

# APPLICATION DES RESEAUX DE PETRI HYBRIDES A L'ETUDE DES SYSTEMES DE PRODUCTION A HAUTE CADENCE

Mircea Adrian DRIGHICIU, Universitatea din Craiova, Facultatea de Electromecanică  
Bd.Decebal Nr. 107, e-mail:adrighiciu@em.ucv.ro

Gheorghe MANOLEA, Universitatea din Craiova, Facultatea de Electromecanică  
Bd.Decebal Nr. 107, e-mail:adrighiciu@em.ucv.ro

**Résumé:** Les Réseaux de Petri Hybrides et leur extension les Réseaux de Petri Lots, offrent la possibilité de décrire les changements logiques liés aux systèmes de production à haute cadence. Le travail que nous venons de proposer s'est orienté vers la modélisation d'un système de convoyage à haute cadence à partir des Réseaux de Petri hybrides. Un premier modèle hybride est proposé, dont on fait la vérification des principales propriétés qualitatives et quantitatives par simulation, puis on présente une extinction puissante sous la forme des Réseaux Petri lots, afin d'amélioration des performances du modèle. Le logiciel Visual Object Net ++ 2.0 a été utilisé pour la simulation.

**Mots clé :** Réseaux de Petri Hybrides, Réseaux de Petri Lots, Modélisation , Simulation.

## 1. INTRODUCTION GENERALE

Les exigences de la mondialisation industrielle poussent les concepteurs et les exploitants à mettre en place des systèmes de production hautement automatisés, de plus en plus complexes et de plus en plus chers. C'est très souvent après l'investissement et la réalisation que les décideurs admettent avoir acheté trop ou pas assez de machines, que les zones de stockage et de transfert prévues avant l'implantation se révéleront sur – ou sous – dimensionnées. Les techniques classiques d'analyse utilisées atteignent vite leurs limites dès que l'interaction entre les différents composants du système augmente. D'autre part, tout irait pour le mieux si les machines ne se bloquaient jamais et tenaient la cadence nominale. Hélas, des pannes aléatoires peuvent affecter la partie physique du processus. Lorsqu'une machine est en panne, il peut se produire le blocage d'une autre machine (en amont avec un stock intermédiaire qui s'est vidé). Ces phénomènes aléatoires induisent souvent une perte de productivité considérable. En fonction de la capacité des stocks tampons, il est important de prévoir leur influence sur les performances du système de production. La recherche d'amélioration intéresse donc non seulement les performances, mais également les transferts qui sont établis entre elles (Alla et al 1992), (Zaytoon 2003).

Parmi les systèmes automatisés de production, on rencontre bien souvent des structures de production

quasi – linéaires et à grande capacité. De tels systèmes ont leurs composants physiques fortement liés les uns aux autres. Mais, la géométrie de l'ensemble et les algorithmes de régulation, qui interagissent sur les machines et les convoyeurs, sont actuellement déterminés à peu près de façon empirique et il est bien évident que la production de chaque élément de la chaîne de fabrication ne doit pas être quelconque, mais doit tenir compte de l'état de l'ensemble. Cette complexité rend l'analyse et l'évaluation d'un système de production à haute cadence très difficile surtout si elles sont fondées uniquement sur le savoir-faire et l'expérience accumulée. Le besoin de modéliser ces systèmes est donc évident, dans le but d'étudier l'incidence des différents paramètres sur la productivité.

## 2. POSITION DU PROBLEME

Pour des installations de type ligne de fabrication à haute cadence (ligne de conditionnement, ligne d'assemblage, etc.), les systèmes de convoyage jouent un rôle important sur les performances globales (Fig.1). En outre, due à la croissance de la productivité et le dimensionnement d'une ligne - et plus particulièrement les stocks tampons (zones de convoyage, par exemple) - il est nécessaire, voir indispensable, d'optimiser les flux transitoires inhérents aux aléas de fonctionnement. Sur les systèmes de transport entre les machines, les flux physiques des produits sont conditionnés par des phénomènes d'accumulation dynamique mais aussi par la variation de vitesse d'entraînement des éléments de transfert (chariots filo – guidés, convoyeurs etc.). En fait, le besoin d'un outil de prévision du comportement du système de production, dans son ensemble, se fait ressentir (Demongodin 1994).

