

# Impact de l'ordonnancement temps réel des tâches d'un superviseur de ligne d'assemblage

Loïc PLASSART, Frank SINGHOFF, Philippe LE PARC, Lionel MARCÉ  
EA 3883 – LISyC – Université de Bretagne Occidentale  
20 avenue Le Gorgeu  
29285 Brest Cedex  
{loic.plassart, frank.singhoff, philippe.le-parc, lionel.marce}@univ-brest.fr

## Résumé

*Cet article présente une étude sur l'influence de la mise en œuvre d'un superviseur pour la coordination de stations d'une ligne d'assemblage automatisée.*

*L'impact sur les cadences de production étant démontré, nous proposons un prototype de superviseur basé sur un noyau temps réel permettant d'accroître la productivité des équipements pilotés.*

## 1. Introduction

Au cours des dernières décennies, l'amélioration des performances des systèmes de production s'est principalement appuyée sur un perfectionnement des équipements agissant directement sur l'écoulement des flux de matières. Elle a alors uniquement été obtenue par l'utilisation des techniques issues des domaines de l'automatique et de la productique. Il a en effet souvent été admis que le rendement global des systèmes de production n'était limité que par leurs caractéristiques mécaniques et technologiques et que leur capacité de production n'était en aucun cas significativement pénalisée par la fonction de pilotage.

Cependant, le comportement d'un équipement de production est aussi conditionné par les caractéristiques du système qui en assure le contrôle [GRI-01]. La performance attendue des systèmes de production, pour satisfaire pleinement les impératifs économiques, ne peut être atteinte sans prise en compte conjointe de leurs limites mécaniques intrinsèques et de celles des équipements de contrôle et de commande.

L'étude de cas présentée ici est menée pour le compte d'un équipementier automobile, la société Livbag du groupe suédois Autoliv<sup>1</sup>. Elle s'applique à des lignes d'assemblage de générateurs de gaz pour airbags dont le pilotage est assuré conjointement par une batterie d'automates programmables industriels (API) et un

équipement central de contrôle et de surveillance (superviseur). La fonction majeure du superviseur consiste à répondre aux sollicitations des API. Ces derniers sont situés au niveau des machines de production constituant la ligne d'assemblage. Ils sont directement chargés des activités de commande en liaison avec les équipements de terrain (capteurs et actionneurs). La communication entre les API et le superviseur est supportée par un bus de terrain industriel de type Profibus<sup>2</sup>.

Pour répondre aux besoins d'élévation des cadences de production, la première phase de notre travail a consisté à évaluer l'influence du superviseur sur les cadences de production ainsi que le temps de réponse de sa fonction de traitement des messages émis par les API. Pour cela nous avons modélisé, à l'aide des réseaux de Petri colorés temporisés, les lignes d'assemblage et simulé leur comportement en prenant en compte différentes configurations. Le superviseur actuel fonctionnant en temps partagé sous Windows NT, nous avons alors proposé un prototype basé sur un noyau temps réel lui permettant de garantir une forte réactivité.

Le premier point abordé par l'article en section 2 est une description du système de production et de l'architecture de pilotage. Les performances évaluées et le diagnostic obtenu sont ensuite indiqués en section 3. Le prototypage d'une solution est présenté en section 4. Enfin, la section 5 présente un bilan de l'étude et propose une autre perspective d'amélioration de la productivité du système de production.

## 2. Présentation du système

Le système de production considéré correspond à un procédé d'assemblage automatisé constitué de plusieurs machines de production, appelées stations, organisées en ligne [Figure 1]. Il s'agit d'une série de ressources de production successivement visitées dans l'ordre de leur position par les pièces à manufacturer. La commande de chaque station est assurée par un API.

<sup>1</sup><http://www.autoliv.com>

<sup>2</sup><http://www.profibus.com>

La circulation sur la ligne d'assemblage se déroule selon une discipline FIFO et le déplacement des pièces est, dans la plupart des cas, assuré par un convoyeur. Dans ce mode de production linéaire, également désigné par le terme "flow-shop", les produits subissent les mêmes opérations avec des temps opératoires individualisés pour chaque station mais dans un ordre unique. L'hétérogénéité des temps de cycle des stations induit des situations d'encours.

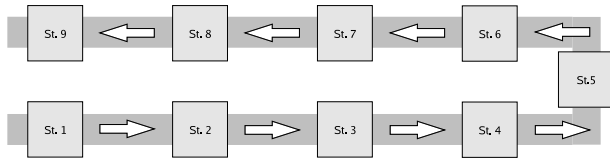


Figure 1. Production en ligne

Les stations fonctionnent de manière indépendante les unes des autres et déroulent individuellement leur séquence opératoire. Il n'existe pas de synchronisation de leur cycle respectif. Lorsqu'une station est disponible (aucun traitement en cours) et qu'une pièce est présente à son entrée, elle entame systématiquement l'exécution de son programme de prise en charge de la pièce.

