

Modélisation et simulation des interactions
entre les unités de commande locale
et le superviseur d'une ligne d'assemblage : Une étude de cas

6 juin 2005

L. PLASSART, F. SINGHOFF, P. LE PARC, L. MARCÉ
{loic.plassart, frank.singhoff, philippe.le-parc, lionel.marce}@univ-brest.fr
LISyC — EA 3883
Université de Bretagne Occidentale
20, av. Le Gorgeu
29285 Brest Cedex

Résumé

Cet article présente une étude de cas concernant les interactions entre une batterie d'automates programmables et un superviseur central destiné au contrôle d'une ligne d'assemblage automatisée. Les automates programmables assurent la commande des différentes stations du procédé. Les échanges sont de type client-serveur et s'effectuent à plusieurs reprises au cours du cycle des automates programmables. La modélisation sous la forme d'un réseau de Petri et la simulation permettent d'évaluer les performances du système étudié et de mesurer l'impact du temps de réponse du superviseur aux sollicitations des automates programmables. La nécessité de borner le temps de réponse du superviseur, afin de respecter les objectifs de production, est alors démontrée.

Mots clefs

Étude de cas, analyse de performances, modélisation, simulation, réseau de Petri, contrôle, commande

1 Introduction

La production de pièces manufacturières se positionne sur des marchés sans cesse plus concurrentiels. Aussi, est-elle couramment réalisée par des procédés flexibles permettant la production automatique de pièces de types divers, en quantités variables, afin de mieux répondre aux exigences de l'environnement économique. Les systèmes de production doivent continuellement s'adapter et présentent en conséquence un niveau de complexité et d'automatisation de plus en plus élevé.

Cependant, le comportement d'un équipement de production est aussi conditionné par les caractéristiques du système qui en assure le contrôle [GRI-01]. Les outils informatiques déployés pour piloter les systèmes de production automatisés constituent alors un facteur prépondérant de la productivité et doivent, à l'instar du procédé mécanique contrôlé, faire l'objet d'une étude spécifique garantissant une meilleure intégration de l'ensemble.

Les fonctions de pilotage de production impliquent la prise en compte d'un nombre important d'activités de traitement de matières et d'informations émanant de différentes composantes du procédé piloté, dans le but de fabriquer des produits profitablement [VEE-94]. La conception du système de pilotage d'un équipement industriel automatisé pose alors une grande quantité de problèmes matériels et logiciels. Les architectures de pilotage actuelles sont généralement constituées par un ensemble d'entités réparties de nature hétérogène. Elles sont souvent complexes et mettent en jeu un volume d'informations toujours plus conséquent ; cette évolution s'accompagne habituellement d'une remise en cause des méthodes de contrôle et de commande des systèmes automatisés par l'intégration d'exigences particulières appliquées aux temps de réponse.

L'étude de cas présentée ici est menée pour le compte d'un équipementier automobile, la société Livbag du groupe suédois Autoliv¹. Elle s'applique à des lignes d'assemblage dont le pilotage est assuré conjointement par une batterie d'automates programmables industriels (API) et un équipement central de contrôle et de surveillance (superviseur). Les automates programmables 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).

Les automates programmables et le superviseur coopèrent afin de permettre au procédé de respecter les cadences définies et d'atteindre les objectifs de production fixés. Les échanges entre ces entités sont supportés par un bus de terrain et un tampon de communication situé au niveau du superviseur. La transmission de messages est donc l'unique forme de dialogue au cœur du système de pilotage. La communication entre les automates programmables et le superviseur s'effectue selon une séquence d'émission d'une requête et de réception d'une réponse. Les échanges sont toujours initiés par les automates programmables et s'effectuent à plusieurs moments au cours du cycle opératoire des machines de production. Le mode d'interaction est ainsi de type client-serveur.

Les délais cumulés d'acheminement, d'attente et de traitement des messages constituent un temps de réponse qu'il est nécessaire de maîtriser et de contenir dans des bornes afin de garantir que le système de pilotage n'influe pas de manière significative sur les cadences de production. L'étude a pour objectif d'analyser la réactivité du superviseur aux sollicitations des automates programmables et de mesurer son impact sur les performances du système de production.

L'article est abordé par une description du système de production et de l'architecture de pilotage en section 2.

La phase de modélisation du système de production et de son pilotage est ensuite présentée en section 3. Elle s'appuie sur le formalisme des réseaux de Petri colorés temporisés. L'évaluation des performances du modèle porte sur les taux d'occupation du tampon de réception des messages et d'utilisation de la ressource de traitement (superviseur). Plusieurs configurations sont évaluées, elles diffèrent par le nombre de stations implantées sur la ligne d'assemblage. Ces différents cas de figure

¹<http://www.autoliv.com>

impliquent une variation du volume de requêtes soumises au superviseur et donc une consommation plus ou moins importante de la ressource partagée qu'il constitue pour les automates programmables.

L'analyse et la synthèse des résultats de simulation en section 4 permettent de mesurer la performance du modèle et d'évaluer son degré de corrélation, en termes de volume de pièces produites, avec le système de production réel. Il est en outre possible de déterminer une cadence maximale de production pour les systèmes étudiés.

Enfin, la section 5 présente un bilan de l'étude et permet d'établir quelques perspectives d'amélioration de la productivité du système de production par la réduction du temps de traitement des messages par le superviseur.

