



**HAL**  
open science

## Pilotage adaptatif par contraintes des systèmes de production linéaires à haute cadence

Damien Trentesaux, Philippe Pesin, Christian Tahon

### ► To cite this version:

Damien Trentesaux, Philippe Pesin, Christian Tahon. Pilotage adaptatif par contraintes des systèmes de production linéaires à haute cadence. 2ème conférence MSR (modélisation des systèmes réactifs), 1999, Cachan, France. hal-03088748

**HAL Id: hal-03088748**

**<https://hal.science/hal-03088748>**

Submitted on 27 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Pilotage adaptatif par contraintes des systèmes de production linéaires à haute cadence

**Damien Trentesaux — Philippe Pesin — Christian Tahon**

*Equipe Génie Industriel et Logiciel,  
Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines,  
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,  
Le mont Houy, BP 311,  
59304 Valenciennes cedex, France.  
Damien.Trentesaux@univ-valenciennes.fr*

---

*RESUME. Cet article propose une approche de pilotage dédiée aux systèmes de production linéaire à haute cadence tels que ceux fréquemment rencontrés dans le milieu de l'industrie alimentaire (conditionnement). Après avoir mis en évidence la problématique de ces systèmes, nous montrons que les approches automatiques classiques sont trop réductrices principalement en raison de la multiplicité des modes de marche, des non-linéarités et de la diversité des produits véhiculés. Nous présentons une approche de pilotage basée sur l'optimisation par contraintes et sur le concept d'adaptation événementielle. Elle permet de définir une méthode de pilotage optimisée. Nous illustrons nos propos sur un tronçon d'une chaîne de conditionnement. L'objectif final est de proposer une méthode de conception, d'aide au dimensionnement et à l'exploitation de tels systèmes de production.*

*ABSTRACT. This article proposes an approach for the activity control of high-speed and linear production systems such as farm-produce industry (packaging). After having pointed out the complex issues of activity control of such systems, we show that classical approaches for production control are too restrictive mainly because of the multiplicity of functional modes, non linearity and the diversity of products. We present an activity control approach based on constraint optimisation and on the « event-based adaptability » concept, which allows us to define an optimised activity control. We illustrate our proposal with the final part of a packaging line. The global aim is to provide a new method dedicated to the help for designing and managing such production systems.*

*MOTS-CLES : pilotage, adaptativité, contrainte, événement, production linéaire haute cadence.*

*KEYWORDS : activity control, adaptability, constraint, event, high-speed linear production system.*

---

## **1. Système de production linéaire à haute cadence**

Les systèmes de production considérés dans cet article sont caractérisés par la mise en série (plus rarement en parallèle) d'une part, de ressources de production à cadences continues ou discontinues apportant de la valeur ajoutée au produit (adjonction de matière, modification de l'aspect du produit, contrôle, assemblage, encartonnage, etc.) et d'autre part, de ressources assurant le déplacement des produits semi-finis ou finis (avec, dans le cas de ressources redondantes, la possibilité de définir des aiguillages). Dans cet article, nous supposons que les ressources assurant le déplacement des produits sont des convoyeurs dont les vitesses peuvent être réglées de manière continue.

Le fonctionnement en haute cadence se définit par rapport au flux de sortie qui se mesure en fraction de seconde par produit. Ceci différencie les systèmes étudiés avec d'autres types de production linéaire à convoyage tels que les lignes de montage automobile.

## **2. Pilotage réactif d'un système de production linéaire à haute cadence**

La fonction de pilotage est définie comme le niveau décisionnel associé à la gestion réactive d'un système. Dans cet article, la réactivité se traduit par la possibilité d'une poursuite d'un objectif et de régulation en cas d'aléas. L'intégration d'une telle fonction se justifie par :

- les contraintes de modes de marche et d'arrêt des ressources de convoyage ou de production : le pilotage assure le respect de ces modes de marche et d'arrêt,

- les cadences de fonctionnement discontinues de certaines ressources de production qui ne peuvent généralement pas être synchronisées : ceci mène systématiquement, en cas d'absence de pilotage, à l'accumulation complète ou à un convoyage à vide qui ne sont généralement pas compatibles avec les contraintes de mode de marche,

- la présence de micro-pannes (produit renversé, conteneur bloqué sur un convoyeur, etc.) qui surviennent régulièrement (plusieurs fois par jour et par machine) et sont caractérisées par une durée de l'ordre de quelques secondes à une minute. Le cas des macro-pannes (durée supérieure à une minute : panne ressource, etc.) conduit systématiquement à l'arrêt complet du système et implique une ré-initialisation complète de celui-ci. Il n'est donc pas cohérent de proposer une régulation face à ces macro-pannes qui ne peuvent pas être gérées de manière automatique par le pilotage. Seules les micro-pannes seront donc considérées.

