



HAL
open science

Modèle de simulation de convoyeurs à haute cadence

Philippe Thomin, Damien Trentesaux

► **To cite this version:**

Philippe Thomin, Damien Trentesaux. Modèle de simulation de convoyeurs à haute cadence. 2ème conférence Modélisation et Simulation des flux physiques et informationnels (MOSIM), 1999, annecy, France. hal-03088761

HAL Id: hal-03088761

<https://hal.science/hal-03088761>

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.

MODELE DE SIMULATION DE CONVOYEURS A HAUTE CADENCE

Philippe Thomin, Damien Trentesaux

Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines, UMR CNRS 8530

Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

Le mont Houy, B.P. 311, 59304 Valenciennes Cedex

Email : [Philippe.Thomin, Damien.Trentesaux]@univ-valenciennes.fr

Résumé – *La simulation des convoyeurs à haute cadence est difficile, tant en raison de la nature des produits transportés que de la nature des convoyeurs eux-mêmes. Dans cet article, après avoir situé le cadre de notre travail, nous décrivons un modèle de simulation générique reposant sur une approche à objets, ainsi que trois instances de ce modèle, dont nous étudions certaines caractéristiques pertinentes dans notre contexte. L'objectif de nos travaux est de proposer un système d'aide à la conception, à la simulation, au dimensionnement et au pilotage de lignes de production à haute cadence.*

Mots-Clés - *convoyeurs haute cadence, modélisation objet, simulation comparative.*

1 Introduction

Dans cet article, nous focalisons notre attention sur la modélisation de convoyeurs à accumulation à haute cadence tels que ceux utilisés en ligne de conditionnement [TCH 1993] [AUD 1995] [TRE 1995]. Etant données les cadences élevées de ces systèmes de production, les lignes sont fortement automatisées et le rôle de l'opérateur consiste essentiellement en la supervision et la gestion des modes dégradés, ce qui différencie les systèmes étudiés dans cet article des autres types de production linéaire à convoyage et à cadences plus faibles, tels que les lignes de montage automobile. Notre objectif final est de développer un système d'aide au dimensionnement et à l'exploitation des systèmes de production linéaires à hautes cadences basé sur une démarche de simulation. La finalité de ce système d'aide est double : en conception/aide au dimensionnement (structure de production, nombre et dimensionnement des convoyeurs, consigne de cadence, investissements, formation) et en exploitation (pilotage temps-réel, régulation, gestion des modes de marche/arrêt). Notre démarche de simulation (en phase de conception) et de pilotage (en exploitation) est de ce fait temps-réel. Elle doit également supporter l'intégration des décisions humaines en temps-réel. Nous adoptons ainsi, et en premier lieu, une démarche de modélisation et de simulation par échantillonnage temporel plutôt qu'une démarche événementielle. Cependant, dans le cadre de la mise en œuvre d'un pilotage, une approche mixte serait plus judicieuse [TRE 1999].

Les approches classiques de modélisation (automatique linéaire, mathématique, etc.) pour la modélisation de convoyeurs haute cadence sont inadaptes, principalement à cause du comportement non linéaire des convoyeurs [TCH 1994], qui ne peuvent pas être modélisés comme simple retard pur (bourrage, famine, inertie variable selon la charge, etc.) et du besoin en modélisation fine pour optimiser le pilotage. En pratique, étant donnée la nature élevée des cadences, on constate qu'un gain de productivité de quelques pour-cent a une influence considérable sur la diminution des coûts de fonctionnement [DEM 1994].

Cependant, et contrairement à une approche à base de preuve (mathématique, automatique), la simulation ne permet pas de prouver la validité des décisions prises. Nous proposons d'évaluer la robustesse de ces décisions dans différents contextes, en nous basant non pas sur un modèle précis, mais sur un modèle générique instancié en différents modèles spécifiques. Une approche objet est particulièrement adaptée à cette démarche. A plus long terme, nous souhaitons comparer nos résultats avec d'autres approches de modélisation comportementale et de simulation, notamment les réseaux de Petri [AUD 1995].

Après avoir détaillé le modèle générique et les trois instances, nous proposons un protocole expérimental pour mettre en évidence les invariants et les différences entre ces instances.