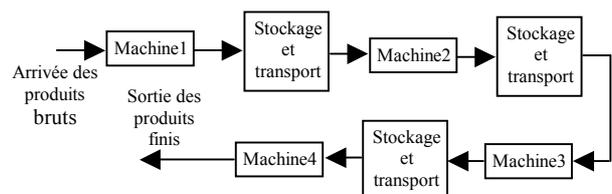


Fig.1 Structure générique des lignes à haute cadence

Les méthodes d'analyse de performances pour tels systèmes déterminent de façon analytique les

caractéristiques de lignes de fabrication. Souvent utilisées en phase de pré – étude, elles servent à pré dimensionner le système, en fonction des pannes aléatoires pouvant intervenir sur les machines. Deux grands principes de méthodes de calcul sont – en général – utilisés : la méthode de décomposition et la méthode d'agrégation, toutes les deux étant insuffisantes lorsqu'une étude du régime transitoire est nécessaire.

Dans les lignes de production à haute cadence, les transferts de produits entre machines et les stations de travail sont composés essentiellement de convoyeurs en série. Une étude particulière des différents structures de convoyage a montré qu'un simple temps de transfert ne peut représenter leur comportement. Il a donc été nécessaire de trouver un modèle de représentation permettant de décrire plus finement leur fonctionnement en régime transitoire. Deux grandes classes de modèles peuvent être utilisées dans ce domaine : les modèles discrets, basés sur une représentation cellulaire du convoyeur et les modèles continus – en général, grands consommateurs de temps de calcul (Siman, Witness) à cause du nombre important d'événements à traiter.

Parmi la classe d'outils formels qu'offrent les Réseaux de Petri et les modèles hybrides, les Réseaux de Petri hybrides s'avèrent bien adaptés à la modélisation et à l'analyse des performances des systèmes de production à haute cadence. Ces réseaux de Petri font coopérer une partie discrète et une partie continue. Cette dernière partie permet pour des systèmes de production à haute cadence, d'approximer le nombre de pièces par un nombre réel, la production des pièces étant alors considérée comme un flot continu transitant par les différents machines de l'atelier. En effet, cette classe de réseaux allie les avantages d'une modélisation des Réseaux de Petri discrets temporisés sur les transitions, et ceux de la modélisation continue pour représenter les flux de produits grâce aux réseaux de Petri continus. Avec ce modèle hybride, dans les systèmes à haut débit de production, les produits ne sont plus considérés individuellement mais comme un flux de pièces passant à travers les machines et les zones de transfert.

### 3. TYPES DE MODELES

Pour la plupart de systèmes de transport étudiés, la technique de convoyage est celle de bandes transporteuses unidirectionnelles entraînant par friction des pièces identiques. Sur de tels systèmes, les flux physiques sont conditionnés à la fois par la géométrie même du convoyeur et par les phénomènes d'accumulation prenant naissance en des points singuliers. La géométrie des zones intermédiaires de stockage, c'est – à – dire des convoyeurs joue un rôle important dans la capacité de production par les retards qu'elle introduit sur les machines en aval et la capacité de stockage qu'elle autorise. Ainsi, dans le monde industriel, deux classes de convoyeurs sont souvent présentes : les convoyeurs *sans accumulation* et celles *avec accumulation*. Pour les premiers, les articles sont maintenus dans des espaces pré définis et ne peuvent entrer en contact les uns avec les autres, les produits se

déplaçant à la vitesse d'entraînement du convoyeur. Les systèmes de transport avec accumulation permettent une accumulation des articles qu'ils transportent ; la vitesse de déplacement de ceux – ci peut donc soit être égale à la vitesse d'entraînement du convoyeur (état non accumulé ou régime libre), soit inférieure (état accumulé). Dans ce dernier cas, on parle de vitesse apparente des pièces (Demongodin 1994).

Pour un système mono produit sans accumulation, souvent, entre deux ou plusieurs station de travail d'une ligne de fabrication, les produits circulent par un système de convoyage qui assure le transport des pièces ou des sous – ensembles parmi des zones de stockage intermédiaires (Fig.2), (David et al.2001).