En fonctionnement normal, l'objectif du pilotage se traduit donc par un compromis entre la minimisation des variations des cadences machines (afin d'éviter notamment un vieillissement prématuré des ressources de production) et la maximisation des flux de produit en sortie (la rentabilité d'un système de production à haute cadence est fortement conditionnée par ce critère) [TCH 94]. En cas de fonctionnement dégradé,

cet objectif est modifié de telle sorte qu'on puisse conserver le plus longtemps possible les machines en fonctionnement (cadence réduite, etc.) pour éviter un arrêt complet de la chaîne, ce qui impliquerait vidange et ré-initialisation des ressources de production. D'autres objectifs de production peuvent être définis de manière secondaire (niveau d'accumulation souhaitable, etc.). Dans tous les cas, ces objectifs sont soumis aux contraintes de mode de marche des ressources (accumulation suffisante, etc.). Le pilotage est élaboré à partir des informations de capteurs (variables d'état) tels que des capteurs d'accumulation ou de passage alors que les variables d'actions sont principalement les vitesses des convoyeurs fixées de manière continue et accessoirement les cadences machines.

Une analyse de l'état de l'art montre en fait que les systèmes actuels de pilotage des systèmes de production linéaires à haute cadence sont souvent peu performants [TRE 95] :

— en terme de poursuite : de nombreux systèmes linéaires à haute cadence sont caractérisés par des phénomènes de "pompage" (variations d'amplitude non négligeables et périodiques des quantités de produit sur les convoyeurs) [DEM 94]. Ces phénomènes se traduisent au niveau du système de production par un fonctionnement irrégulier, voire oscillant,

— en terme de régulation : l'occurrence d'une micro-panne conduit régulièrement à l'arrêt rapide et systématique de la chaîne alors que cette micro-panne pouvait être masquée en exploitant les quantités restantes sur les différents convoyeurs en aval de la panne (prise en compte de la modification des objectifs).

La cause des faibles performances des systèmes de pilotage actuels provient de la complexité sous-jacente :

— à la compréhension du comportement du système de production : par exemple, on constate que les cadences de la plupart des ressources de production ne peuvent être synchronisées. En outre, les vitesses fortement variables des convoyeurs et la présence d'accumulations systématiques induit un retard lui aussi fortement variable. On constate enfin une diversité de nature des produits véhiculés : produits vides, produits pleins, lots, palettes de lots vides, palettes de lots pleines, qui, ajoutée à la perception réduite des charges réelles et celle des états des capteurs, vient accroître cette complexité.

— aux objectifs de production : ils doivent être dynamiques (adaptés au contexte) et s'expriment parfois de manière non linéaire (i.e., gain non constant), et souvent à croissance non monotone (par exemple, si il est souhaitable de piloter un convoyeur autour d'un niveau d'accumulation moyen, l'objectif se décrit alors par une fonction valeur absolue qui inverse sa monotonie en 0).

La complexité de l'ensemble a poussé les responsables de production à établir des paramétrages et des lois de commandes basés sur des règles empiriques très simples (pallier de vitesse, etc.) ou sur l'expérience. Ils sont de ce fait peu formalisés, ce qui conduit ainsi à l'absence d'évaluation de ces règles, donc à l'absence d'action efficace visant à améliorer la productivité. Par conséquent, le système de production est constamment en état transitoire : les ressources sont soit en état d'accumulation, soit non alimentées ou convergent constamment vers l'un de ces deux états. Il est ainsi

courant de constater qu'une ligne de production linéaire à haute cadence fonctionne à un faible pourcentage de sa cadence nominale [DEM 94].

Un gain sur la cadence du système de production est ainsi envisageable à condition de mettre en œuvre un pilotage rigoureux : évaluation a priori et a posteriori des impacts des décisions et des paramétrages en vue de leur optimisation, intégration des objectifs de production et des contraintes de mode de marche, analyse de rentabilité de l'investissement pour un système de pilotage, etc. En outre, l'opérateur, par sa capacité à reconnaître les tendances ou à anticiper une série d'événements devrait être intégré au processus de pilotage, ce qui n'est actuellement pas le cas.

### **3. Approche de résolution par contraintes**

L'analyse précédente a conduit à proposer une approche de pilotage où la résolution du problème se fait par propagation et optimisation de contraintes [DIN 88]. Cette approche a déjà été largement exploitée en gestion de production, majoritairement en planification et en ordonnancement, voir par exemple [ERS 93], [ESQ 95] et [PAR 92]. Appliquée au niveau du pilotage, elle présente de nombreux avantages :

— Elle ne requiert pas la définition d'un modèle du système de production qui, par sa nature restrictive, nuit à la qualité de la vérification des concepts proposés. Par conséquent, cette approche propose un niveau de robustesse naturel face aux éventuelles pannes du système de production,

— Elle contribue à prouver l'optimalité pour un horizon temporel donné d'une décision de pilotage (variable d'action) en proposant les outils classiques issus de la recherche opérationnelle tels que la programmation linéaire ou l'optimisation min-max sur des domaines finis,