2 Modélisation des convoyeurs à haute cadence

2.1 Modèle générique

La période d'échantillonnage pour la simulation du système est notée T_e . Le modèle générique est basé sur huit données (dont 3 déduites) et six fonctions :

- les données : trois attributs statiques qui sont sa longueur L , sa largeur l et la vitesse maximale autorisée V_{\max} et deux attributs dynamiques, la vitesse réelle V et la vitesse de consigne V_c à l'instant t . A partir de la longueur, de la largeur et du type de produit véhiculé, il est possible de déterminer la capacité d'accueil C du convoyeur (en produit), la densité moyenne D (en produits par unité de surface) et le flux ϕ (en produit par unité de temps) moyen, maximal ou instantané en sortie ou en entrée. On obtient : $D = C/(L.l)$ et $\phi = (C.V)/L$.
- Les fonctions que nous avons retenues sont les suivantes :
 - avance d'un convoyeur durant un intervalle de temps T_e (indépendamment d'un éventuel transfert de produit, ce qui est géré par les fonctions suivantes),
 - normalisation du convoyeur (gestion des décalages des surfaces générés par l'avance),
 - calcul de la quantité délivrable en aval d'un convoyeur suite à une avance,
 - répercussion en accumulation de la quantité de produit non délivrée en aval durant T_e ,
 - chargement en amont de la quantité maximale de produit admissible durant T_e ,
 - modification de la vitesse du convoyeur [TRE 1999].

Le modèle générique est établi à partir de l'agencement de ces six fonctions. L'évolution d'un convoyeur durant un intervalle de temps T_e est réalisée par l'algorithme de la figure 1. Cette évolution est conditionnée par la capacité d'entrée du convoyeur aval (ce_{aval}) et par la quantité de produit que peut délivrer le convoyeur amont (cs_{amont}).

```
Avancer le convoyeur pour l'intervalle de temps  $T_e$ 
sortie ← quantité délivrable en aval
Normaliser le convoyeur
Si sortie >  $ce_{\text{aval}}$ 
  Répercuter ce qui reste en accumulation (sortie -  $ce_{\text{aval}}$ )
  sortie ←  $ce_{\text{aval}}$ 
Fin Si
entree ← Charger au maximum en entrée ( $cs_{\text{amont}}$  durant  $T_e$ )
modifier la vitesse du convoyeur
```

Figure – 1. Algorithme d'évolution d'un convoyeur

L'algorithme d'évolution d'une chaîne de convoyeurs travaille de l'aval vers l'amont (cf. fig. 2). De la sorte, pour un convoyeur C_i donné, ce_{aval} (entrée de C_{i+1}) est déjà calculé. En revanche, cs_{amont} (sortie de C_{i-1}) n'est pas, a priori, disponible ; il est donc estimé en faisant évoluer une copie du convoyeur amont, avec des capacités d'entrée et de sorties non limitées. Il faut toutefois veiller à ne pas faire avancer le convoyeur pendant un intervalle de temps T_e tel que la distance parcourue est supérieure à sa longueur ; dans le cas contraire, la quantité de produit délivrée serait sous-estimée.

```
 $ce_{\text{aval}} \leftarrow \infty$ 
Pour tous les convoyeurs  $C_i$  de  $i = n$  (fin de chaîne) à  $i = 1$  (début)
  Si  $i = 1$ 
    Alors  $cs_{\text{amont}} \leftarrow \infty$ 
    Sinon  $cs_{\text{amont}} \leftarrow$  estimation de la quantité sortie par  $C_{i-1}$  durant  $T_e$ 
  Fin Si
  faire évoluer  $C_i$  durant  $T_e$ 
   $ce_{\text{aval}} \leftarrow$  entrée de  $C_i$ 
Fin Pour
```