2 Système de production considéré

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

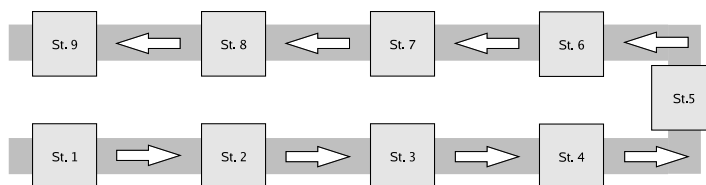


FIG. 1 – Production en ligne

La circulation sur la ligne d'assemblage se déroule selon la règle du "premier entré-premier sorti" et le déplacement des pièces est, dans la plupart des cas, assuré par des plateaux véhiculés au moyen d'un convoyeur. Dans ce mode de production linéaire, également appelé "flow-shop", les produits subissent une même séquence d'opérations avec des temps opératoires individualisés pour chaque station. Les pièces sont généralement retirées de leur plateau pour l'exécution des traitements mécaniques.

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. Aussi, au terme de son traitement par une station, une pièce ne peut être prise en compte par la station suivante que si celle-ci est disponible. De plus, les temps de cycle des différentes stations ne sont pas homogènes et des situations d'encours se produisent régulièrement. Le volume de pièces concerné reste cependant limité à quelques unités.

Le cheminement unidirectionnel des pièces et la règle de précedence qui en découle imposent une séquence opératoire unique. Toutefois, pour certaines productions, une station peut ne pas être intégrée à la gamme de fabrication.

2.1 Cycle de fonctionnement des stations

Les stations effectuent au cours de leur cycle une séquence d'opérations dont chaque occurrence est d'une durée constante [TAB. 1]. La plupart des opérations sont exécutées communément par

l'ensemble des stations de la ligne d'assemblage et leur durée est alors fixe pour tout le système de production. Seul le traitement mécanique présente une durée d'exécution propre à chaque station.

Les pièces sont assemblées par des traitements mécaniques successifs réalisés sur une série de machines de production disposées en ligne. La coordination de l'écoulement du flux de pièces sur les différentes machines de production est basée sur une identification systématique des pièces en cours d'assemblage à chaque arrivée dans une station. Ainsi, lorsqu'une machine de production prend en charge une pièce, l'automate programmable émet une requête vers le superviseur afin de s'informer du statut de la pièce (bonne ou mauvaise). L'analyse de la réponse conditionne le traitement mécanique (pièce bonne) ou le relâchement (pièce mauvaise) du plateau.

Au terme du traitement mécanique de la pièce, l'automate programmable sollicite à nouveau le superviseur pour lui remonter les résultats de l'assemblage (mesures et indications diverses). Le stockage et le traitement de la requête sont opérés identiquement à une demande de statut.

Le délai de production d'une demande de statut et de son acheminement dans le tampon de communication du superviseur est mesuré à 60 ms et s'exécute durant un cycle de l'automate programmable. Il en est de même pour une séquence de remontée de données vers le superviseur.

Opération	Ressource	Durée (<i>ms</i>)
Convoyage	Externe	3 000
Identification	API	550
Demande de statut	API	60
Évaluation de message Recherche de statut / Intégration de données Transmission de statut / Acquittement d'intégration	Superviseur	600
Analyse de statut	API	60
Remontée de données	API	60
Libération	API	60

TAB. 1 – Opérations de durée fixe

Le temps d'attente moyen généralement constaté au niveau des automates programmables pour l'obtention d'une réponse du superviseur à une requête quelconque est de 600 ms. Ce délai recouvre les délais de séjour dans le tampon de communication, l'évaluation et le traitement du message ainsi que l'émission et la réception de la réponse. Dans le cadre de cette étude, la durée respective de chacune des opérations effectuées par le superviseur est sans véritable importance au regard du système étudié et des interactions qui constituent l'objet principal de notre travail. Aussi, les trois opérations successivement exécutées à la suite de la prise en compte d'un message sont regroupées dans un seul intervalle temporel de 600 ms.

2.2 Activités de contrôle et de commande

Dans le domaine de l'automatisation des procédés, l'association des termes contrôle et commande est le plus souvent utilisée pour décrire la fonction de pilotage. Le contrôle concerne alors l'ensemble des activités de configuration et de surveillance du système de production ainsi que la coordination des unités de commande. Il assure en outre la conservation du système de pilotage dans un état stable et ordonné en garantissant le respect des contraintes de précedence liées à la chronologie des traitements et à l'ordre de passage des pièces dans les stations.

Le contrôle constitue ainsi une activité hiérarchiquement plus élevée que la commande à laquelle il impose des décisions. Il s'informe également de manière régulière des résultats de l'exécution de la commande. Alors que la commande peut se définir comme un ensemble de règles régissant l'évolution

dynamique du système piloté en le faisant évoluer vers un état désiré, le contrôle d'un système consiste à surveiller et à agir sur son comportement en assurant l'enchaînement correct des opérations de commande.

Nous retenons ces dernières définitions et la déclinaison de la fonction de pilotage en contrôle et commande. Cette terminologie est utilisée dans la suite de notre étude.

Les automates programmables interrogent et renseignent le superviseur de façon régulière afin de conditionner et de coordonner leurs actions. 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 automates programmables et qu'il peut restituer.