— Elle intègre la notion de récursivité qui peut être avantageusement exploitée pour définir des contraintes et des objectifs non linéaires ainsi que pour coupler les domaines discrets et continus notamment par l'énumération sur les domaines discrets puis par l'activation des algorithmes continus (programmation linéaire),

La condition préalable est de pouvoir effectivement définir l'ensemble des contraintes. Or, [AUD 95] a montré que les contraintes de modes de marche et d'arrêt des systèmes de production considérés sont très diverses mais relativement aisées à définir, ce qui nous permet d'envisager effectivement une approche de pilotage par contraintes. Cependant, il faut prendre en compte deux problèmes spécifiques à une telle approche :

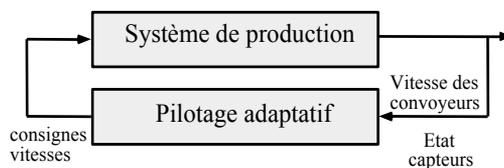
— tout d'abord, il n'existe peut être pas de solution au problème posé par le pilotage sous forme de contraintes, surtout en cas de fonctionnement dégradé,

— ensuite, les solutions optimales portant sur les variables d'action, bien qu'élaborées à partir d'un modèle continu, se situent au niveau des sommets d'un polygone de contraintes (cf., la programmation linéaire), ce qui nuit par exemple à un éventuel objectif de minimisation des amplitudes de variations des cadences des machines.

Pour résoudre cette problématique, nous proposons de compléter l'approche par les contraintes par l'extension du concept de filtre événementiel proposé dans [PES 97]. Ce concept nous permettra de définir l'adaptativité du système de pilotage proposé.

#### 4. Proposition d'un pilotage adaptatif par les contraintes

Le système de pilotage détermine les consignes de vitesses et cadences en fonction des informations issues des capteurs de cadence/vitesse et d'occupation des convoyeurs (fig. 1).



**Figure 1.** *Intégration du pilotage adaptatif*

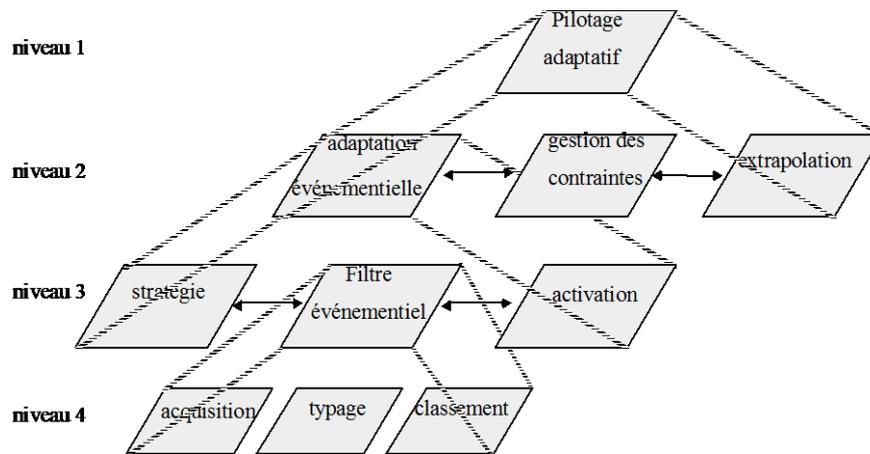
Il est défini par trois modules fonctionnels :

- un module fonctionnel d'adaptation événementielle détaillé ci-dessous,
- un module fonctionnel de gestion des contraintes dont le rôle est de propager celles-ci tout en optimisant les variables d'action sur leurs domaines respectifs,
- un module fonctionnel d'extrapolation qui permet de caractériser les états actuels et futurs des ressources (notamment les charges convoyées) à partir de différents paramètres considérés et notamment les états des capteurs.

Nous nous intéressons dans la suite de cet article au concept d'adaptation événementielle basé sur le concept de filtre événementiel défini dans [PES 97]. Nous proposons une décomposition fonctionnelle du pilotage selon une approche modulaire en quatre niveaux comportant notamment le module d'adaptation événementielle. La hiérarchisation de la fonction de pilotage adaptatif est illustrée sur la figure 2. Chaque module fonctionnel présenté sur cette figure est formalisé en extended SADT.

L'adaptation événementielle est définie comme étant l'union de la fonction de filtre événementiel, de la fonction d'activation et de la fonction stratégie. Le filtre événementiel se fonde sur trois fonctions de base qui sont l'acquisition (détection des événements provenant du système à contrôler et instanciation des attributs constants pour un type d'événement donné), le typage (instanciation des attributs non constants dès qu'un événement apparaît) et le classement (mise à jour de la liste des événements classés par priorité de traitement par insertion de l'événement dans cette liste en fonction de ses caractéristiques). Cinq critères sont alors utilisés pour établir une typologie ordonnée des événements par priorité de traitement dès qu'ils sont détectés grâce à l'association de caractéristiques prédéfinies : la compatibilité ou non avec les objectifs, la criticité de l'événement dans le cas où il serait contraire aux objectifs, la précedence ou la simultanéité avec les situations, la date d'apparition de l'événement, le fait qu'il existe une réponse programmée ou non à l'événement, et enfin, la localisation.