Figure – 2. Algorithme d'évolution d'une chaîne de convoyeurs

2.2 Modèles dérivés

Le premier modèle (« produits glissants ») décompose un convoyeur selon un nombre fixe de tronçons dont la position et la longueur sont constantes après normalisation, quelle que soit la vitesse du convoyeur. Les produits sont redistribués sur les tronçons en fonction de la distance qu'ils parcourent. L'avance modifie la position des tronçons. Le calcul de la quantité délivrable en aval revient à calculer la charge portée par les tronçons sortis du convoyeur (quelques tronçons entiers plus un fragment, en fonction de la vitesse et de l'intervalle de temps d'évolution). La normalisation permet de recréer de nouveaux tronçons en position nominale, sur lesquels les produits transportés par les tronçons déplacés sont répartis, au prorata des longueurs d'intersection entre les tronçons déplacés et les tronçons nominaux. La répercussion des quantités non délivrées en aval est faite en chargeant au maximum de leur capacité les tronçons nouveaux, en partant du tronçon de sortie, et en remontant progressivement vers l'amont. Enfin, le chargement de l'entrée se fait en chargeant au maximum les tronçons, en partant du premier tronçon non entièrement touché par la normalisation, et en remontant vers le début du convoyeur.

Le second modèle (« tronçons glissants ») décompose un convoyeur en tronçons dont la position peut évoluer avec le temps. Initialement, on compte un nombre entier de tronçons de même longueur. Après une évolution, les deux tronçons de début et de fin de convoyeur seront plus courts que les autres. L'avance, le calcul de la quantité délivrable en aval, la répercussion des quantités non délivrées en aval et le chargement de l'entrée se font comme pour le modèle à produits glissants, mais en tenant compte des tronçons non entiers en début et en fin de convoyeur. Par contre, la normalisation ne remplace pas les tronçons modifiés par l'avance, comme précédemment, mais supprime, s'il y en a, les tronçons entièrement sortis du convoyeur, réduit le tronçon partiellement sorti (longueur et quantité transportée), complète le premier tronçon pour le rapprocher de sa longueur nominale, et ajoute, le cas échéant, de nouveaux tronçons (à remplir) à l'entrée du convoyeur.

Le dernier modèle (« entier ») décompose un convoyeur selon un nombre fixe de tronçons dont les longueurs sont constantes. L'évolution est conditionnée de façon à ce que l'avance se fasse sur une longueur égale à un nombre entier de tronçons, ce qui ne provoque pas de redistribution des produits portés par un tronçon vers deux autres, comme dans le premier modèle, ni de réduction ou d'élongation de tronçons extrêmes, comme dans le deuxième. En revanche, une discrétisation de la vitesse est imposée, et l'intervalle de temps choisi pour l'évolution doit être connu a priori ; de plus, la qualité de ce modèle est fortement conditionnée par un nombre important de tronçons.

3 Cas mono-convoyeur

Le protocole expérimental doit permettre de caractériser les propriétés de chaque modèle (éclatement possible des lots, cohérence temporelle, etc.), et, de manière relative pour ces trois modèles, de mettre en évidence les différences et les ressemblances (invariants de comportement). Ces analyses portent sur un seul convoyeur dont les caractéristiques sont les suivantes : $L = 3,96m$, $l = 1,155m$, $C = 1050$, $V_{max} = V = 0,2m.s^{-1}$. Ce qui implique $\phi_{max} = 53 \text{ produits.s}^{-1}$. Un exemple illustratif plus complexe (3 convoyeurs) nous permettra en conclusion de valider le comportement de l'ensemble notamment au travers de l'analyse du flux de sortie en fin de chaîne comparé à celui du convoyeur goulet. La nature du flux d'entrée permet de mettre en évidence l'ensemble de ces points. Pour ce faire, nous utilisons une entrée de type « fenêtre » où le flux d'entrée est $\phi_e = 30 < \phi_{max}$ durant l'intervalle de temps $[0, 50]$. La capacité de sortie du convoyeur suit la même évolution (infinie durant un intervalle de temps fixe, nulle ailleurs), mais décalée sur la période $[50, +\infty[$ pour faire apparaître une accumulation. Chaque modèle est testé pour les périodes d'échantillonnage 0,1 ; 0,2 et 1 s.

3.1 Résultats

Les résultats sont illustrés sur les figures 3, 4 et 5. Chaque capacité est indiquée proportionnellement à la capacité maximale. Les résultats sont présentés sur 20 tronçons. L'échelle temporelle ne tient pas compte de la période d'échantillonnage. Il convient donc de multiplier par T_e afin d'obtenir la date en s (durée totale simulée : 100 s).