Une station ne peut, à un instant donné, retenir et traiter qu'une seule pièce.

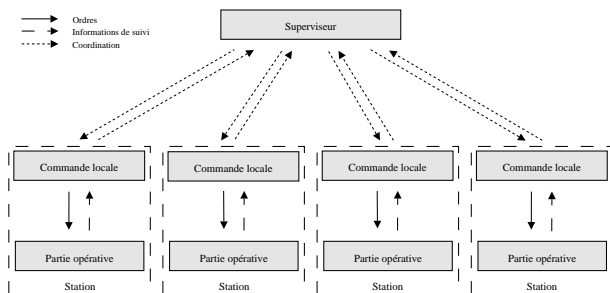


Figure 2. Système de pilotage

Pour assurer la commande de la partie opérative du système d'assemblage, les API interrogent et renseignent le superviseur de façon régulière afin de conditionner et de coordonner leurs actions [Figure 2]. Ces échanges se déroulent au rythme de la production. Le superviseur dispose alors d'une fonction de centralisation de données qu'il enrichit à partir des informations transmises par les API et qu'il peut restituer. Le superviseur constitue ainsi une ressource partagée par tous les API.

Au cours d'un échange, un API sollicite, sous la forme d'un envoi de requête, un service de la part du superviseur. Le message supportant la requête est alors placé dans un tampon de communication du superviseur. Le superviseur gère la sélection des messages présents dans ce tampon de communication et exécute le service en adéquation avec les paramètres du message.

Au terme du traitement, le superviseur établit un message de réponse qu'il transmet directement à l'API en

attente. Les délais cumulés correspondent au temps de réponse du superviseur. Le mode de sélection des messages (discipline de service) présents dans le tampon de communication est de type FIFO.

La mise en œuvre de l'architecture de pilotage décrite implique des échanges fréquents entre les API et le superviseur de la ligne d'assemblage. La cadence de ces échanges est conditionnée par le rythme de la prise en charge successive des pièces à produire par les différentes stations.

L'envoi d'une requête par un API provoque une situation de gel dans le déroulement de leur cycle. La reprise d'activité est déclenchée par la réception de la réponse en provenance du superviseur. Le délai d'attente induit correspond à une période d'inactivité de la station et impacte le volume de pièces produites.

### 3. Évaluation de performances et diagnostic

Le travail décrit a consisté à évaluer la capacité du superviseur à supporter le rythme d'émission de requêtes par les API et à produire des résultats dans des délais suffisamment courts et conformes aux contraintes de temps imposées par la cadence de production.

Les performances ont été évaluées à partir de l'exécution d'un modèle élaboré selon le formalisme des réseaux de Petri colorés temporisés à l'aide du logiciel Design/CPN<sup>3</sup>. Ce choix se justifie par leur intérêt pour la conception et l'évaluation des systèmes de production qui a souvent été souligné [BAR-98, PRO-94, ZIM-96].

Le modèle établi [PLA-05] décrit principalement les flux d'informations liés aux activités de contrôle qui régissent le comportement d'une ligne d'assemblage. Il représente essentiellement la batterie de stations, le tampon de communication et la ressource de traitement des messages. La coloration permet de simplifier le modèle en distinguant les stations par différentes couleurs.

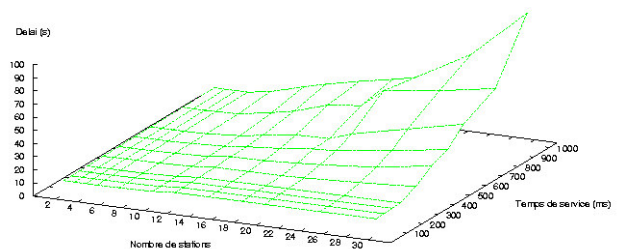


Figure 3. Evolution du délai d'inter-sorties de pièces

L'évaluation de performances s'est attachée à apprécier l'impact du superviseur sur les cadences de production [Figure 3] pour un grand nombre de configurations

<sup>3</sup><http://www.daimi.au.dk/designCPN>

différenciées par le temps de traitement des messages et le nombre de stations implantées sur le système.