La fonction d'activation se base sur les événements classés par le filtre pour activer le pilotage. La fonction stratégie traduit en paramètres et contraintes dynamiques les objectifs à plus long terme en addition à un ensemble de contraintes statiques de fonctionnement normal.

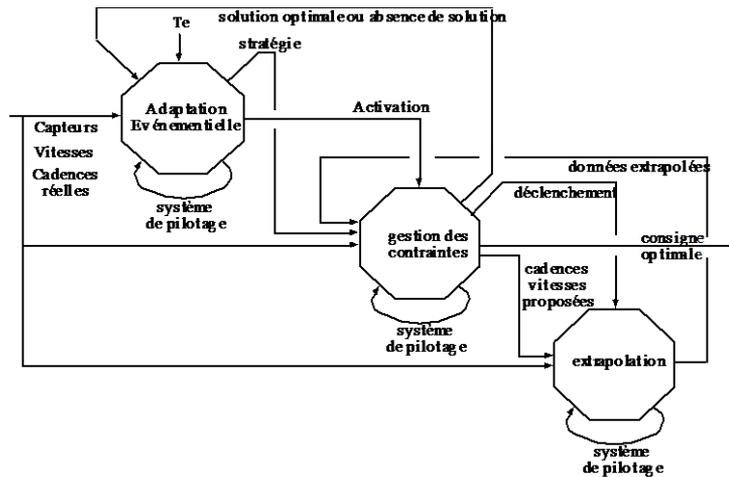


**Figure 2.** Décomposition fonctionnelle du pilotage par niveau et module

Le module fonctionnel de stratégie permet de réduire ou d'accroître l'espace de recherche au niveau de l'optimisation des variables d'action jusqu'à obtention d'une solution satisfaisante. La seule condition est de définir un fonctionnement normal par un ensemble de contraintes statiques qui a la particularité de présenter systématiquement une solution (ce qui est logiquement le cas, sinon il ne serait pas possible de piloter le système). Les contraintes stratégiques permettent d'introduire des connaissances supplémentaires sur le système au niveau de l'optimisation sur un horizon plus long (synchronisation des flux, limitations des variations de cadences, etc.). Afin de garantir l'existence d'au moins une solution au problème posé par les contraintes stratégiques, une procédure de relâchement de contraintes stratégiques doit être définie : la fonction stratégie est réactivé en cas d'absence de solution relevée par la fonction propagation et peut se référer à la dernière activation du module de définition de contraintes stratégiques présentant une solution. L'ensemble de ces points est illustré sur le diagramme extended SADT présenté sur la fig. 3. Le lecteur pourra vérifier que l'adaptation événementielle réalise l'interface qui permet d'évoluer d'une activation périodique (activation à la période  $T_e$ ) vers une activation de nature événementielle.

En fonctionnement normal, l'ensemble des contraintes statiques de fonctionnement garantit l'existence d'au moins une solution. Si malgré cela, et après relâchement de l'ensemble des contraintes stratégiques, aucune solution de base n'a pu être trouvée, on active le mode de fonctionnement dégradé et l'opérateur est prévenu. Une procédure d'arrêt d'urgence est alors proposé. L'opérateur, ayant une connaissance plus précise de l'état du système décide ou non d'arrêter le système. Dans le cas où le système n'est

pas arrêté, aucune modification d'état n'est réalisée jusqu'à la prochaine activation de pilotage par le filtre.



**Figure 3.** Diagramme extended SADT du niveau 2

L'intégration globale de ces concepts nous permet de définir un pilotage adaptatif. Cette adaptation est à la fois spatiale (prise en compte de connaissance sur l'environnement en temps-réel) et à la fois temporelle (horizon décisionnel élargi).

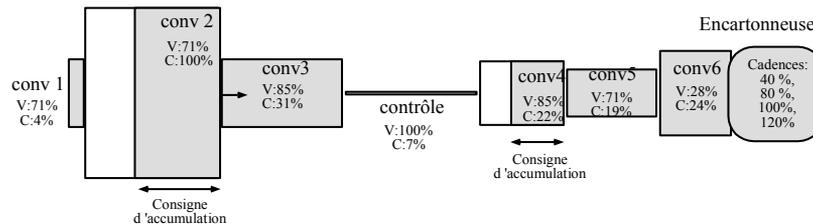
## 5. Validation

Nous proposons d'élaborer la validation par simulation d'un modèle décrit selon un langage général de programmation. Ce choix est justifié par le besoin de pouvoir prendre en compte le haut degré de précision requis (diversité des produits véhiculés, prise en compte des non-linéarités, des modes de marche, des capteurs, etc.). La décomposition doit donc être élaborée jusqu'au niveau le plus bas (produit) tout en garantissant une simulation en temps-réel.