Les indicateurs quantitatifs qui vont nous permettre de comparer quantitativement les trois modèles sont indiqués en table 1. Ils concernent l'accumulation, la saturation et les temps de simulation. Sont indiqués les nombres de tronçons sur lesquels la simulation est effectuée.

Deux autres indicateurs qualitatifs peuvent être définis : l'éclatement des lots et l'influence de la variation de vitesse. Le premier est visible sur les figures 3, 4 et 5. L'influence de la vitesse est représentée sur la figure 6 pour $T_e = 0,1$ s. Les temps de simulation sont respectivement de 1,55 ; 0,95 et 181,8 s. La vitesse est égale à $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ sur $[0, 50]$ et $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ sur $[50, +\infty[$.

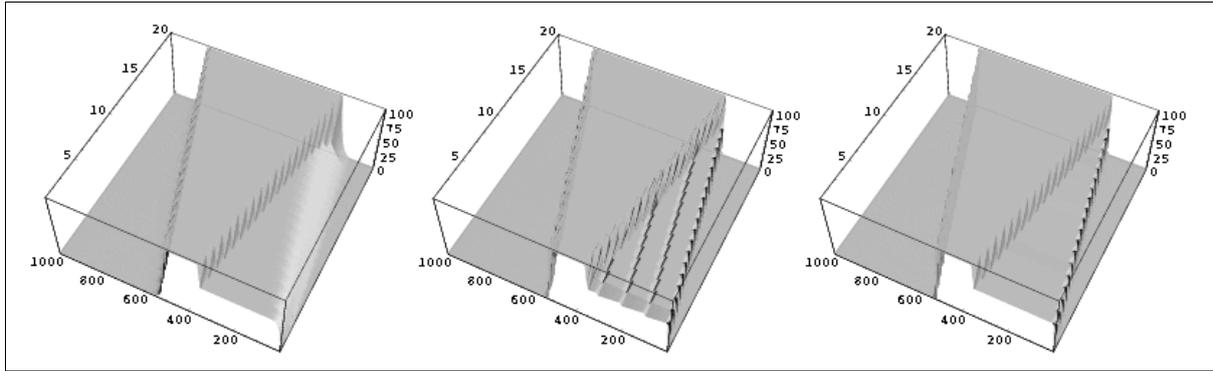


Figure 3 - Modèles 1, 2 et 3 pour $T_e = 0,1 s$.

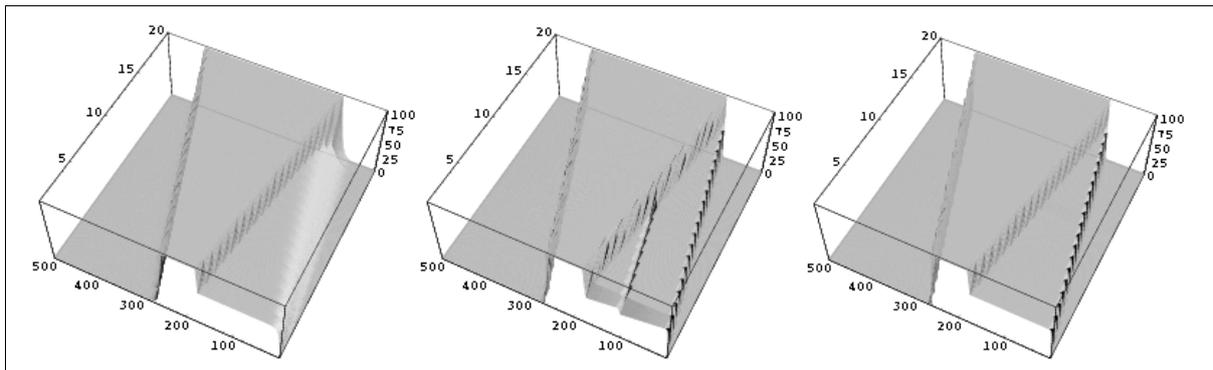


Figure 4 - Modèles 1, 2 et 3 pour $T_e = 0,2 s$.

