

Pilotage d'une unité de traitement de surface : couplage entre approches prédictive et réactive

ETIENNE CHOVIÉ, PIERRE CASTAGNA, ROSA ABBOU

IRCCyN – Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes
1, rue de la Noë – BP 92101 – 44321 Nantes CEDEX 03, France

etienne.chove@univ-nantes.fr, pierre.castagna@univ-nantes.fr, rosa.abbou@univ-nantes.fr
<http://www.irccyn.ec-nantes.fr>

Résumé — Cette communication traite de l'amélioration de la productivité d'une ligne de traitement de surface en passant d'un fonctionnement prédictif à un fonctionnement réactif. Après avoir présenté l'installation industrielle à la base de ces travaux et les heuristiques de cette nouvelle approche, nous exposons la démarche de simulation qui a permis de montrer l'intérêt de notre proposition. Les résultats de cette simulation montrent les limites de cette approche purement réactive. Nous proposons ensuite un couplage entre des approches réactive et prédictive.

Mots clés — pilotage réactif, traitement de surface, système contrôlé par le produit, hoist scheduling problem.

I. INTRODUCTION

Le pilotage des lignes de traitement de surface (ou *Hoist Scheduling Problem*) est un problème complexe d'ordonnement à forte contrainte temporelle en raison de l'impossibilité de dépasser des durées maximales d'opération dans les bains de traitement chimiques.

Après avoir présenté une installation de traitement de surface industrielle issue du secteur de l'aéronautique et la problématique associée, nous exposerons différentes approches de résolution du *Hoist Scheduling Problem* (HSP) présentes dans la littérature abondante sur le sujet. Nous proposerons ensuite une méthodologie d'ordonnement réactif piloté par le produit, son application sur le cas industriel et des résultats de grandeur industrielle. Nous terminerons cet article par la proposition d'un couplage entre ordonnancement réactif et ordonnancement prédictif, et les résultats obtenus sur le cas traité. Cette approche combine à la fois l'efficacité de l'approche prédictive en termes de qualité de traitement et la flexibilité qu'offre une approche réactive.

II. DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE DU PILOTAGE D'UNE UNITE DE TRAITEMENT DE SURFACES

A. Description

Le traitement de surfaces est un procédé de fabrication utilisé dans de nombreux secteurs d'activités. Il permet, par immersions successives des pièces dans des bains chimiques, électrolytiques et/ou de rinçage, de modifier les caractéristiques des pièces traitées ou de les couvrir d'une couche spécifique. Ce type de traitement peut intervenir dans le processus de fabrication de produits variés, tels que des circuits imprimés dans l'industrie électronique, des pièces de transmission pour l'automobile, etc.

L'étude présentée dans cet article a été appliquée à un cas industriel du secteur de l'aéronautique. Cet atelier de traitement de surfaces comprend deux lignes parallèles et est composé de (Fig. 1) :

- deux ponts roulants mono-palan affectés chacun à une des deux lignes. De prochains travaux permettront d'étudier l'impact de la cohabitation de plusieurs palans sur une même ligne.
- N cuves ou bains notés B_1, \dots, B_N pouvant contenir une seule barre chacune et permettant de réaliser le traitement souhaité (attaque acide, rinçage, dépôt alcalin, etc.), et répartis sur les deux lignes desservies par les deux ponts roulants. Certaines cuves peuvent être doublées pour réaliser la charge. L'outil de simulation utilisé pour valider les heuristiques proposées ici permet le dédoublement et la répartition dynamique des barres sur plusieurs cuves identiques.
- une navette intermédiaire permettant l'échange entre les deux lignes.
- deux postes d'entrée/sortie situés au bout de chaque ligne.

Un traitement de surface T_i est caractérisé par sa gamme qui est une suite ordonnée de M opérations de trempage. Chaque opération j est caractérisée par :

- Le bain S_{ij} où se fait l'opération.
- La durée minimum D_{ij} du trempage.
- La tolérance Δ_{ij} associée à la durée minimum D_{ij} .

La durée totale du traitement dans un bain doit être inférieure à $D_{ij} + \Delta_{ij}$. On appellera par la suite fenêtre temporelle le couple (D_{ij}, Δ_{ij}) . L'ordre de passage sur les types de bains est fixé par la gamme, sans contrainte de flux unidirectionnel. Autrement dit, le pont roulant pourrait être contraint de faire des allers-retours sur la ligne pour pouvoir effectuer la gamme opératoire du traitement T_i . Les durées de transport ne sont pas négligeables devant les durées de traitement. Ces dernières durées sont très variables, elles peuvent aller de la minute à l'heure. De plus, une durée de traitement peut être très longue alors qu'elle est assortie d'une tolérance très faible. Plusieurs produits sont traités simultanément sur chaque ligne. Les entrées et les sorties peuvent se faire soit du côté Entrée/Sortie 1 soit du côté Entrée/Sortie 2 (Fig. 1).