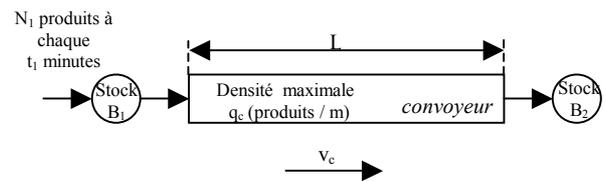


Fig.2 Structure physique du système de transport

Un lot de  $N_1$  produits qui vont être transportés est stocké (au moment initial  $t = 0$ ) chaque  $t_1$  unités de temps (minutes) dans le dépôt  $B_1$ . La longueur du convoyeur est  $L$ , sa vitesse d'entraînement –  $v_c$  et la capacité maximale de transport –  $Q_c$  produits (avec une densité  $q_c$  pièces / m). Pour ce système est possible de concevoir un modèle hybride (Fig.3) dans lequel le marquage des places continues  $P_2$  et  $P_5$  représente le nombre de produits existant dans les deux zones de stockage. L'entrée, respectivement la sortie du système de convoyage sont représentées par les transitions continues  $T_3$  et  $T_4$ , pour lesquels les vitesses de franchissement ont la valeur  $V_3 = V_4 = v_c \cdot q_c$ .

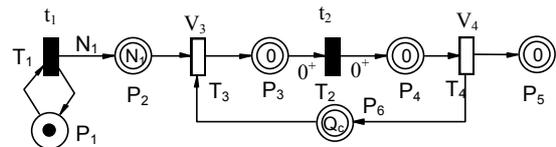


Fig.3 Le modèle Réseau de Petri hybride du convoyeur

La place  $P_4$  modélise la capacité maximale de transport et la durée  $t_2$  associée à la transition discrète  $T_2$  a comme correspondance l'intervalle de temps nécessaire pour un produit à parcourir l'entière longueur du convoyeur ( $t_2 = L / v_c$ ). La topologie du réseau contient des arcs  $P_3 - T_2$  et  $T_2 - P_4$ , avec un poids représenté par „ $0^+$ “, qui joue un certain rôle dans la dynamique du modèle : ainsi, pour une très faible quantité d'un produit transporté qui arrive sur le convoyeur par un système de transfert quelconque, la transition  $T_2$  est validée et son franchissement, à la fin de temporisation  $t_2$  – transfère le marquage entre les places  $P_3$  et  $P_4$ . Cette manière de représentation permet – par la structure  $P_3 - T_2 - P_4$  – la modélisation effective du transport des produits (David et al. 1992).

Si on amène les produits vers le système de transport par un manipulateur et l'opération de décharge est faite aussi automatiquement (avec un robot manipulateur, par exemple) la structure initiale (Fig.2) diffère à peu – près (Fig.4).

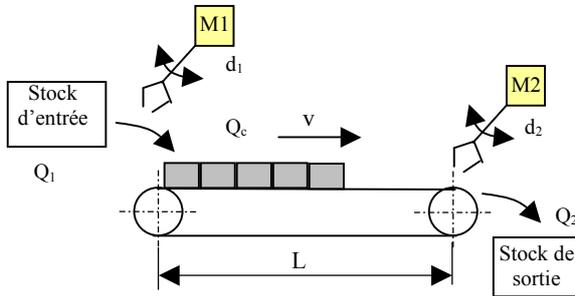


Fig.4 La structure modifié pour le système de transport

Le convoyeur de longueur  $L$  ayant un stock de capacité finie à l'entrée, assure le déplacement continu, sans accumulation - avec la vitesse  $v$  d'entraînement constante ou bien variable - des produits chargés par le manipulateur  $M1$  vers sortie. L'opération de transfert dans le dépôt final est faite par le manipulateur  $M2$ . On peut considérer les cadences de travail pour les deux manipulateurs égales ( $d_1 = d_2$ ) ou différentes ( $d_1 \neq d_2$ ). Le fonctionnement du convoyeur commence au moment où le premier produit est chargé, tandis que le système s'arrête après le stock d'entrée est vide (Drighiciu 2003).