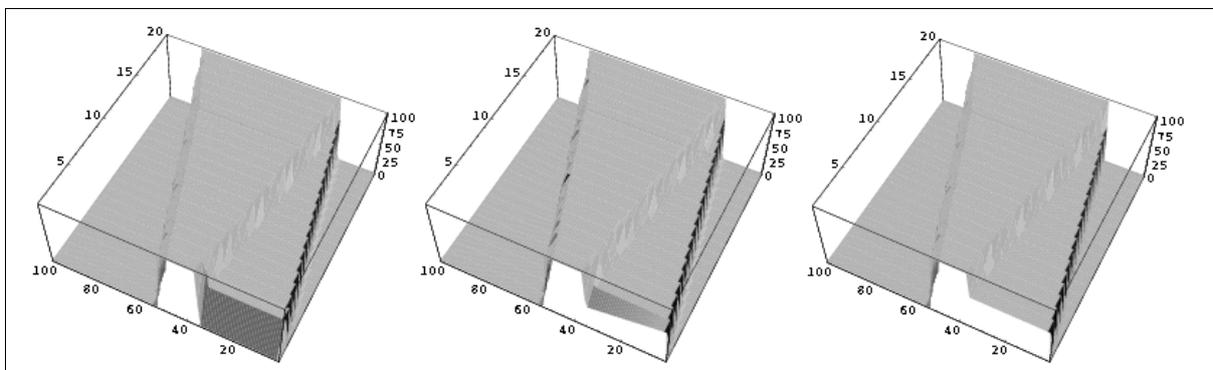


Figure 5 - Modèles 1, 2 et 3 pour $T_e = 1 s$.

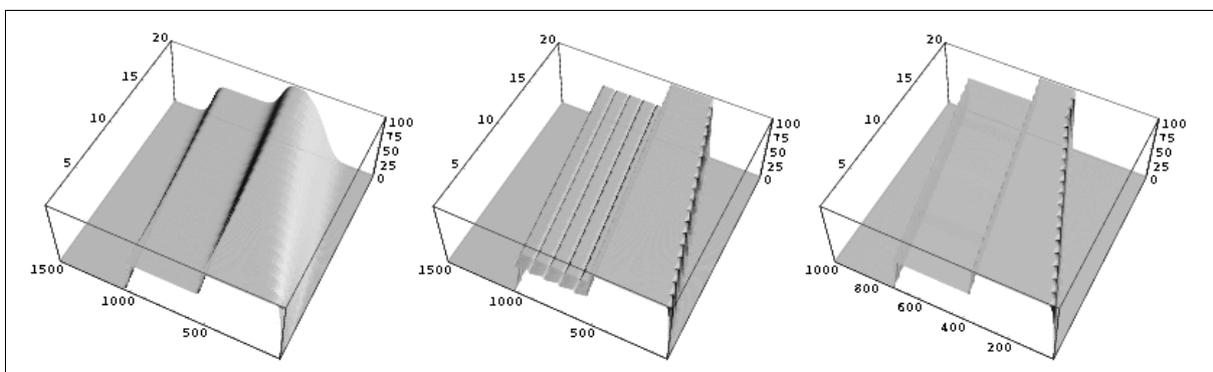


figure 6 – variations de vitesse pour les modèles 1, 2 et 3.

Modèles	Période d'échantillonnage (s)								
	0,1			0,2			1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nombre de tronçons	20	20	396	20	20	198	20	20	40
<i>Accumulation :</i>									
Date début (début présence accumulation)	19,2	20,8	20,7	19,6	21,4	20,8	21	23	22
Date de vidage (fin d'accumulation)	82,1	82,2	83,3	82,2	82,2	83,4	84	83	84
<i>Saturation :</i>									
Date début (temps de remplissage)	35,1	35,1	35,1	35,2	35,2	35,2	36	36	36
Date de fin (début de vidage)	50,1	50,2	51	50,1	50,2	51	50,1	50,2	51
Temps d'exécution du programme (s)	1,05	0,69	122,3	0,54	0,34	16,5	0,1	0,07	0,25