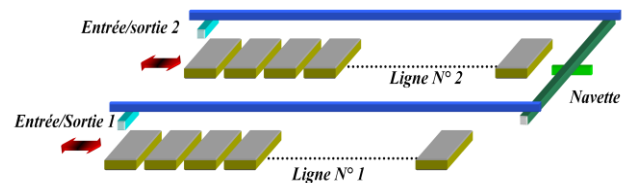


Fig. 1 : Schéma de la ligne de traitement de surface

Par ailleurs, pour le cas de notre application industrielle, on distingue trois types de traitements :

- *Type 1* : correspond à une gamme qui s'effectue exclusivement sur la Ligne 1.

- *Type 2* : correspond à une gamme qui s'effectue exclusivement sur la Ligne 2.
- *Type 12* : correspond à une gamme qui commence certaines opérations sur la Ligne 1, puis, via la navette, termine le traitement sur la Ligne 2.

Dans le cas industriel étudié, les trois types de gammes cohabitent ensemble dans le système (les cas 2 vers 1 n'est pas envisagé).

B. Complexité du système

L'objectif de cette étude est d'améliorer la productivité des deux lignes de traitement de surfaces, tout en garantissant la qualité des traitements réalisés. De plus, il faut que le système de pilotage des ponts roulants soit réactif pour garantir le comportement de chaque ligne en cas d'aléa sur un bain.

Une première source de complexité du système vient de l'ordre quelconque de passage sur les bains. Cela entraîne des situations de conflit pouvant induire des risques de blocage du système.

Une deuxième source de complexité vient des nombreux aléas pouvant se produire, se traduisant par les variations des durées de traitement, et par des arrivées en temps réel de produits à traiter. Enfin, la complexité du problème tient à sa taille : le système comporte une quarantaine de bains. Il traite une centaine de types de produits différents. Chaque produit possède une gamme comportant une moyenne de 20 opérations de traitement.

III. ÉTAT DE L'ART

A. Introduction

De nombreuses études ont été menées pour améliorer le fonctionnement des lignes de traitement de surfaces, et obtenir un meilleur contrôle de la qualité du traitement. Des publications relatives aux problèmes d'ordonnancement rencontrés dans ce type d'ateliers commencèrent alors à paraître dès 1976 [6]. Depuis, diverses études ont été dédiées à cette thématique, et les divers problèmes rencontrés ont été regroupés sous le nom de *Hoist Scheduling Problem* (HSP).

Les approches existantes dans la littérature pour résoudre ces types de problèmes se basent soit sur une approche prédictive, soit sur une approche réactive.

B. Approche prédictive

L'approche nommée *Predictive Hoist Scheduling Problem* privilégie la qualité des traitements au détriment de la productivité. Elle est adaptée aux productions à forte valeur ajoutée. On redéfinit un nouvel ordonnancement prévisionnel dès l'arrivée d'un nouveau produit ou l'apparition d'un aléa.

Il s'agit de déterminer un ordonnancement prévisionnel de l'ensemble des tâches de transport lorsqu'un nouveau produit rentre. Le nouvel ordonnancement doit prendre en compte l'ensemble des produits déjà en cours de traitement et ajouter les nouveaux produits.

La solution recherchée est alors de déterminer la date de début de chacune des tâches de transport pour une séquence donnée en garantissant les durées minimales et maximales des traitements.

Les approches proposées sont des méthodes heuristiques, dont certaines conservent l'ordonnancement partiel déjà calculé ; on se contente d'y insérer au mieux les nouvelles tâches. Tandis que d'autres approches remettent partiellement ou totalement l'ordonnancement déjà effectué, d'où une augmentation significative du nombre de variables à déterminer.

Parmi les méthodes de résolution proposées, on peut citer :