Nous illustrons nos propos à partir d'un tronçon final d'une chaîne de conditionnement d'une société de conditionnement. Les données étant confidentielles (cadences, capacités des convoyeurs), les résultats sont donnés de manière relative (dimension des convoyeurs, capacité, vitesses et cadences maximales). La figure suivante schématise le système (fig. 4). Les proportions de surface ont été conservées pour donner une idée du comportement du tronçon. Sont indiquées les capacités des convoyeurs relativement à la capacité maximale (convoyeur 2) et les vitesses relativement à la vitesse maximale (contrôle visuel).

Le contrôle de niveau s'effectue sur un convoyeur où les produits sont véhiculés sous une cellule à rayonnement. La seule machine du tronçon étudié est l'encartonneuse qui forme des pack de 24 canettes emballées sous film plastique. Sa cadence est

discontinue et varie entre 40 et 120% de sa cadence nominale. Outre les objectifs principaux, un objectif secondaire a été défini : il stipule que le convoyeur 2 est considéré comme un convoyeur de stockage intermédiaire (qui ne doit donc jamais être ni vide ni plein) et qui doit avoir une consigne de niveau d'accumulation donnée.



**Figure 4.** Synoptique du tronçon final de la chaîne étudiée

Les contraintes spécifiques de mode de marche et d'arrêt portent uniquement sur le contrôle et l'encartonneuse. Elles sont les suivantes :

- le contrôle se fait de manière automatique et doit être effectué sur des produits non joints, distants d'une longueur prédéterminée,
- sous peine d'arrêt complet de la chaîne (vidange), un produit ne doit jamais rester plus d'une certaine durée sous le rayonnement du contrôleur de niveau,
- l'encartonneuse fonctionne uniquement si le convoyeur 6 présente un niveau d'accumulation suffisant (la pression des produits doit être suffisante pour permettre l'insertion automatique des produits dans cette ressource).

Une analyse des flux de sortie de chaque ressource permet d'identifier la ressource goulet qui est le convoyeur du contrôle de niveau (il sera donc intéressant de vérifier que son taux de charge est constamment maximal). La comparaison de ce flux théorique avec le flux observé en sortie de l'encartonneuse nous permettra d'évaluer l'impact du pilotage en terme de rendement.

Le modèle de convoyeur utilisé pour la simulation est le suivant :

Tout convoyeur possède trois attributs de base : deux attributs statiques qui sont sa longueur  $L$  et sa largeur  $l$  et un attribut dynamique, sa vitesse  $V$ . A partir de ceux ci, l'on peut déduire la capacité moyenne d'accueil  $C$  du convoyeur (en unité de produit),

la densité moyenne  $D = \frac{C}{L \cdot l}$  (en produits par unité de surface) et le flux moyen

admissible en sortie ou en entrée  $\phi = \frac{C \cdot V}{L}$  (en produit par unité de temps).

Un convoyeur  $X$  est défini comme une union de trois ensembles : l'ensemble  $\Psi$  des trois caractéristiques de bases, l'ensemble des trois caractéristiques déduites  $\Omega$  et l'ensemble  $\Gamma$  de caractéristiques de fonctionnement :

$$\Gamma = (\nu) \cup \left( \theta = \bigcup_{i \in [0, \nu-1]} \{d, f, c\} \right)$$
 où  $\nu$  est une donnée de base (toutes les autres sont calculées) et représente le nombre de tronçons composant le convoyeur (constante) et

$\theta$  est un vecteur de dimension  $\nu$  qui mémorise la quantité de produit sur chaque tronçon  $i$  défini par une position initiale  $d(i)$ , une position finale  $f(i)$  et une quantité de produit  $c(i)$ .

Les tronçons sont de ce fait à localisation variable sur le convoyeur. Un décalage s'effectue dès que les tronçons ont parcourus une certaine distance (re-indexation vers la gauche). Afin de gérer les cas où la vitesse ne provoque pas de déplacement multiple de la longueur d'un tronçon, l'on associe en plus au convoyeur deux tronçons à taille variable. Ces tronçons sont les tronçons les plus à gauche et à droite, les autres ont une taille constante. A chaque période d'échantillonnage, les positions initiales et finales sont calculées en fonction de la vitesse et les différents tronçons sont mis à jour. La position initiale du premier tronçon est toujours nulle, la position finale du dernier tronçon est toujours égale à la longueur du tronçon. Dans le cas où la position du deuxième tronçon (le premier à dimension constante) est supérieure à la taille constante des tronçons non extrêmes, une re-indexation a lieu pour re-affecter à tout tronçon amont la quantité de produit du tronçon aval. Dans le cas où la vitesse ne permet pas d'évoluer selon un multiple de cet écart constant, le premier et le dernier tronçon forment en fait un tronçon entier tronqué en deux parties en proportion de  $n$  et  $1-n$  de cet écart. Les quantités de ces tronçons extrêmes sont évaluées proportionnellement à la densité par tronçon d'épaisseur constante.