Le modèle est représenté par un réseau hybride (Fig.5), avec deux structures particulières : une continue (les places  $P_7$  et  $P_8$  interconnectées par la transition  $T_5$ ) et l'autre discrète, composée par les places  $P_1, P_2, \dots, P_6$  et les transitions  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$ .

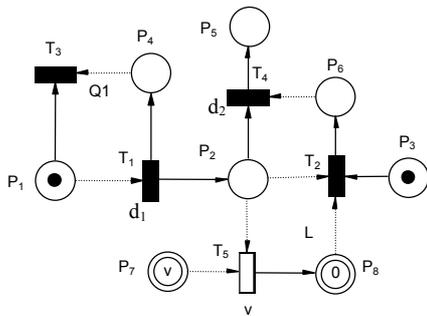


Fig.5 Le modèle hybride du système de convoyage

Le réseau de Petri (Fig.5) est non autonome car le franchissement des transitions se produit seulement si les restrictions (les conditions) imposées par le scénario de fonctionnement (représentées au niveau du réseau par les arcs de test) sont satisfaites. Le modèle présenté correspond à une situation normale de travail, sans considérer la présence d'aléas ou bien, les défauts et en l'absence des phénomènes d'accumulation. Ainsi, la place  $P_1$  avec le jeton dans l'état initiale correspond à la situation dans laquelle le manipulateur  $M1$  est prêt pour charger le convoyeur avec un seul produit extrait du stock d'entrée. La place  $P_2$  indique le numéro et la présence des produits sur la bande transporteuse, et, par son marquage non nul autorise le franchissement

continu de la transition  $T_3$  avec une vitesse égale à celle d'entraînement. Le jeton dans  $P_3$  permet l'exécution de  $T_2$ , après le premier produit arrive dans le champ opératoire du  $M2$ , au but de l'entière longueur –  $L$ . Le nombre des produits véhiculés entre les deux stock est indiqué par le marquage de la place  $P_4$ , qui autorise à un instant donné le franchissement de la transition  $T_5$  (l'occurrence de l'événement : «le manipulateur  $M1$  est arrêté»). La place  $P_5$  a comme correspondance le dépôt de sortie et son marquage offre une information sur le nombre des produits  $y$  présents. La place  $P_6$  indique, aussi – par son marquage – l'état opérationnel de  $M2$  qui transporte les produits (avec une cadence  $d_2$ ) vers le dépôt final. Les deux cadences de travail pour  $M1$ , bien que pour  $M2$  sont indiquées au niveau du réseau par les temporisations  $d_1$ , respectivement  $d_2$ . Le sous – réseau continu permet à suivre les paramètres cinématiques d'entraînement : le marquage de la place continue  $P_7$  contient la valeur de la vitesse -  $v$ , et la place continue  $P_8$  indique, par son marquage réel, l'espace linéaire –  $x$  ( $m_8 \equiv x = dv/dt$ ).

Pour la construction et la validation du modèle on a utilisé le logiciel Visual Object Net ++ , (Drath 1997), (Fig.6).

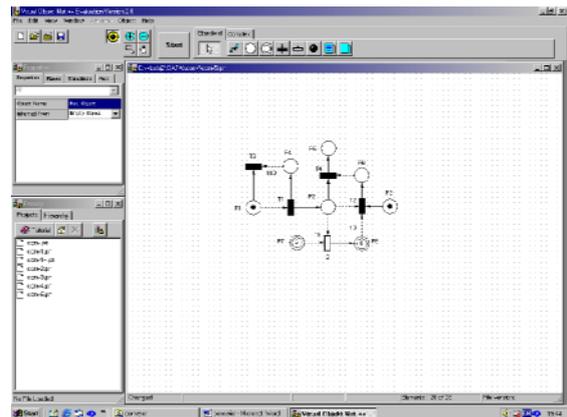


Fig.6 L'écran principal du logiciel Visual Object Net++

L'utilisation du logiciel permet une analyse quantitative du modèle hybride (Fig.7, Fig.8) pour des scénarios de fonctionnement différents. Ainsi, pour une longueur  $L = 10$  m, une vitesse d'entraînement constante de valeur  $v = 2$  m/s, pour une capacité  $Q_1 = 100$  pièces dans le dépôt d'entrée et en considérant les cadences opérationnelles égales  $d_1 = d_2$  le numéro total des produits existants sur le convoyeur reste constant jusqu'au moment où le stock d'entrée est nul (Drighiciu 2003).