- *Méthode EPET (Earliest Possible Entry Time)* ([13], [14]), dont l'objectif est de déterminer la date d'entrée au plus tôt du nouveau traitement T_i tout en garantissant le respect des bornes des durées spécifiées.
- *Procédure de séparation-recouvrement* [3]. C'est une approche arborescente de type *Branch and Bound* qui remet totalement en cause l'ordonnancement prévu pour les $(i - 1)$ traitements, en faisant rentrer si possible le nouveau traitement T_i .
- *Procédure d'exploration par séparation et évaluation* [4]. C'est une procédure de recherche arborescente dans laquelle il est question de déterminer un ordonnancement prévisionnel avant d'autoriser l'entrée de tout nouveau traitement. Trois critères sont étudiés : le makespan, la date d'introduction du dernier produit traité et la moyenne des dates de fin de trempe des produits.
- *Heuristique de résolution nommée PCP (Precedence Constraints Posting)* [2]. Il s'agit de définir un graphe de contraintes temporelles, dont les nœuds décrivent un ensemble de variables représentant des entités temporelles (date de début ou fin de traitement ; intervalles de traitement).
- *Résolution avec RdP P-temporel* [7] en utilisant de la théorie de l'algèbre (max, +) pour en déduire un ordonnancement réalisable.
- *Ordonnancement dynamique* ([1], [5]), en utilisant une méthode stochastique combinée avec la procédure de *Shifting Bottleneck* modifiée, afin de déterminer un ordonnancement prévisionnel.

C. Approche réactive

L'approche dite *Reactive Hoist Scheduling Problem* privilégie la flexibilité en affectant les opérations de transport au robot d'une manière réactive. Cependant, cette approche n'interdit pas les dépassements des bornes maximales de durée de traitement.

C'est un type de pilotage très flexible et qui réagit facilement à la dynamique d'arrivées des lots en entrée et aux aléas éventuels. Aucun ordonnancement prévisionnel n'est établi, et la gestion des tâches s'établit à l'aide d'algorithmes de listes. Ainsi, les opérations de transport sont affectées au robot par tâche en temps réel et par ordre de priorité. Cependant, ce type de gestion en temps réel provoque souvent le dépassement de la durée maximale de certains traitements.

Les méthodes proposées sont des règles heuristiques issues de l'ensemble des approches existantes (approches d'affectation dynamiques des tâches aux robots). On choisit l'heuristique à utiliser en fonction de différents paramètres liés aux caractéristiques des cuves, aux robots et aux gammes opératoires. Différentes méthodologies de résolution sont proposées dans la littérature. On peut citer :

- *Le développement de Systèmes Experts* [9]. Sans pour autant rechercher une solution optimale, ces systèmes experts se basent sur des règles de décision pour choisir l'heuristique à utiliser en fonction de l'état courant de la ligne.
- *Le développement d'un système d'acquisition de connaissances (Trace Driven Knowledge Acquisition TDKA)* [10], dont l'objectif est de représenter le savoir-faire d'experts humains sous forme de règles heuristiques.
- *Le développement d'un modèle de décision semi-markovien* ([11], [12]). Ce modèle permet de décrire l'ensemble des états possibles du système en utilisant une

matrice de transition pour étudier la perte ou le gain associé à chaque décision prise. Cependant, cette méthode se limite à la résolution de problèmes bien définis et à petite taille.

IV. PROPOSITION D'UN ORDONNANCEMENT DYNAMIQUE

A. Principe

Les approches prédictives du pilotage permettent, en ayant une vue globale du système, d'envisager une optimisation du comportement du système. Malheureusement, d'une part à cause de la difficulté de la prédiction en termes de complexité algorithmique, et d'autre part à cause des nombreux aléas qui remettent en cause les prévisions, ces approches prédictives se révèlent souvent peu efficaces dans la pratique. C'est pourquoi nous proposons une autre approche, basée sur un pilotage réactif du système. Ici, on ne prévoit pas le fonctionnement du système. L'ensemble des actions du système résulte de l'application d'heuristiques qui permettent, en temps réel, les prises de décisions nécessaires au fonctionnement du système. Ce mode de fonctionnement n'a pas la prétention d'optimiser le système mais elle permet une très bonne réaction aux aléas et nous montrons dans notre communication que finalement, elle permet une amélioration de la productivité du système. Cette approche s'inscrit dans le cadre des réflexions menées au sein du projet de recherche exploratoire national SCP (Systèmes Contrôlés par le Produit) du GRD MACS. Notre proposition rejoint le paradigme de « Système contrôlé par le produit » dans le sens où c'est le produit qui, le plus tard possible, provoque les prises de décisions qui le concernent. Il participe aux différents choix en apportant l'ensemble des données qui permettront les prises de décision. Nous présentons dans la suite quelques exemples d'heuristiques utilisées pour prendre ces décisions.

B. Règles de base

Pour des raisons de confidentialité, nous nous limitons à l'énoncé de quelques règles de décision significatives pour comprendre le principe de notre pilotage réactif.

1. Règles concernant les bains de traitement

La première règle décrite permet à un produit se trouvant dans un bain de réserver le bain suivant.

Chaque bain k est caractérisé par une durée d'anticipation A_k .