Dans le système de production considéré, les activités de commande sont intégralement exécutées par les différents automates programmables implantés au sein des stations. La notion de commande locale est alors évoquée.

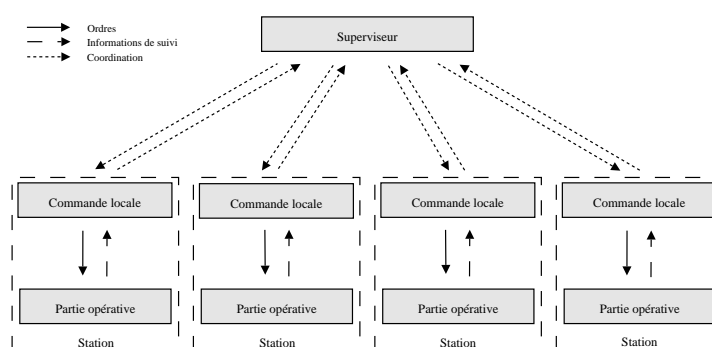


FIG. 2 – Système de pilotage

Le superviseur assure le contrôle du système de production et représente une entité centrale du système de pilotage [FIG. 2]. La structure met ainsi en œuvre un contrôle centralisé et une commande distribuée.

2.3 Interactions entre les automates programmables et le superviseur

Le dialogue entre les automates programmables de la commande locale et le superviseur s'opère selon des interactions de type client-serveur. Dans le contexte de l'architecture de pilotage considérée, les automates programmables constituent la population de clients et le superviseur représente le serveur.

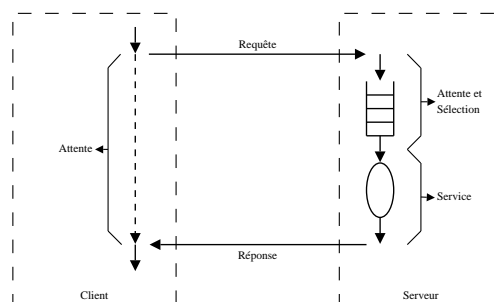


FIG. 3 – Interactions de type client-serveur

Au cours d'un échange, la station 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 le tampon de communication du

superviseur. Le superviseur gère la sélection des messages présents dans le tampon de communication et exécute le service en adéquation avec les paramètres du message. Le temps de séjour des messages dans le tampon de communication est variable. Au terme du traitement, le serveur établit un message de réponse qu'il transmet directement au client resté en attente [FIG. 3]. 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 "premier entré-premier sorti".

L'ensemble des ordres émis par le superviseur repose sur les messages de réponse qu'il transmet aux automates programmables. Ainsi, les changements de série, les arrêts de production et toute autre action de contrôle, sont déclenchés par le placement de l'information nécessaire dans le message de réponse à une requête et par sa prise en compte par les automates programmables.

La mise en œuvre de l'architecture de pilotage décrite implique des échanges fréquents entre les automates programmables 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 par les différentes stations.

L'envoi d'une requête par un automate programmable 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 Modélisation du système

L'objectif du travail se concentre sur l'étude des interactions existantes au sein du système de pilotage. Le temps de réponse à une requête revêt une grande importance en raison de son influence sur le temps de cycle des stations. Aussi, les processus correspondants présentent, au regard du jeu de tâches exécuté par le superviseur, le niveau de priorité le plus élevé.

Le modèle décrit alors l'architecture supportant les interactions entre les unités de commande locale et le superviseur de la ligne d'assemblage. Il est essentiellement fondé sur l'expression du fonctionnement décorrélé des différentes machines de production d'une ligne d'assemblage et leur accès à une ressource de traitement commune correspondant à un superviseur central. Le modèle établi s'attache principalement à décrire les flux d'informations liés aux activités de contrôle qui régissent le comportement d'une ligne d'assemblage.

Le modèle a été élaboré selon le formalisme des réseaux de Petri colorés temporisés à l'aide du logiciel Design/CPN². L'intérêt des réseaux de Petri pour la conception et l'évaluation des systèmes de production a souvent été souligné [DIC-93, DES-95, PRO-94, SIL-98, ZIM-96]. Les réseaux de Petri colorés temporisés sont une forme étendue des réseaux de Petri ordinaires.

Le comportement des systèmes informatiques rencontrés dans les domaines de la productique et de la robotique est très souvent basé sur des mécanismes de temporisations permettant de définir la durée de déroulement de certaines activités. Les extensions temporelles des réseaux de Petri sont des modèles bien adaptés à l'étude formelle de ces mécanismes [JUA-00]. Les réseaux de Petri temporisés sont ainsi très utilisés pour l'évaluation des performances des systèmes en général et, plus particulièrement, dans le cas des procédés de manufacturing mais sont souvent critiqués en raison des proportions qu'ils peuvent prendre lorsque le nombre de produits ou de stations impliqués est important [BAR-98].

La coloration des réseaux de Petri permet de réduire la taille du modèle et d'obtenir ainsi une représentation plus compacte des systèmes englobant des composantes distinctes ayant des comportements identiques. Hormis le déroulement du traitement mécanique qui n'est pas pris en compte par le modèle, les machines de production de la ligne d'assemblage adoptent la même séquence d'opérations, la coloration convient donc bien à la modélisation du système de production étudié.