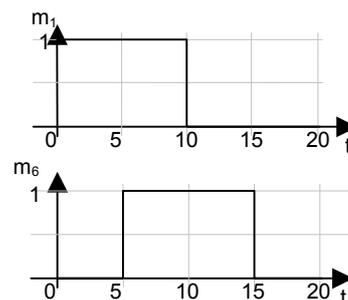


Fig.7 La variation du marquage des places  $P_1$  et  $P_6$

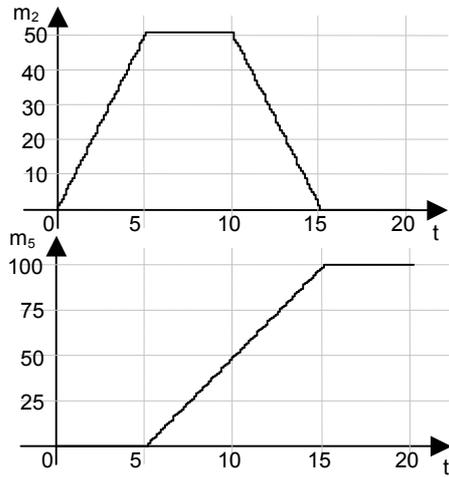


Fig.8 La variation du nombre des produits véhiculés par le convoyeur (le marquage de la place  $P_2$ ) et la variation des produits dans le stock de sortie

Si les conditions de transport changent (par exemple une faible vitesse d'entraînement et une valeur  $Q_c < Q_1$  pour la capacité du stock d'entrée, qui conduisent à l'apparition du blocage) la structure du modèle est aussi différente (Fig.9) et les résultats de la modélisation s'avèrent très intéressants (Drighiciu 2003).

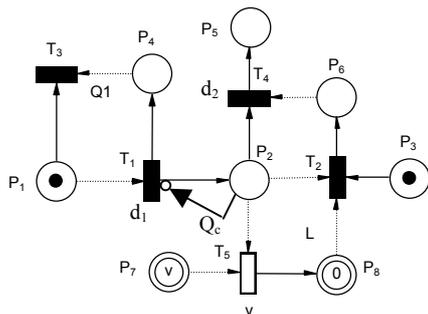


Fig.9 Réseau de Petri à arcs inhibiteurs qui modélise le système de convoyage mono produit pour une capacité de transport de celui – ci moins petite que celle du stock d'entrée ( $Q_c < Q_1$ )

Les quelques modèles présentés mettent en évidence le fait que les Réseaux de Petri hybrides ne suffisent pas à représenter les phénomènes d'accumulation, avec un temps de traversée des pièces sur un convoyeur qui est fonction des variations de la vitesse d'entraînement et des cadences des machines. De plus, la position du front d'accumulation sur les convoyeurs à accumulation est difficile à établir. Or c'est une information indispensable pour introduire le modèle des capteurs, et établir ainsi un lien avec la partie contrôle, mais aussi pour connaître à tout instant le niveau des stocks et en déduire les performances globales du système de production.

Les Réseaux de Petri lots, apparus en 1992, étendent les réseaux hybrides, introduisant une spécification pour un nouveau type de nœud, le nœud lot. Ainsi, ils permettent (par leur formalisme et leur dynamique hybride – à événements discrets et à temps continus) de connaître à tout instant la position des fronts

d'accumulation et l'état global du système. Ils autorisent une analyse quantitative via la simulation, des systèmes de production à haute cadence, dont la rapidité d'exécution ne dépend pas du temps réel pendant lequel le procédé est analysé (pas d'avancement temporel fonction d'une horloge), mais seulement du nombre d'événements significatifs qui s'y passent.

Les pièces circulant dans un système de production à haut cadence (débit) ne sont plus considérées individuellement mais comme un flux de produits. Les systèmes de transport entre machines sont, la plupart du temps, des convoyeurs multibandes, unidirectionnels, à grande capacité de stockage, transportant par friction des pièces identiques. Le flux de produits est conditionné par la vitesse d'entraînement et les débits d'entrée et de sortie. Afin d'optimiser la quantité d'information traitée, tous les éléments du flux ayant le même comportement dynamique sont regroupés dans un même concept hybride, appelé lot. Ainsi, un lot cohérent interne ( $LCIn_c$ ), est défini comme un ensemble de pièces ayant les mêmes caractéristiques de répartition sur le convoyeur  $C$  pendant un intervalle de temps (Fig10), (Demongodin 1994), (Zaytoon 2001).