Règle 1 : Lorsque, à l'étape j du traitement T_i le palan vient de déposer un produit dans le bain S_{ij} on attend pendant la durée W_{ij} telle que :

$$W_{ij} = D_{ij} - A_{S_{ij}}$$

Après cette durée, on essaye de réserver le bain suivant.

On rappelle que D_{ij} correspond à la durée minimum de traitement et que S_{ij} correspond au bain recevant le produit.

A_k permet donc d'anticiper sur la réservation du bain suivant. Augmenter A_k permet d'augmenter la sécurité en limitant le risque de dépassement mais cela conduit à diminuer la productivité en réservant inutilement les bains.

Règle 2 : On a la possibilité de réserver simultanément deux bains devant systématiquement être visités à la suite.

On a souvent, pour les bains critiques ayant une tolérance Δ_{ij} sur la durée faible ou nulle, une opération de rinçage non critique qui suit ce bain critique.

Cette règle permet de réserver simultanément un bain de traitement et le bain de rinçage associé. Cela permet d'éviter d'envoyer un produit en attente sans l'avoir au préalable rincé.

Notons que ceci interdit la présence simultanée de barres dans un bain et son rinçage, ce qui diminue la productivité du système.

Règle 3 : Chaque bain k est caractérisé par un paramètre de sécurité L_k . Un produit tente de réserver le bain suivant pendant la durée E_{ij} telle que :

$$E_{ij} = A_{S_{ij}} + \Delta_{ij} - L_{S_{ij}}$$

S'il réussit sa réservation, le bain suivant étant libre, il cherche à réserver le pont roulant pour son transport. Sinon, il réserve une zone d'attente où il sera transporté en attendant la libération du bain suivant.

Cette règle est importante car elle permet d'éviter les dépassements de durée de traitement, notamment en cas de blocage du système. En effet, une difficulté du fonctionnement dynamique est qu'il peut conduire à des situations de blocage. Prenons, par exemple, trois bains notés A, B et C (Fig. 2) contenant à un instant donné chacun un produit respectivement noté 1, 2 et 3.

Imaginons que le produit 1 est en A et il veut aller en B, le produit 2 est en B et il veut aller en C et le produit 3 est en C et il veut aller en A. Nous sommes dans une situation de blocage. Le système ne peut plus évoluer.

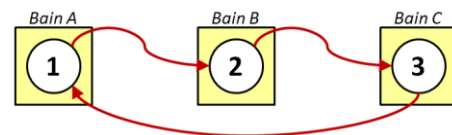


Fig. 2 : Exemple de blocage

On voit que la règle 3 énoncée ci-dessus permet de supprimer ce blocage. En effet, au bout d'une durée donnée, l'un des produits atteignant sa durée maximum de traitement et ne pouvant réserver son bain suivant, sera amené vers une position d'attente. Il va alors libérer le bain qu'il occupe et la situation sera débloquée. La règle 3 est donc fondamentale pour la gestion des blocages. Elle nécessite néanmoins un nombre suffisant d'attentes pour fonctionner correctement.

2. Règles concernant les ponts roulants

Le pont roulant est une ressource critique du système. La règle 4 permet de ne pas libérer ce pont au-dessous d'un bain.

Règle 4 : Chaque bain est caractérisé par un paramètre P_k . Lorsque le pont roulant vient de déposer un produit dans ce bain, si $D_{ij} < P_k$ alors le palan attend la fin du traitement au-dessous du bain. Sinon, il est libéré et peut donc aller faire autre chose.

Chaque bain est caractérisé par un paramètre de criticité. Le système, en cas de conflit, favorisera toujours le bain le plus critique.

Règle 5 : Lors de la réservation des palans, l'ensemble des demandes sont mises en concurrence. Deux cas peuvent se présenter :

- Si le paramètre « Priorité » du bain est égal à 1 (Priorité la plus forte), la demande du pont est prioritaire. Si on a plusieurs bains de priorité « 1 », les demandes sont prises dans l'ordre.
- Si le paramètre « Priorité » est strictement inférieur à 1, le palan est attribué au produit qui minimise la durée R telle que :

$$R = ((D_d + D_{ij}) - T_{now}) * \text{Priorité}$$

D_d correspond à la date de début de traitement et T_{now} à la date actuelle.

Chaque pont r , donc chaque ligne, est caractérisé par M_r qui représente le nombre maximum de produits se trouvant dans la zone d'action de ce pont.

Règle 6 : Si un produit doit rentrer dans la zone d'action du pont r , on vérifie que $N_r < M_r$, N_r étant le nombre de produits se trouvant dans la zone d'action du pont. Si cette condition n'est pas atteinte, on attend qu'un produit sorte de la zone d'action avant de le faire rentrer.