L'avantage de cette approche de modélisation par rapport à une approche classique par tronçons fixes est de minimiser la perte d'information sur la distance réelle parcourue par les produits. Un nombre faible de tronçon (en moyenne 20) suffit à simuler de manière très réelle l'évolution des charges des convoyeurs et l'accumulation des produits. Ce modèle nous permet en outre de définir une fonction de transfert discrète entre la consigne fixée par le pilotage  $u(t)$  et la vitesse de rotation du moteur entraînant un convoyeur  $\omega(t)$ , et ce, à partir du modèle d'un moteur à courant continu où la constante de temps électrique est négligée:

$$\frac{\Omega(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{1-z_0}{K} \cdot \frac{z^{-1}}{1-z_0 \cdot z^{-1}}, \tau = \frac{R \cdot J}{K^2}, z_0 = e^{-T_e/\tau}$$

Ceci conduit à une équation de récurrence où  $K$  (constante reliant le couple à l'intensité de l'induit) et  $J$  (inertie) sont variables et calculés à chaque instant d'échantillonnage. Cette fonction de transfert nous permet ainsi de prendre en compte de manière très réaliste l'évolution de la charge et la dynamique de réponse du convoyeur, en adéquation avec la problématique exposée dans la seconde partie.

L'encartonneuse est constituée de deux convoyeurs d'entrée et de sortie ainsi que d'un module ayant pour fonction d'enlever une certaine quantité de produit en amont et de déposer en aval un pack emballé à la cadence de consigne fixée à chaque instant  $t$ .

En terme de contraintes, le cahier des charge présenté se traduit de la manière suivante :

- un différentiel de vitesse constant entre le contrôle et le convoyeur 3 :  $V_{\text{contrôle}}(kT_e) = V_3(kT_e) + \delta$ ,
- une vitesse minimale pour le contrôle :  $V_{\text{contrôle}}(kT_e) \geq V_m$ ,
- une consigne de niveau d'accumulation sur le convoyeur 4 pour garantir (avec un intervalle de confiance) qu'un produit contrôlé ne pourra s'accumuler sous le

rayonnement, ce qui impliquerait le lancement d'une procédure de mise au rebut de la totalité des produits convoyés,

— un mode de marche spécifique de marche pour l'encartonneuse dont la cadence ne pourra être initialisée à une valeur non nulle que si le convoyeur 6 présente un certain niveau d'accumulation.

D'autre part, les convoyeurs sont soumis à la contrainte suivante :

— la variation de consigne ne doit pas dépasser un certain seuil afin d'éviter une brusque variation de vitesse qui mène au renversement de produit :  $|V_i((k+1)T_e) - V_i(kT_e)| \leq V_e$ ,

Selon le cas, il est envisageable de poser une contrainte supplémentaire sur le différentiel maximum de vitesse entre deux convoyeurs consécutifs pour éviter une accélération/décélération brusque du produit qui mène à une perte de produit :  $|V_{i+1}(kT_e) - V_i(kT_e)| \leq V_s$ . Cependant, cette problématique étant généralement résolue au niveau technologique, il est inutile de la formuler au niveau du pilotage.

La simulation du système physique et la fonction d'adaptation (niveau 2) ont été réalisées en langage C sur PC Pentium à partir du modèle présenté. La simulation est en temps réel (la période d'échantillonnage du simulateur de la chaîne est de 0,1 seconde). Le comportement de chaque convoyeur est simulé selon une fonction de transfert  $\frac{\Omega(z^{-1})}{U(z^{-1})}$ . La fonction propagation et la fonction extrapolation (niveau 2) ont été développées avec le langage de programmation par contraintes Chip [AGG 93].

Le principe d'adaptation événementielle n'est illustré qu'au travers de la gestion de l'accumulation du convoyeur 2. La définition du passage de mode de fonctionnement normal au fonctionnement dégradé (et inversement) se fait par l'étude de l'état logique d'un capteur situé à l'entrée de ce convoyeur indiquant que le niveau d'accumulation est devenu trop important (par exemple, en raison d'une panne d'une ressource en aval). En fonctionnement normal, la fonction d'adaptation contraint la vitesse du convoyeur 1 par rapport au flux maximum du contrôle (goulet). Cette contrainte n'est pas instantanée : elle est en fait introduite graduellement avec le temps. Elle est aussi relâchée graduellement (mais plus rapidement pour des raisons évidentes) en cas de fonctionnement dégradé.