²<http://www.daimi.au.dk/designCPN/>

3.1 Performances évaluées

L'étude consiste à analyser la capacité du superviseur à supporter le rythme d'émission de requêtes par les automates programmables à produire des résultats dans des délais suffisamment courts et conformes aux contraintes de temps imposées par la cadence de production.

Le système de production considéré par l'étude est évalué par l'analyse de deux composantes fondamentales que sont le tampon de communication et la ressource de traitement du superviseur. Le contenu du tampon de communication permet de connaître, à chaque instant de l'exécution du système, le nombre et la liste des stations en attente d'une réponse de la part du superviseur ainsi que la phase du cycle dans laquelle elles se situent. La consommation des messages stockés dans le tampon de communication est assurée par la ressource de traitement du superviseur dont le rythme et le taux d'utilisation sont une caractéristique majeure de la dynamique du modèle. L'analyse de ces deux aspects doit alors permettre de dégager d'importantes propriétés aboutissant à une bonne connaissance de la manière dont se déroulent les échanges entre les entités de commande locale et le superviseur.

Les critères de performances évalués à partir du modèle sont donc le taux d'utilisation de la ressource de traitement du superviseur pour traiter les messages et le taux d'occupation du tampon de communication.

3.2 Comportement modélisé

Le modèle [FIG. 4] met en œuvre trois éléments principaux que sont le jeu de stations, le tampon de communication et la ressource de traitement constituée par le superviseur.

Des fonctions de comptage des pièces produites et de génération systématique de pièces mauvaises sont également implémentées. Elles ne sont toutefois pas utilisées pour l'étude décrite dans cet article.

La taille du tampon de communication est fixée en fonction du nombre de stations déclarées dans le modèle. Elle permet ainsi de disposer d'une capacité suffisante pour l'ensemble des configurations évaluées afin de ne pas aboutir à une situation de saturation conformément au système réel modélisé.

La fréquence d'échantillonnage du temps est généralement choisie bien supérieure à la constante de temps principale du processus à contrôler [OGA-87]. Le quantum de temps retenu pour la temporisation des activités modélisées est ici de 10 ms. Cette période est définie en fonction des caractéristiques des automates programmables dont le temps de cycle propre se situe aux environs de 60 ms.

La propagation d'un message sur le réseau est très rapide au regard du système modélisé. Seuls les délais de séjour dans le tampon de communication et de traitement du message sont significatifs. Aussi, dans le cadre de notre étude, nous considérons que la transmission d'une requête ou d'une réponse est instantanée.

Les opérations du cycle des stations sont intégrées au modèle sous la forme de places. La séquence décrite prend en compte les opérations d'acheminement (place *Convoyage*) et d'identification (place *Identification*) de la pièce, de demande de statut au superviseur (place *Demande*), d'analyse de la réponse émise par le superviseur (place *Analyse*), de traitement mécanique de la pièce (place *Traitement*) et de remontée de données (place *Tracabilite*).

Les transitions correspondent aux événements qui conditionnent la circulation des jetons symbolisant l'évolution du système et la situation des stations et du superviseur. La temporisation de certaines transitions (notation "@+<durée>") permet de maintenir la présence des jetons dans les places situées en amont durant le délai spécifié. Elle permet de spécifier la durée d'exécution des opérations.

La coloration est essentiellement utilisée pour discerner les différentes stations ainsi que les différentes positions des messages dans le tampon de communication.

Pour les stations, les couleurs s'appliquent en fonction de leur numéro et de leur placement sur la ligne d'assemblage. Le passage des pièces dans les différentes stations est modélisé par une incrémentation du numéro de couleur, sauf dans le cas du traitement par la dernière station (fin d'assemblage).