L'application de l'ensemble de ces règles en temps réel permet le fonctionnement de l'installation. Comme dans un système multi-agents, le comportement global du système émerge de l'utilisation de ces règles. Pour évaluer expérimentalement le comportement résultant de ce pilotage réactif, nous avons mis en place un modèle de simulation.

V. EXEMPLE D'UNE IMPLEMENTATION

Le pilotage réactif des unités de production simplifie la prise en comptes des aléas, mais rend difficile la prévision du comportement global de l'unité. Dans le contexte très contraint présenté dans cet article, nous cherchons d'une part à connaître les gains de productivité apportés par l'approche réactive basée sur les heuristiques présentées précédemment et d'autre part à évaluer les risques de dépassement de durée sur des bains critiques, induit par notre approche réactive du pilotage.

La simulation *a priori* de l'unité de production va aussi permettre d'une part de valider l'implantation topologique des cuves et d'autre part de paramétrer au mieux les différentes règles énoncées dans la partie précédente.

Afin de pouvoir facilement réimplanter ou reconfigurer le simulateur, et au vu du caractère répétitif du système physique, il est judicieux d'orienter le développement du simulateur vers des objets modulaires et paramétrables. Les instances de ces objets, tel un système multi-agents, vont coopérer entre elles pour appliquer les règles édictées et faire naître un comportement global. Cette implémentation sera réalisée avec Siman/Arena qui est adapté à la réalisation de bibliothèques d'objets.

A. Bibliothèque de simulation sous Arena

Les pièces entreront dans le simulateur via un objet de lancement et circuleront de point en point. Ces pièces porteront des informations de production telles que leur gamme, le pointeur dans cette gamme, le type de pièce.

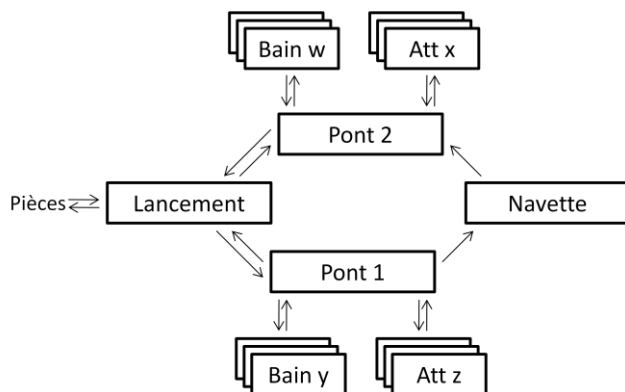


Fig. 3 : Flux de pièces dans le modèle

Le modèle sera alors constitué de 5 types d'objets : le lancement, les bains, les positions d'attente, les ponts et les navettes.

1. Le lancement

L'objet lancement est l'interface entre la ligne et le reste de l'usine. Dans notre cas d'application industrielle il sera à instance unique. C'est lui qui va lire les données de production dans un fichier et lancer les produits dans l'installation.

De plus, l'objet de lancement développé ici permet une répartition de la charge entre deux lignes de traitement lorsque les différentes ressources nécessaires à un traitement sont disponibles dans les deux lignes. Le choix de l'une ou l'autre des lignes dépend de la charge de chacune. Lorsqu'une seule des deux lignes est capable de traiter le produit à lancer, l'objet choisira cette ligne.

2. Les bains

L'objet bain correspond à un emplacement physique d'une cuve de traitement. Ces bains sont paramétrables pour prendre en compte les différents réglages des règles énoncées ci-avant (Durée d'anticipation, Paramètre de sécurité, Priorité, La réservation simultanée du bain suivant avant de pouvoir venir dans celui-ci...).

3. Les attentes

L'objet attente correspond à une position physique de la ligne ne comportant aucun traitement. Ces positions sont les tampons du système assurant le non-blocage, grâce à l'application de la règle 3 énoncée précédemment. Ces positions intermédiaires non référencées dans la gamme sont gérées dynamiquement par le pont et ne sont utilisables que si le processus de traitement le permet, après un bain de rinçage par exemple.

4. Le transfert

Certaines installations de traitement disposant de plusieurs lignes parallèles, il est utile de permettre le passage d'une ligne à l'autre à l'aide d'une navette transversale. Dans notre cas d'étude cette navette est utilisée à sens unique (nous n'étudions pas de gammes de type 21). On verra plus tard que l'utilisation de la navette pénalise la productivité de la ligne et doit être utilisée le moins possible. Il est préférable autant que possible de regrouper les bains d'une même gamme dans une même ligne.