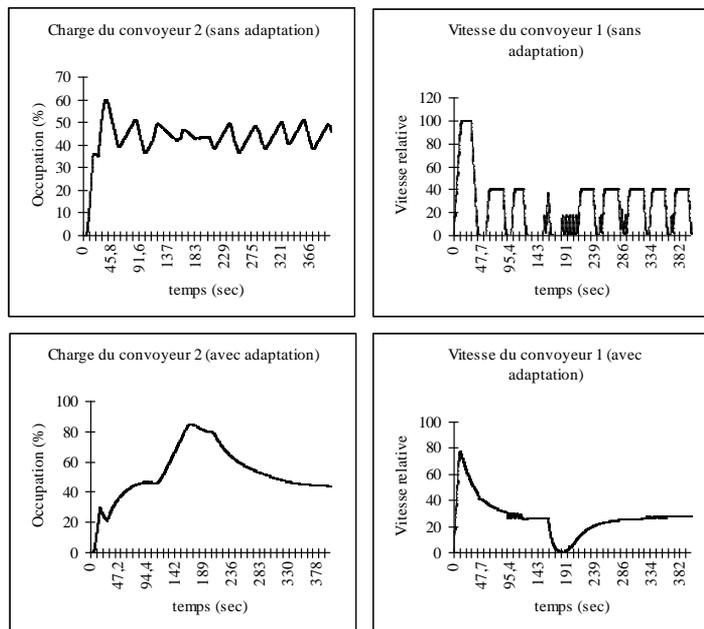
La panne simulée (baisse de vitesse) intervient sur le convoyeur 3. Sa durée est assez importante (100 secondes à partir de la date 100) comparée aux temps moyen des micro-pannes considérées afin de mettre en évidence l'impact de ce dysfonctionnement. Les comportements les plus significatifs sont ceux de la charge du convoyeur 2 et de la vitesse du convoyeur 1. Ces résultats sont donnés sur la figure 5 (la vitesse relative correspond au pourcentage de la vitesse maximale admissible par le convoyeur).

L'analyse des flux maxima du goulet nous a permis d'élaborer la table 1.

Les flux moyens sont calculés entre le moment où le premier pack et le dernier pack sont formés alors que les flux instantanés sont calculés uniquement sur les 5 derniers packs formés en fin de la simulation (date 450). Cette table est établie avec ou sans la panne présentée auparavant.

Flux de sortie encartonneuse				
	Avec Adaptation		Sans Adaptation	
	Moyen	Instantané	Moyen	Instantané
Avec panne	75,3%	94,1%	74,3%	94,1%
Sans panne	89,7%	94,1%	89,7%	94,1%

**Table 1.** Flux de sortie moyen et instantané en pourcentage du flux maximum.



**Figure 5.** Evolution de la charge du convoyeur 2 et de la vitesse du convoyeur 1

## 6. Interprétation des résultats

Dans le cas sans adaptation, la charge du convoyeur 2 oscille entre deux valeurs moyennes qui sont en fait les valeurs correspondant aux positions des deux capteurs qui sont positionnés de part et d'autre du seuil désiré pour l'accumulation. En outre, l'évolution de la vitesse du convoyeur 1 illustre bien le fait que l'optimisation se traduit par évolution discrète des variables sur les différents sommets du polygone des contraintes (d'où l'évolution entre 0 et 40,7% de la vitesse maximale). De ce fait, ce phénomène de pompage (que nous retrouvons dans la réalité) ne pourra être réduit sans introduire une connaissance supplémentaire sur le système via la fonction d'adaptation événementielle. Cette connaissance est en fait le flux maximum admissible en sortie du convoyeur goulet. A partir de ce flux et des caractéristiques du convoyeur 1, il est possible de contraindre ce dernier pour évoluer à la vitesse qui produit un équilibre

du flux, ce qui est représenté sur la fig. 5 où l'on constate que cette valeur est de l'ordre de 28% de la vitesse maximale du convoyeur 1. Cette valeur a été estimée à partir de la relation suivante :

$$\phi_1 = \phi_{\text{contrôle}}^{\text{max}} \Leftrightarrow V_1^{\text{équilibre}} = \frac{C_{\text{contrôle}} \cdot V_{\text{contrôle}}^{\text{max}}}{L_{\text{contrôle}}} \cdot \frac{L_1}{C_1} = 28,7\% .$$

La stabilisation du niveau d'accumulation du convoyeur 2 est alors logique car le flux d'entrée est égal au flux maximum du contrôle de niveau qui est en fait le flux maximum minimal pour toutes les ressources (goulet).

La panne provoquée en aval du convoyeur 2 aura pour effet d'accroître la charge de ce dernier. Dans les deux cas, elle est prise en compte par le système de pilotage. En particulier, on note que la contrainte dynamique imposée au convoyeur 1 est relâchée dès que l'incident est détecté, ce qui a pour conséquence de pouvoir diminuer sa vitesse afin de réduire l'alimentation en produit du convoyeur 2. Lorsque la panne disparaît, le système détecte le retour à la normale et réinsère cette contrainte dynamique. On constate que la stabilisation du niveau d'accumulation avant et après la panne est identique, ce qui montre clairement l'absence d'un éventuel biais, que ce soit en poursuite (procédure de démarrage) ou en régulation (gestion des pannes).