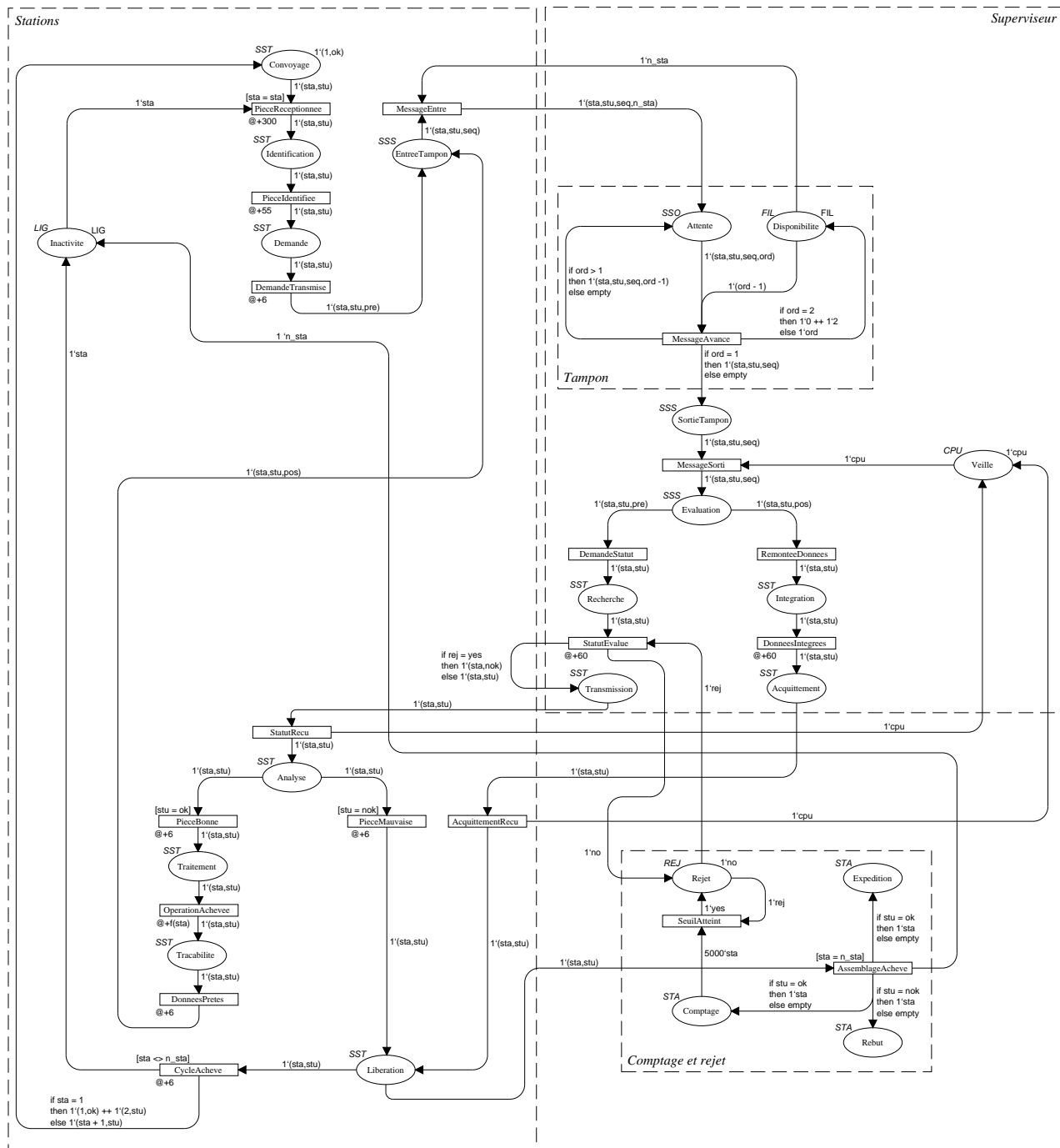


FIG. 4 – Réseau de Petri du système étudié

La disponibilité des stations est gérée par une place spécifique (*Inactive*) garantissant l'exclusivité de son exécution au traitement d'une seule pièce, la présence d'un jeton de couleur x indique que la station x est en situation d'inactivité. La place *Inactive* est initialisée en fonction du nombre de stations déclarées. La prise en charge d'une pièce par la station x provoque le retrait du jeton de couleur x de la place *Inactive* qui y est replacé au terme du cycle opératoire. Aucune limitation du

nombre pièces en encours entre deux stations n'est appliquée.

Le tampon de communication du superviseur est modélisé par une place (*Attente*). Les jetons représentent la situation des stations ayant émis une requête. Ils sont successivement positionnés puis sortis de la place *Attente*. Les couleurs sont affectées selon l'ordre des messages dans le tampon. Chaque rotation d'un jeton symbolise une avancée et s'accompagne d'une décrémentation de son numéro de couleur. La progression dans le tampon de communication s'effectue en fonction de la consommation par le superviseur du jeton le plus avancé. Le passage à la couleur 1 positionne la station à la dernière place et indique que le message qu'elle a émis fera l'objet du prochain traitement par le superviseur.

Le superviseur est représenté par une place unique (*Veille*) contenant au maximum un seul jeton. Le positionnement du jeton dans cette place indique la disponibilité du superviseur. La présence d'un message dans le tampon de communication implique systématiquement le retrait du jeton de la place *Veille*. Le superviseur cesse donc son activité lorsqu'il achève le traitement d'un message et que la file d'attente est vide.

3.3 Paramétrage du modèle

Les configurations évaluées diffèrent par leur nombre de stations déclarées pour les phases de simulation. Elles correspondent à neuf cas de figure pour lesquels la ligne d'assemblage est constituée de 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 stations.

Station	Durée (ms)	Station	Durée (ms)	Station	Durée (ms)
1	1 900	11	1 100	21	4 900
2	6 500	12	8 400	22	3 600
3	5 800	13	2 800	23	5 800
4	6 400	14	2 300	24	1 100
5	3 000	15	6 700	25	1 700
6	6 600	16	3 400	26	5 000
7	6 100	17	8 500	27	3 500
8	6 400	18	2 700	28	2 800
9	3 900	19	6 600	29	4 600
10	7 200	20	6 900	30	7 600

TAB. 2 – Temps de traitement mécanique

Le modèle est essentiellement destiné à l'évaluation du système dans son état initial avec des temps de réponse aux requêtes émises par les automates programmables qui soient conformes au délai moyen constaté sur des lignes d'assemblage type. La temporisation des places est principalement définie à partir de relevés effectués sur plusieurs lignes d'assemblage en situation normale de fonctionnement et consolidés afin de disposer d'un échantillon réaliste et représentatif du comportement des procédés étudiés.

Toutefois, le travail de simulation, bien que reposant sur la modélisation d'un système existant, met en œuvre des configurations dont l'implémentation n'est pas effective dans les ateliers. La formalisation des temps de traitement mécanique ne peut donc pas se bâtir à partir de relevés. Ces durées ont alors été produites à l'aide d'un générateur pseudo-aléatoire. La génération tient compte des bornes maximale et minimale constatées sur les lignes d'assemblage existantes où les temps de traitement mécanique s'étalent de 1 100 à 8 500 ms [TAB. 2].