Pour ce travail, nous avons considéré que le temps de traitement des messages  $t$  est constant. Les résultats montrent alors que le délai moyen d'inter-arrivées  $\bar{A}$  de messages dans le tampon de communication ne peut être inférieur au temps de traitement des messages. Cette limite est atteinte lorsqu'il persiste toujours un message en cours de traitement :

$$\text{Min}(\bar{A}) = t$$

Les résultats de simulation ont permis d'établir un lien direct entre le délai moyen d'inter-arrivées dans le tampon de communication et d'inter-sorties de pièces de la ligne d'assemblage. Ainsi, lorsque la tâche de traitement des messages atteint le taux d'activité maximal, le système de production n'évolue qu'au rythme de traitement des messages. Ce constat démontre que la ligne d'assemblage est totalement asservie par le superviseur.

En généralisant en fonction du nombre de stations  $k$ , du nombre de messages  $m_i$  générés par la  $i^{\text{eme}}$  station et du temps de traitement  $t_{ij}$  du  $j^{\text{eme}}$  message de la  $i^{\text{eme}}$  station, il est possible de déterminer une cadence maximale de production fixée par la réactivité du superviseur. Cette limite de productivité se décline alors sous la forme d'un délai d'inter-sorties de pièces  $S_{min}$  :

$$S_{min} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m_i} t_{ij}$$

Le résultat s'applique à une borne maximale théorique de productivité des lignes d'assemblage et représente le meilleur cas qui puisse être atteint.

#### 4. Prototypage d'une solution

Le temps de traitement des messages constitue un critère majeur de la performance des systèmes de production étudiés. Il s'agit alors de le diminuer pour permettre à la ligne d'assemblage d'atteindre les cadences de production espérées. L'une des solutions envisagées repose ainsi sur la mise en œuvre d'un ordonnancement temps réel des tâches du superviseur.

Nous avons alors développé un prototype de superviseur basé sur le système d'exploitation Linux et le noyau temps réel RTAI<sup>4</sup>. Les activités assurées par le superviseur se déclinent en trois fonctions :

- la coordination des stations,
- la supervision et la lecture des actions opérateurs,
- l'historisation des données de production.

La coordination des stations représente la fonction majeure de notre superviseur. Elle se décline en trois tâches

exécutées successivement et destinées à la lecture d'un message en provenance du coupleur de communication et de son tampon, au traitement de la requête et à la production d'une réponse destinée à la station émettrice. L'exécution de la tâche de lecture s'effectue en respectant une période suffisamment faible et adaptée en fonction du délai d'inter-arrivées de messages pour permettre un traitement rapide des requêtes. En raison de la règle de précedence qui les lie, ces trois tâches peuvent donc être assimilées à une seule.

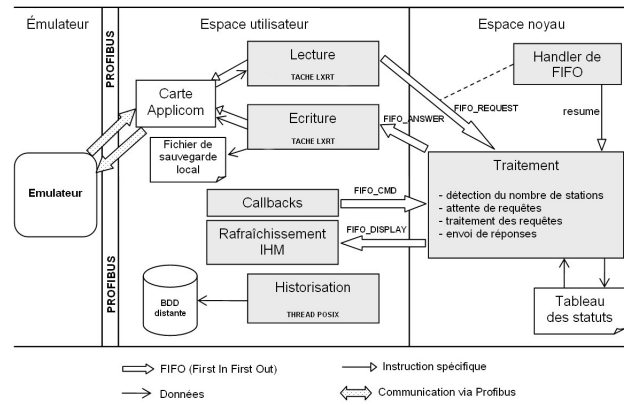


Figure 4. Structure du superviseur

La structure de notre superviseur s'appuie sur un placement majoritaire des tâches dans l'espace utilisateur. Le pilote du coupleur de réseau (carte Applicom) ne permet pas d'implémentation des tâches de lecture et d'écriture en mode noyau. Cependant, la tâche de traitement des requêtes s'exécute en mode noyau afin de réduire au maximum son temps de réponse [Figure 4]. En raison de leurs caractéristiques temporelles et de leur niveau de priorité, les tâches de supervision et d'historisation ne nécessitent pas d'être placées en mode noyau.

Tâche	Capacité (ms)	Période (ms)
Coordination	2	30
Supervision	15	100
Historisation	100	10 000

Tableau 1. Caractéristiques des tâches

Nous avons alors établi la capacité  $C$  (pire temps d'exécution) des trois tâches ainsi considérées à partir de tests et fixé leur période  $P$  (délai entre deux activations successives) en nous basant sur le comportement du système de production [Tableau 1] dans une configuration intégrant une quarantaine de stations. La période de la tâche de coordination est paramétrée en fonction du délai d'inter-arrivées de messages dans le tampon de communication. Ce délai est directement dépendant du temps de scrutation du réseau Profibus reliant le superviseur et les API. Les valeurs présentées correspondent à des situations pessimistes.

