., Wong, C.Y., Ash-ton, K. 2003: Auto id systems and intelligent manufacturing control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16/4: 365–376
- Monch, L., 2006: Simulation-based benchmarking of production control schemes for complex manufacturing systems. *Control Engineering Practice*. In Press
- Morel, G., Valckenaers, P., Faure, J.M., Pereira, C., Die-drich, C., 2007: Survey paper on manufacturing plant control challenges and issues. *Control Engineering Practice*. In Press
- Pannequin, R. and A. Thomas, 2004: Centralized versus distributed decision, an industrial case. In *11th IFAC Symposium on Information and Control Problem in Manufacturing INCOM'2004*
- Pannequin R., Morel G., Thomas A, 2007: Benchmarking issues for product-driven decision-making in *9th International Conference on the Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprise, MITIP'2007*, Florence, Italy.
- Parunak. H. 1993: MASCOT: A Virtual Factory for Research and Development in Manufacturing Scheduling and Control. In T. Grunwick, editor, *Proceedings of the 3rd Workshop on Intelligent Scheduling in Manufacturing*, Toronto University, Canada, January .
- Pfeiffer, A., Kadar, B., Monostori, L. 2003. Evaluating and improving production control systems by using emulation. In *Applied Simulation and Modelling*.
- Simao, J. 2005: *Contribution au Développement d'un Outil de Simulation de Systèmes Holoniques de Production et Proposition d'un Meta-Modèle de Contrôle Holonique*. Thèse de l'université Henri Poincaré & Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR) – Brasil.
- Thomas A., 2004: De la planification au pilotage pour les chaînes logistiques. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré – Nancy 1.
- Valckenaers, P., Cavalieri, S., Saint Germain, B., Verstraede P., Hadeli, Bandinelli, R., Terzi, S., Van Brussel, H. 2006: A benchmarking service for the manufacturing control research community. *Journal of Intelligent Manufacturing* 17: 667-679