Par conséquent, le paramétrage s'appuie sur le nombre de stations déclarées et sur le délai de traitement d'un message par le superviseur.

4 Résultats de simulation

Les opérations de simulation se déclinent en deux étapes. La première phase concerne l'étude des systèmes existants (2 à 15 stations) et doit nous permettre de valider le modèle en comparant les résultats obtenus avec des relevés effectués sur des configurations réelles. La seconde phase est destinée, d'une part, à évaluer les possibilités d'extension du nombre de stations implantées sur les lignes d'assemblage et, d'autre part, à mesurer les gains potentiels apportés par la réduction du temps de traitement des messages.

La durée d'exécution du modèle correspond à une période de production de 75 mn échantillonnée toutes les 10 ms (450 000 pas d'horloge). Elle couvre les phases de montée en cadence et de production normale de la ligne d'assemblage. La montée en cadence est identifiée sous la forme d'un régime transitoire et le régime stationnaire s'applique à la situation de production normale.

Le passage en régime stationnaire est provoqué par l'entrée en fonctionnement de la dernière machine de production de la ligne d'assemblage (prise en compte de la première pièce). Il est donc lié au nombre de stations implantées sur la ligne d'assemblage et diffère selon les configurations. Toutefois, pour des raisons d'homogénéité, nous étudions le régime stationnaire sur les 360 000 derniers pas d'horloge correspondant à 60 mn de production.

4.1 Cas des systèmes existants

Les résultats de simulation des systèmes existants laissent apparaître une évolution du taux d'activité du superviseur qui tend vers une valeur correspondant au taux d'utilisation de la ressource en régime stationnaire [FIG. 5].

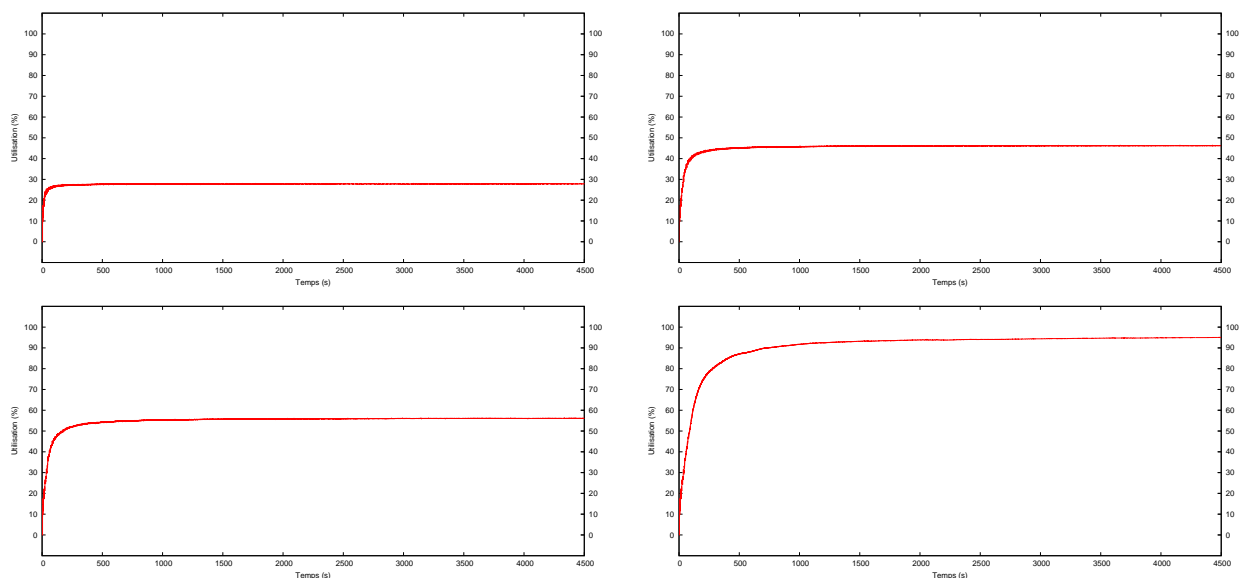


FIG. 5 – Évolution du taux d'activité du superviseur pour 2, 4, 5 et 10 stations

L'activité du superviseur se situe entre 28 % et 100 % suivant les configurations [TAB. 3]. La ressource de traitement des messages est proche de la saturation dans le cas des configurations à 10 et 15 stations.

Configuration	Taux (%)
2 stations	28,083
3 stations	36,791
4 stations	46,926
5 stations	56,493
10 stations	95,964
15 stations	99,996

TAB. 3 – Activité du superviseur en régime stationnaire

Excepté dans le cas des configurations à 10 et 15 stations, le nombre moyen de messages dans le tampon de communication reste bien inférieur à 1 [TAB. 4]. Aussi, de nombreuses instants d'inactivité du superviseur existent pour les configurations à 2, 3, 4 et 5 stations.

Configuration	Minimum	Moyenne	Maximum
2 stations	0	0,049	1
3 stations	0	0,119	2
4 stations	0	0,149	2
5 stations	0	0,242	3
10 stations	0	1,269	5
15 stations	0	5,079	10

TAB. 4 – Volume de messages dans le tampon de communication en régime stationnaire

En négligeant les délais de propagation sur le réseau, le temps de réponse du superviseur à une requête [TAB. 5] correspond au cumul du temps passé par le message dans le tampon de communication et du temps de traitement.