5. Les ponts

Le pont est la machine assurant presque tous les transferts. Il est l'organe stratégique et le seul organe mouvant (mis à part la navette). Il reçoit l'ensemble des demandes de mission des barres traitées dans les bains ou attendant dans des positions d'attente et les ordonne suivant un critère paramétrable (en fonction de la priorité, de l'approche de la fin de la tolérance de traitement, de la criticité des cuves, ... - Règle 5). En cas de demande de dégagement en attente, il attribuera la position d'attente libre la plus proche.

6. Les groupes

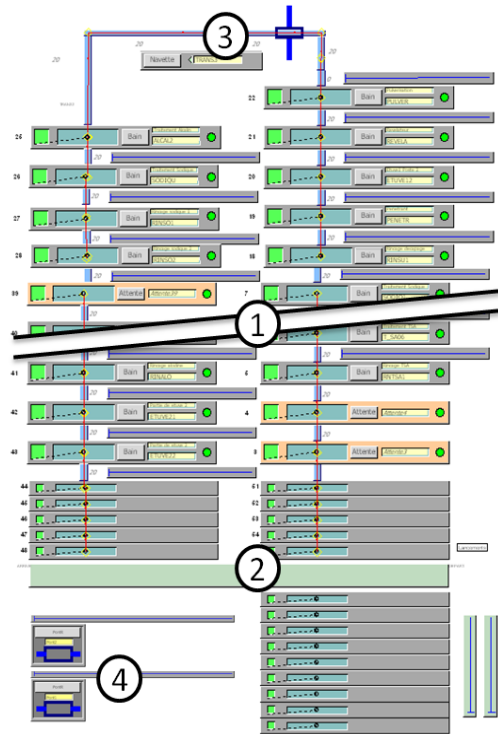
Un groupe n'est pas à proprement parlé une entité physique de la ligne de traitement de surface, mais un objet logique permettant la répartition des pièces sur différents bains de même nature. Le simulateur affecte en temps réel l'un des bains du groupe à la pièce demandeuse en fonction des priorités et des disponibilités.

VI. RESULTATS DU PILOTAGE REACTIF

A. Application industrielle

Cette bibliothèque a été utilisée pour modéliser le cas industriel présenté précédemment (Fig. 4).

Les résultats de l'étude industrielle ne seront pas présentés ici. Pour des raisons de confidentialité, nous exposerons des résultats semblables à ceux obtenus pour l'étude industrielle.



1 : bains, attentes / 2 : lancement / 3 : navette / 4 : logique des ponts
 Fig. 4 : Modèle d'un cas industriel

B. Résultats

1. Indicateurs de performance

On peut classer les résultats en deux catégories, d'une part la conformité des pièces avec leur gamme de fabrication (ce qui n'est pas prévisible a priori dans un système à fenêtres temporelles réactif contrôlé par le produit) ; et les résultats de performances de l'unité (résultats quantitatifs). D'autres critères de performance tel que le pilotage propre de l'unité proposé dans [8] sont envisageables mais ne sont pas abordés ici.

La mesure des dépassements dans les bains critiques (ceux qui modifient les caractéristiques des pièces), est fondamentale quant à la qualité des pièces obtenues. Il n'est en effet pas envisageable de créer un système ne pouvant répondre aux contraintes chimiques et de produire des pièces ne respectant pas leur gamme de fabrication. Ces dépassements ne sont malheureusement pas négligeables dans un système réactif.

Le deuxième indicateur de performance est la quantité des pièces produites par unité de temps. Un autre indicateur quantitatif a été envisagé : le nombre de mission du pont effectué par période de huit heures. Cet indicateur reflète l'utilisation du pont. Cependant dans un système dynamique où le nombre de missions pour traiter un type de pièce est incertain (en raison des dégagements facultatifs vers des positions d'attente en fonction de la disponibilité des bains suivants), cet indicateur ne reflète pas exactement la productivité du système. Une augmentation de la capacité autorisée dans le système augmentera le nombre de mission mais diminuera la productivité de la ligne. Il a donc été choisi comme indicateur global à l'installation le nombre de pièces traités par période de huit heures.

Lors d'une phase d'étude de l'implantation ou de la réimplantation d'une unité de traitement de surface, d'autres indicateurs peuvent être utilisés (taux d'utilisation des cuves, des positions d'attente, du pont...). Ces taux permettent de mieux dimensionner le nombre de cuves de chaque type.

2. L'analyse séquentielle de l'exécution du modèle

Le manque de vision globale d'un système réactif piloté par le produit impose une phase d'étude du comportement global. Pour permettre cette étude, le simulateur génère automatiquement un diagramme de Gantt détaillé de l'utilisation de chaque ressource du système (Fig. 5). Cet outil a permis l'affinement des règles et l'analyse des scénarii de fonctionnement anormaux (blocages, dépassement sur des bains critiques, engorgement dans certains bains...).