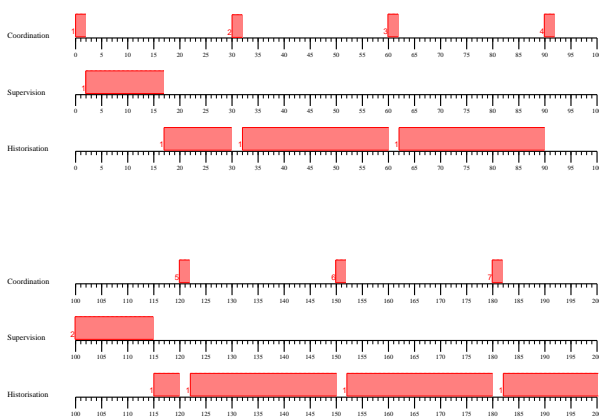
<sup>4</sup><http://www.rtai.org>

L'algorithme Rate Monotonic [LIU-73] est retenu pour ordonner les tâches. La tâche de coordination se voit évidemment attribuer la plus forte priorité.

L'ordonnabilité du jeu de tâches se détermine classiquement par le calcul du taux d'occupation  $U$  du processeur du superviseur. Elle est vérifiée lorsque :

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{P_i} \leq n(2^{\frac{1}{n}} - 1)$$

Le taux d'occupation obtenu est proche de 0.23. Cette valeur correspond donc à un taux d'occupation voisin de 23% et reste bien inférieure à la borne  $n(2^{\frac{1}{n}} - 1)$  garantissant ainsi que toutes les contraintes de temps seront respectées [Figure 5].



**Figure 5. Ordonnement des tâches**

Les bornes sur les temps de réponse ont été vérifiées à l'aide du logiciel Cheddar [SIN-04]. Elle est de 2 ms pour la tâche de coordination. Pour la tâche de supervision, elle est de 17 ms. Enfin, la borne sur le temps de réponse est de 140 ms pour la tâche d'historisation.

## 5. Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était en premier lieu d'analyser l'influence d'un superviseur sur les cadences de production de lignes d'assemblage automatisées. Il s'agissait ensuite de proposer une solution apportant les possibilités de pilotage des procédés considérés avec un nombre important de stations.

En effet, les contraintes du superviseur, en terme de réactivité, peuvent être fortes pour permettre d'atteindre les volumes de production souhaités. Nous avons alors montré que la mise en œuvre d'un noyau temps réel associée à un ordonnancement adapté des tâches permet d'accroître la performance du superviseur étudié et de répondre aux objectifs de production. Il est alors possible d'asservir des lignes d'assemblage dont le nombre de stations est élevé.

Bien que les résultats obtenus représentent un fort intérêt du point de vue de la productivité, il paraît intéressant de mener une réflexion sur le mode de consommation des

messages. Ce travail sera destiné à l'évaluation des possibilités complémentaires d'amélioration de la performance des systèmes de production par un ordonnancement des messages jusque là consommés dans l'ordre de leur arrivée dans le tampon de communication.

## Références

- [BAR-98] M. BARAD – *Timed Petri nets as a verification tool* – Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998.
- [GRI-01] A. GRIECO, Q. SEMERARO, T. TOLIO – *A review of different approaches to the FMS loading problem* – The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol. 13, p. 361-384, 2001.
- [LIU-73] C.L. LIU, J.W. LAYLAND – *Scheduling algorithms for multi-programming in a hard real-time environment* – Journal of the Association for Computing Machinery, vol. 10(1), p. 40-61, 1973.
- [PLA-05] L. PLASSART, P. LE PARC, F. SINGHOFF, L. MARCÉ – *Modelling and simulation of interactions between the local command units and the supervisor of an automated assembly line: a case study* – XVI Workshop on Supervising and Diagnostics Systems, n° 1-2, chap. 5, p. 210-221, 2005.
- [PRO-94] J.M. PROTH, X. XIE – *Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production* – Masson, 1994.
- [SIN-04] F. SINGHOFF, J. LEGRAND, L. NANA, L. MARCÉ – *Cheddar: a flexible real-time scheduling framework* – ACM Ada Letters Journal, vol. 24(4), p. 1-8, 2004.
- [ZIM-96] A. ZIMMERMANN, K. DALKOWSKI, G. HOMMEL – *A case study in modelling and performance evaluation of manufacturing systems using colored Petri nets* – Proceedings of the 8th European Simulation Symposium (ESS'96), p. 282-286, 1996.