Configuration	Minimum (ms)	Moyenne (ms)	Maximum (ms)
2 stations	600	609,952	760
3 stations	600	790,967	1 200
4 stations	600	786,688	2 400
5 stations	600	852,650	2 920
10 stations	600	1 391,994	7 200
15 stations	600	3 650,287	33 180

TAB. 5 – Temps de réponse du superviseur en régime stationnaire

Les interactions entre les automates programmables et le superviseur se produisent à deux reprises au cours du cycle de fonctionnement des stations (cas d'une pièce bonne). Les valeurs moyennes relevées lors de la simulation, concernant les temps de réponse du superviseur, sont proches de celles mesurées sur des procédés réels.

Lors de son exécution, le modèle permet d'obtenir des volumes de production (place *Expedition* du réseau de Petri) similaires à ceux constatés sur les systèmes réels [TAB. 6]. Nous pouvons donc en supposer que les résultats obtenus par la simulation présentent un fort degré de conformité avec le système réel.

Configuration	Qté par simulation	Qté mesurée
2 stations	391	384
3 stations	372	–
4 stations	372	–
5 stations	369	–
10 stations	324	–
12 stations	261	271
15 stations	220	–
18 stations	184	204

TAB. 6 – Nombre de pièces produites

Nous constatons que le superviseur consacre plus de 50% de son activité au traitement des messages à partir d'une configuration à 5 stations et que la ressource qu'il constitue est quasiment occupée en permanence dans le cas de procédés à 10 et 15 stations [TAB. 3].

4.2 Prospectives

La seconde phase de simulation concernent des configurations de 20, 25 et 30 stations qui, bien qu'elles n'aient jamais été mises en œuvre, peuvent répondre à un besoin constant d'accroître le nombre d'opérations nécessaires à la production de produits finis.

Configuration	Taux (%)
20 stations	100,000
25 stations	100,000
30 stations	100,000

TAB. 7 – Activité du superviseur en régime stationnaire

Les résultats de simulation montrent une activité permanente du superviseur [TAB. 7], au cours du régime stationnaire, indiquant la présence systématique de messages en attente de traitement.

Configuration	Minimum	Moyenne	Maximum
20 stations	2	9,100	15
25 stations	6	13,507	20
30 stations	8	16,691	23

TAB. 8 – Volume de messages dans le tampon de communication en régime stationnaire

L'analyse du tampon de communication permet de confirmer la situation d'attente induisant le gel du déroulement du cycle des stations [TAB. 8]. Il est intéressant de noter qu'à tout instant la moitié des stations de la ligne d'assemblage est en situation d'attente (moyenne des messages dans le tampon de communication).

Configuration	Minimum (ms)	Moyenne (ms)	Maximum (ms)
20 stations	680	6 058,531	44 930
25 stations	680	8 700,545	77 930
30 stations	680	10 618,110	101 980

TAB. 9 – Temps de réponse du superviseur en régime stationnaire

Le temps de réponse moyen du superviseur [TAB. 9] croît de manière importante et ne permet pas d'obtenir des quantités de pièces produites conformément aux objectifs de production [TAB. 10].

Configuration	Quantité
20 stations	159
25 stations	122
30 stations	99

TAB. 10 – Nombre de pièces produites

L'implémentation de lignes d'assemblage intégrant un grand nombre de stations (20 ou plus), avec un temps de traitement des messages de 600 ms, implique que des situations d'attente conséquentes seront fréquemment constatées au niveau des stations au cours de leur cycle de fonctionnement.

Config.	Qté	Gain	Config.	Qté	Gain	Config.	Qté	Gain
2 st.	421	7,673 %	5 st.	416	12,737 %	20 st.	332	108,805 %
3 st.	420	12,903 %	10 st.	385	18,827 %	25 st.	325	166,393 %
4 st.	419	12,634 %	15 st.	342	55,455 %	30 st.	313	216,162 %

TAB. 11 – Nombre de pièces produites en réduisant le temps de traitement des messages à 200 ms

Nous avons simulé le comportement de lignes d'assemblage pour l'ensemble des configurations en adoptant un temps de traitement des messages réduit à 200 ms. La comparaison avec les relevés précédents montre que les gains potentiels de productivité [TAB. 11] sont importants.

4.3 Synthèse

Les relevés accumulés au cours des opérations de simulation ont permis de dégager des caractéristiques intéressantes quant au comportement des systèmes de production étudiés.

L'activité de la ressource de traitement des messages se détermine par la métrique classiquement utilisée pour guider le choix d'un algorithme d'ordonnancement dans un système temps réel [BON-99]. La capacité C_i et la période P_i de la tâche i sont alors prises en compte :

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{P_i}$$

En considérant que le traitement des messages n'est assuré que par une seule tâche dont le temps d'exécution T correspond à la capacité C et que le délai moyen d'inter-arrivées de messages \bar{A} s'applique à la période P , alors le taux d'utilisation de la ressource de traitement des messages s'obtient par la formule suivante :

$$U = \frac{T}{\bar{A}}$$

Une condition nécessaire pour que les messages puissent être traités consiste à garantir que le taux d'utilisation U n'est pas supérieur au nombre de processeurs n exécutant la tâche de traitement des messages :

$$U \leq n$$

En fonction d'un temps de réponse et d'un nombre de processeurs dédiés au traitement des messages, il est ainsi possible de déterminer le délai moyen optimal d'inter-arrivées reflétant la plus grande cadence que puisse atteindre la ligne d'assemblage :

$$\bar{A} = T$$

Nous pouvons donc en déduire que le délai moyen d'inter-arrivées de messages dans le tampon de communication ne peut être inférieur au temps d'exécution de la tâche de traitement :

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

Ce résultat est confirmé par les différents relevés de simulation qui ont montré que le délai moyen d'inter-arrivées se réduit et converge vers le temps d'exécution de la tâche de traitement des messages T avec l'augmentation du nombre de stations [FIG. 6] et la progression du taux d'activité de la tâche de traitement des messages.