table 1 : indicateurs de comparaison

3.2 Interprétation

En début de charge et pour les cas à vitesse constante, il n'y a pas saturation (charge par tronçon inférieure à 100%), conformément au fait que $\phi_e = 30 < \phi_{\max}$. L'accumulation intervient dès que les premiers produits véhiculés buttent en bout de convoyeur ($\phi_s = 0$). Le niveau d'accumulation évolue dans le sens inverse des produits sur le convoyeur. La saturation dure jusqu'au moment où la sortie du convoyeur est autorisée ($\phi_s = 30$ à $t=50$) et le vidage s'effectue alors. Le temps d'exécution du programme de simulation varie linéairement avec la période d'échantillonnage, sauf pour le modèle 3 (le nombre de tronçons étant calculé à partir de T_e et de la vitesse, il varie exponentiellement). Une simulation en temps-réel n'est pas possible si le temps d'exécution est supérieur au temps simulé, ce qui est le cas pour le modèle 3 à $T_e = 0,1$ s (122,3 s pour 100 s et 181,8 s pour 150 s).

Les invariants les plus flagrants sont les dates de début de saturation à T_e donné et date de fin de saturation à modèle donné. Cependant, étant donné l'incertitude liée T_e , pour tout t, on peut considérer que *l'ensemble des indicateurs concernant les saturations sont invariants à T_e près.*

Les différences se situent au niveau des dates de début d'accumulation et des dates de vidage. Le modèle 2 conserve les produits le moins longtemps. Le modèle 1 se remplit plus lentement, le modèle 3 se vide plus lentement.

En ce qui concerne la variation de vitesse, on constate que la charge des tronçons diminue lorsque la vitesse augmente, et ce, en fonction de leur position. L'éclatement des lots est clairement mis en évidence uniquement pour le modèle 1. Ceci a pour conséquence de provoquer l'anticipation de l'accumulation.

4 Un exemple de cas multi-convoyeurs

Dans cet exemple, trois convoyeurs sont utilisés (les flux de sortie ne sont pas conditionnés). Leurs caractéristiques sont résumées en table 2. Ces données sont celles de convoyeurs réels.

	Convoyeur		
	1	2	3
Longueur (m)	7,59	8,25	5,28
Largeur (m)	0,33	0,0825	0,33
Vitesse (m/s)	1,2	1,4	1,2
Capacité (produit)	570	125	398
<i>Flux maximal (produit / unité de temps)</i>	<i>90,1</i>	<i>21,2</i>	<i>90,4</i>

table 2 : caractéristiques génériques des convoyeurs utilisés

Le flux goulet est de 21,2 produits. s^{-1} , dû au convoyeur 2. Le comportement de l'ensemble est mis en évidence pour deux types d'entrée en fenêtre dont l'une présente un flux supérieur à celui-ci (35 produits. s^{-1}) et l'autre, inférieur (20 produits. s^{-1}), sur une durée nous permettant d'atteindre le régime permanent. La période d'échantillonnage est fixée à 0,1 s. Les résultats issus du modèle 1 sont illustrés sur la figure 7 (le convoyeur n° 1 se situe au niveau des tronçons 1-20, le convoyeur 2, 20-40 et le convoyeur 3, 40-60). Les résultats des modèles 2 et 3 font apparaître des différences similaires aux cas mono-convoyeur.

D'un côté, une entrée dont le flux est inférieur à celui du goulet provoque pas d'accumulation (le goulet n'est pas chargé au maximum). Le régime permanent est atteint approximativement au bout de 19 s.

D'un autre côté, pour une entrée dont le flux est supérieur à celui du goulet, on constate une accumulation croissante au niveau du premier convoyeur, une saturation rapide du second convoyeur et une sous charge pour du dernier. Le régime permanent est atteint au bout de 32 s, c'est en fait le temps nécessaire pour saturer le convoyeur amont du convoyeur goulet. Le taux de charge en sortie est alors de 23,45% (cf. fig. 8), ce qui correspond à un flux de sortie final $\phi = 398 \cdot 0,2345 \cdot 1,2/5,28 = 21,2$ produits. s^{-1} . Comparé à celui du goulet, on obtient une erreur négligeable, ce qui illustre clairement la validité de notre modèle par la synchronisation du flux de sortie sur les flux goulets.