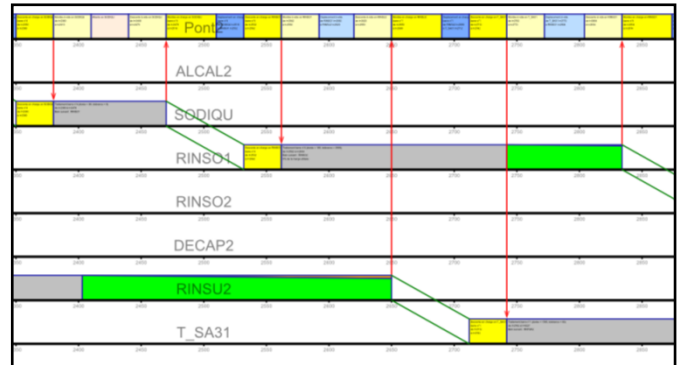


Fig. 5 : Extrait du diagramme de Gantt d'une exécution

C. Exploitation des résultats

Ce modèle de simulation a été étudié avec des gammes et des ordres de fabrication de grandeur industrielle.

La première conclusion à tirer de l'exploitation de ce modèle est la possibilité d'augmenter la charge de la ligne en supprimant toute les limites du nombre de barres acceptées par ligne. En effet, lorsque l'on supprime ces limites, on augmente de 25% la capacité de la ligne. Cependant les opérations étant à fenêtre temporelle, on obtient trop souvent des temps de traitement hors des limites imposées par les traitements chimiques. Il est donc théoriquement possible d'augmenter la capacité de la ligne, mais avec les seules règles énumérées ci-dessus, il est difficile de prendre en compte les fenêtres temporelles. Dans ce cas on a en moyenne 1,5 dépassement par pièce dans un bain critique, et ces dépassements sont de l'ordre de 35% au delà du temps acceptable.

La limitation du nombre de barres par ligne permet de réduire considérablement le nombre de dépassement. Une limitation des 5 barres par ligne permet de passer le nombre de dépassement de 1,5 dépassement/pièce à 0,7 dépassement par pièce. La durée de ces dépassements est aussi réduite à environ 30% du temps limite de traitement. L'ajout de cette contrainte a donc pour effet de se rapprocher des contraintes du problème, diminue la productivité de la ligne. L'ajout de la limite du nombre de barre par ligne fait perdre 20% de productivité (Tab. 1).

	Sans limite	Avec limite
Productivité	1,2	1
Nombre de dépassement critiques par pièce	1,5	0,7
Durée des dépassements / Durée acceptable	35%	30%
Occupation des ponts	80%	60%
Nombre de dégagement en attente	370	210
Utilisation des attentes	45%	30%

Tab. 1 : Comparaison avec/sans limitation de la capacité

Cette première étude a montré que pour augmenter la productivité, nous devons dégrader la qualité des produits. Nous avons donc cherché à proposer un pilotage couplant notre approche réactive à une approche prédictive.

VII. COUPLAGE PREDICTIF / REACTIF

Nous avons mis en évidence dans la partie précédente le problème de l'ordonnancement réactif dans le cas d'une unité de traitement de surface.

Notre proposition de couplage vient de deux constatations importantes. Tout d'abord, la criticité de tous les bains n'est pas identique. Certains bains, comme par exemple les rinçages, autorisent de larges fenêtres de temps alors que d'autres imposent des durées strictes. La deuxième constatation est que les ressources critiques du système sont les ponts roulants. C'est l'indisponibilité du pont en fin d'une opération critique qui provoque le dépassement.

Notre idée consiste donc à adopter un pilotage réactif pour les opérations non critiques et un pilotage prédictif pour les opérations critiques. Nous proposons donc de coupler l'ordonnancement réactif exposé précédemment avec un ordonnancement prédictif pour l'utilisation des ponts sur les opérations critiques.

La principale règle de ce couplage se résume ainsi :

Règle 7 : On n'autorise la mise en traitement critique d'une pièce qu'à la condition d'être sûr de pouvoir la sortir avant la fin de la tolérance de traitement.

Cette règle impose l'ajout sur chaque pont d'un planning prédictif. Ce planning est rempli uniquement avec les plages de sortie des pièces se trouvant dans des bains critiques.

Cette règle s'applique donc lors du choix d'une mission (règle 5). Une mission ne pourra pas être choisie si le prochain bain est considéré comme critique et la plage prévisionnelle de sortie de la barre tombe pendant une période déjà réservée par une mission critique.