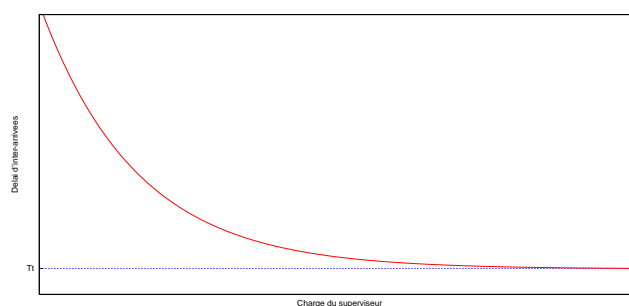


FIG. 6 – Évolution des délais moyens d'inter-arrivées

En effet, lorsque l'activité de la ressource de traitement des messages est maximale, le délai moyen d'inter-arrivées de messages est équivalent au temps de réponse de la tâche et atteint son seuil minimal.

Les résultats de simulation ont permis d'établir un lien direct entre les délais moyens d'inter-arrivées et d'inter-sorties. Ainsi, lorsque la tâche de traitement des messages atteint le seuil d'activité maximale, 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. Le pas d'évolution correspond alors au temps d'exécution de la tâche de traitement des messages T .

En fonction du temps d'exécution déterminé pour la tâche de traitement des messages T et d'un nombre de messages nécessaires M à l'assemblage complet d'une pièce, il est possible de déterminer la cadence maximale théorique du système de production. Cette cadence maximale se déclinant sous la forme d'un seuil plancher du délai moyen d'inter-sorties de pièces S_{min} :

$$S_{min} = T \cdot M$$

Ce résultat s'applique à une borne maximale théorique de productivité des lignes d'assemblage et représente le meilleur cas qui puisse être atteint. En calculant ainsi les cadences maximales théoriques avec les résultats de simulation, nous constatons que cette borne n'est jamais dépassée.

5 Conclusion et perspectives

L'étude présentée dans cet article s'applique au système de contrôle d'une ligne d'assemblage. L'objectif est d'estimer l'impact du temps de réponse du superviseur aux sollicitations des automates programmables sur les performances du procédé contrôlé.

L'analyse quantitative décrite nous permet de connaître a priori le comportement de la ligne d'assemblage considérée pour différentes configurations en fonction d'un temps de traitement des messages donné.

La modélisation et la simulation du système de production considéré montrent que la capacité de production est fortement conditionnée par la réactivité du superviseur. Les situations d'attente pour les stations sont fréquentes et se traduisent par une perte de productivité. Aussi, la réduction du temps de traitement des messages par le superviseur est un facteur important d'amélioration de la productivité.

Le gain de production obtenu par la diminution du temps de traitement des messages croît rapidement avec le nombre de stations. Il apparaît donc nécessaire d'analyser les possibilités d'optimiser la réactivité du superviseur et de contraindre temporellement la prise en compte des requêtes et la production des réponses. Une étude de l'ordonnancement des tâches du superviseur devra être menée dans le but de garantir que les temps de réponse n'impactent plus négativement la capacité de production du procédé contrôlé.

Références

- [BAR-98] M. BARAD – *Timed Petri nets as a verification tool* – Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998.
- [BON-99] C. BONNET, I. DEMEURE – Introduction aux systèmes temps réels – Éditions Hermès, 1999.
- [DES-95] A. A. DESROCHERS, R. Y. AL-JAAR – *Applications of Petri nets in manufacturing systems : modelling, control and performance analysis* – IEEE Press, 1995.
- [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.
- [DIC-93] F. DICESARE, G. HARHALAKIS, J. M. PROTH, M. SILVA, F. VERNADAT – *Practise of Petri nets in manufacturing* – Chapman & Hall, 1993.
- [JUA-00] G. JUANOLE, S. ABDELLATIF, L. GALLON – *Nouveaux concepts sur les transitions du modèle RdPTS : Priorités dynamiques et attributs temporels dynamiques* – 1ère Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'2000), p. 976-981, 2000.
- [OGA-87] K. OGATA – *Discrete-time control systems* – Prentice-Hall International Editions, 1987.
- [PRO-94] J. M. PROTH, X. XIE – *Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production* – Masson, 1994.
- [SIL-98] M. SILVA, E. TERUEL, R. VALETTE, H. PINGAUD – *Petri nets and production systems – Lectures on Petri Nets II : Applications*, Lectures Notes in Computer Science 1492, Springer Verlag, p. 85-124, 1998.
- [VEE-94] D. VEERAMANI – *Control of manufacturing systems* – John Wiley & Son Inc., 1994.
- [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.