En ce qui concerne les flux, la valeur de 94,1% montre l'efficacité du pilotage par contrainte, qu'il soit adaptatif ou non. La différence entre la valeur moyenne et la valeur instantanée s'explique par la phase de montée en puissance du système qui n'est pas immédiate (elle est effective en moyenne 50 secondes après la formation du premier pack). La faible différence entre les valeur moyenne du flux de sortie avec/sans adaptation dans les cas avec/sans panne provient du fait que le flux du goulet est automatiquement maximisé par le système de pilotage.

Cette illustration montre clairement l'avantage d'intégrer une adaptation événementielle afin de prendre en compte des informations supplémentaires pour élaborer une stratégie à plus long terme sans altérer les performances du système en terme de flux de sortie. L'illustration proposée montre clairement que cette stratégie peut être élaborée en fonction d'une dynamique de rejet de perturbation ou de poursuite d'un modèle (dépassement, temps de monté, etc.), de manière similaire à la conception des régulateurs en automatique. Cependant, étant donnée la complexité du système à piloter, seule la simulation permettrait de dimensionner les paramètres de régulation et de poursuite de modèle.

## 7. Conclusion

Cet article a présenté un pilotage basé sur l'approche par contraintes. Après avoir justifié ce choix, nous avons montré l'avantage de coupler une telle approche avec une fonction d'adaptation événementielle, ce qui nous a conduit à définir au niveau du pilotage une adaptativité spatiale et temporelle. Cette approche a été illustrée sur un cas d'application.

Une première perspective porte sur l'intégration des travaux présentés dans cet article au sein de la structure distribuée développée au laboratoire et proposée dans

[TRE 95]. La distribution permet de faire face à la complexité des objectifs et de la compréhension du comportement de la structure de production [TCH 93]. En outre l'approche distribuée présente l'intérêt de pouvoir éviter le problème d'explosion combinatoire au niveau de l'optimisation en répartissant des capacités de décisions localement à chaque agent. Enfin, la notion de contrainte est compatible avec la restriction de visibilité induite par l'approche de distribution,

La finalité de nos travaux est de proposer un outil d'aide à la conception et au dimensionnement de tels systèmes de production (analyse des causalités, stratégie d'adaptation, génération automatique d'abaques, etc.).

## 8. Bibliographie

- [AGG 93] AGGOUN A., BELDICEANU N., « Extending Chip in order to solve complex scheduling problems », *Journal of mathematical and computer modelling*, vol. 17, n° 7, p. 57-73, 1993.
- [AUD 95] AUDRY N., « Modélisation et simulation de systèmes de production à haute cadence avec convoyage : réseaux de Petri lots commandés génériques », thèse de doctorat, université de Montpellier.
- [DEM 94] DEMONGODIN I., « Les réseaux de Petri Lots : modélisation des systèmes de production à haute cadence en régime transitoire », thèse de doctorat, université de Montpellier.
- [DIN 88] DINCBAŞ M., SIMONIS H., Van Hentenryck, « Solving large combinatorial problems in logic programming », *Journal of logic programming*, n° 8, 1988, p. 75-93.
- [ERS 93] ERSCHLER J., FONTAN G., MERCE C., « Approche par contraintes en planification et ordonnancement de la production », *APII*, vol. 27, n° 6, 1993, p. 669-695, éd. Hermès, Paris.
- [ESQ 95] ESQUIROL P., LOPEZ P., « Programmation logique avec contraintes et ordonnancement », *APII*, Vol. 29, n°4-5, 1995, p. 379-407, éd. Hermès, Paris.
- [PAR 92] PAREDIS J., VAN RIJ T., « Simulation and constraint programming as support methodologies for job-shop scheduling », *Revue des systèmes de décision*, vol. 1, n° 1, 1992, p. 59-77, éd. Hermès, Paris.
- [PES 97] PESIN P., TRENTESAUX D., TAHON C., « The event filter concept : a way to improve the reactive management of complex industrial systems », *International conference on Industrial Engineering and Production Management*, Lyon, 1997, p. 581-591.
- [TCH 93] TCHAKO J., F., N., TAHON C., « Distributed management system for a packaging line », *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, Mons, 1993, p. 833-845.
- [TCH 94] TCHAKO J., F., N., « Contribution à la conception d'un système de pilotage distribué pour les systèmes automatisés de production », thèse de doctorat, université de Valenciennes.
- [TRE 95] TRENTESAUX D., TCHAKO J., F., N., TAHON C., « Distributed and multicriteria management tools for integrated manufacturing », *Life Cycle modelling for innovative products and processes*, 1995, p. 576-588, éd. Chapman & Hall, Londres.

**Annexe :**

Titre Anglais : Adaptive & constraint-based activity control of high-speed linear production systems