Avec cette nouvelle approche, on assure, en régime sans aléa, le non dépassement d'un traitement dans un bain critique. On améliore alors la qualité des pièces produites en respectant les fenêtres temporelles de la gamme de fabrication.

La gestion des aléas de production se fait de manière dynamique : si au moment d'entrer dans une plage réservée, le pont ne reçoit pas de demande de pièces concernées, il abandonne ladite réservation et devient disponible pour une mission non prioritaire. La mission incriminée est alors classée comme non effectuée et passe au rang des missions non planifiées, donc non prioritaire. Cette gestion assure la plus grande souplesse et réactivité du système en cas de problème, prenant ainsi en compte les aléas pouvant perturber l'exécution du planning des opérations critiques.

	Avec limite Sans prévision	Avec limite Avec prévision
Productivité	1	0.8
Nombre de dépassement critiques par pièce	0,7	0
Durée des dépassements / Durée acceptable	30%	-
Occupation des ponts	60%	55%
Nombre de dégageant en attente	210	220
Utilisation des attentes	30%	35%

Tab. 2 : Comparaison avec/sans prévision sur les bains critiques

Dans l'ajout du couplage prédictif/réactif, on observe une diminution de la productivité de l'installation, mais un respect total des contraintes de fabrication (Tab. 2).

VIII. CONCLUSION

La particularité importante de notre approche est le couplage prédictif/réactif. Lorsque les contraintes de fenêtres

temporelles sont faibles, il vaut mieux adopter un pilotage réactif, garantissant une meilleure productivité et une meilleure réaction aux aléas. Lorsque les contraintes temporelles sont strictes, l'ordonnancement des tâches permet de garantir la qualité des produits. La suite de ce travail se fait dans trois directions. La première consistera en une implémentation de ce pilotage dans une unité réelle de production. La seconde consiste à améliorer la réaction aux pannes de la couche prédictive, pour continuer à garantir la meilleure qualité possible des produits. La troisième piste vise à utiliser notre modèle de simulation dans une plateforme d'aide à la décision pour le pilotage d'installations de traitement de surfaces.

IX. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bloch C., Contribution à l'ordonnancement dynamique de lignes de traitement de surface, *Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle, Laboratoire d'Automatique de Besançon, Université de Franche-Comté*, 1999.
- [2] Cheng C.-C., Smith S.F., A constraint-posting framework for scheduling under complex constraints. *Proceeding of ETFA'95*, 1995, tome1, pp 268-280.
- [3] Ge Y., Yih Y., Crane scheduling with time windows in circuit board production lines. *International Journal of Production Research*, 1995, vol.33, n°5, pp 1187-1189.
- [4] Lamothe J., Une approche pour l'ordonnancement dynamique d'un atelier de traitement de surface. *Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace*, 1996.
- [5] Manier M.A., Bloch C., A classification for Hoist Scheduling Problems. *International Journal of flexible manufacturing Systems*, 2003.
- [6] Phillips L.W., Unger P.S., Mathematical Programming solution of a Hoist Scheduling Program; *AIIE Transactions*, 1976, vol.8, n°2, pp 219-225.
- [7] Spacek P., Modélisation, analyse et commande des systèmes à événements discrets par l'algèbre des dioïdes. Application aux lignes de galvanoplastie. *Thèse de Doctorat de l'Université de Franche-Comté en automatique et Informatique*, 1998.
- [8] Subaï C., Baptiste P., Niel E., « Scheduling issues for environmentally responsible manufacturing: The case of hoist scheduling in an electroplating line », *International Journal of Production Economics*, Vol. 99 n°1-2, 2006, pp 74-87.
- [9] Sun T.C., Lai K.K., Lam K., So K.P.; « A study of heuristics for bidirectional multi-hoist production scheduling systems », *International Journal of Production Economics*, 1994, vol.33, pp 207-214.
- [10] Yih Y., Trace-driven knowledge acquisition (TDKA) for rule-based real time scheduling system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1990, vol. 1, pp 217-230.
- [11] Yih Y., Thesen A., semi-markov decision models for real time scheduling. *International Journal of Production Research*, 1991, vol.29, n°2, pp 26-33.
- [12] Yih Y., Chiu C., Incremental learning for hoist scheduling problems in circuit board production lines. *Manufacturing Aspects in Electronics Packaging ASME*, 1993, vol.65, pp 119-124.
- [13] Yih Y., An algorithm for hoist scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 1994, vol.32, n°3, pp 501-516.
- [14] Yin N.C., Yih Y., Crane scheduling in a flexible electroplating line: a tolerance based approach. *Journal of Electronics Manufacturing*, 1992, vol.2, pp 137-144.