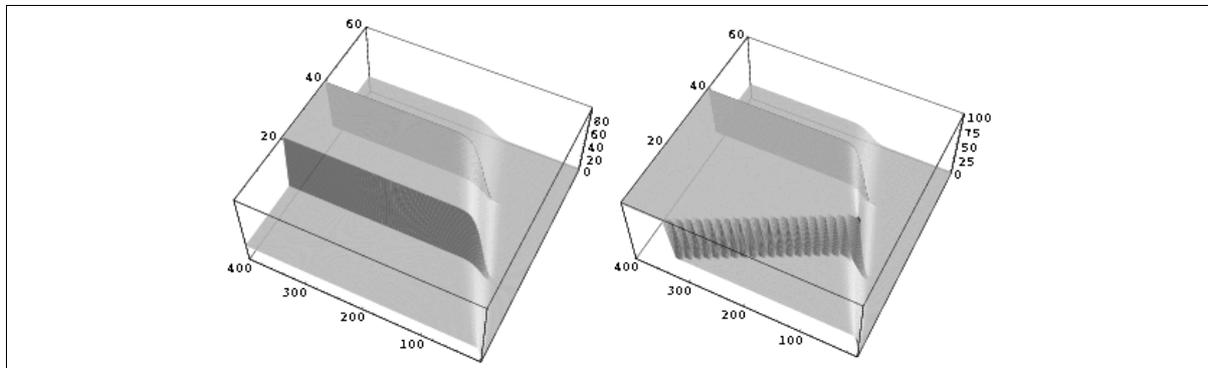


figure 7 - évolution des charges pour un flux de 20 produits/ s et un flux de 35 produits/s.

5 Conclusion

Les résultats obtenus nous permettent de comparer les instances les unes par rapport aux autres, afin de dégager des invariants de comportement, en l'absence de mesures expérimentales difficiles à obtenir (étant donnés les cadences et les coûts de fonctionnement, le nombre d'essais réels en ligne doit être extrêmement réduit). Les éléments à prendre en compte pour le choix du modèle portent bien sûr sur les différences entre ces modèles. Elles ont été mises en évidence essentiellement au niveau de l'éclatement des lots du premier modèle et la discrétisation de la vitesse pour le modèle trois. Dans le cas d'un convoyage multi-bandes, où un convoyeur est constitué d'un ensemble de bandes parallèles où la vitesse s'accroît graduellement avec la distance au centre pour éviter les chocs sur les bords et sur les intersections entre convoyeurs, le modèle 1 est adapté, de par l'éclatement des lots qui doit se créer dû à ce différentiel de vitesse. Une analyse plus fine doit être réalisée afin de définir la vitesse moyenne du modèle par rapport aux vitesses moyennes, minimales et maximales du système. Si cet aspect est considéré comme négligeable ou est absent (convoyage mono-bande) où une vitesse moyenne peut être utilisée sans trop de perte de qualité, les deux autres modèles apportent un niveau de précision accru en minimisant la perte d'information au fil de la simulation. Dans tous les cas, une de nos contraintes est, en l'absence de modèle mathématique suffisamment fiable du système de convoyage, l'analyse de la robustesse des lois de régulation que l'on désire mettre en place en les appliquant sur les trois modèles proposés, chacun mettant en évidence des propriétés différentes. Cette approche nous permettra à l'avenir de caractériser la robustesse des paramètres et règles de pilotage en simulant et en évaluant l'évolution des performances du système en fonction des différentes instances.

La seconde perspective majeure consiste en la comparaison de notre approche et de nos résultats avec l'outil proposé par [DEM 1994] et [AUD 1995] : les réseaux de Petri Lots.

6 Bibliographie

- [AUD 1995] Audri 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 1994] Demongodin I., *Les réseaux de Petri Lots : modélisation des systèmes de production à haute cadence en régime transitoire*, thèse de doctorat, université de Montpellier.
- [TCH 1993] Tchako J-F., Tahon C., *Distributed management system for a packaging line*, International Conference on Industrial Engineering and Production Management, Mons, 1993, p. 833-845.
- [TCH 1994] Tchako J-F., *Contribution à la conception d'un système de pilotage distribué pour les systèmes automatisés de production*, thèse de doctorat, université de Valenciennes.
- [TRE 1995] Trentesaux D., Tchako J-F., 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.
- [TRE 1999] Trentesaux D., Pesin P., Tahon C., *Pilotage adaptatif par contraintes des systèmes de production linéaires à haute cadence*, actes MSR'99, Hermès, 1999, pp. 287-300.