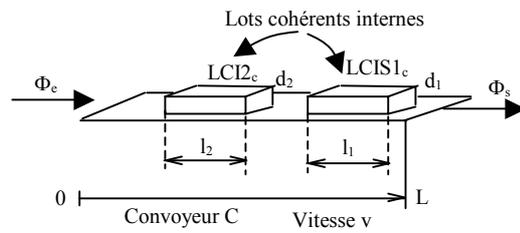


Fig.10 Lots cohérents internes

L'état d'un lot se caractérise par une longueur  $l_n$ , une densité  $d_n$ , une coordonnée  $x_n$  et la date  $t$  à laquelle il se trouve à cette coordonnée ( $LCIn_c(t) = [l_n(t), d_n(t), x_n(t)]_c$ ). Le convoyeur, à son tour, est caractérisé par sa longueur, sa capacité maximale, sa vitesse d'entraînement et par son flux d'entrée et son flux de sortie ( $C: L, C_{max}, V, \Phi_e, \Phi_s$ ). On appellera lot de sortie, noté  $LCIS$ , le lot dont sa coordonnée  $x$  est égale à la longueur du convoyeur.

Les pièces étant modélisées par la notion de lot continu, le convoyeur contient donc à un instant donné  $t$  une suite de lots ordonnés sur leur position. Ainsi, l'état du système de transport entre les machines est défini par les caractéristiques des convoyeurs et par les caractéristiques de leurs lots cohérents internes.

A partir de ces définitions de base, les états des lots et leur dynamique permettent de déduire les régimes possibles du convoyeur: régime accumulé ou non accumulé: ce dernier est également appelé régime libre. L'aspect hybride est défini sur les lots par un avancement temporel de type événementiel et par des équations continues de dévolution. Le formalisme de cette dynamique hybride d'évolution prend en compte l'état des éléments de transport, les variations des vitesses d'entraînement et des cadences des machines qui peuvent intervenir à tout moment, et considère aussi les connexions amont et aval avec les autres éléments de production composant la ligne.

Les réseaux de Petri lots introduisent dans les réseaux de Petri hybrides un nouveau type de place – la place lot, et un nouveau type de transition – la transition lot (Fig. 11), (Alla et al. 1992), (Demongodin 1994).

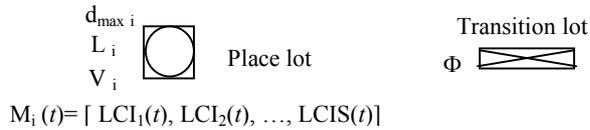


Fig. 11 Nouveaux types de nœuds dans un Réseau de Petri lot

A ces deux types de nœuds sont associées des caractéristiques intrinsèques représentant les caractéristiques d'un convoyeur ou d'un tronçon de convoyeur: une densité maximale, une longueur, une vitesse pour la place lot et un flux maximal pour la transition lot.

Avec un formalisme déjà bien répandu, on peut définir un réseau lot temporisé (Demongodin 1994) par un ensemble  $RPL = \langle RP, f, c, Tempo, \mathbf{M}_0 \rangle$  tels que: a)  $RP = \langle P, T, Pre, Post \rangle$  est un réseau de Petri où  $P$  est un ensemble de places et  $T$  un ensemble de transitions, avec  $P \cap T = \emptyset$  et  $P \cup T \neq \emptyset$ ,  $Pre(P_i, T_j)$  est la fonction d'incidence avant et  $Post(P_i, T_j)$  la fonction d'incidence arrière, b)  $f : P \cup T \rightarrow \{D, C, L\}$ , appelée fonction lot, indique pour chaque nœud s'il est discret, continu ou lot, c)  $c : P \rightarrow \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+$  avec  $f(P) = L; P_i \rightarrow \{V_i, d_{max i}, L_i\}$  – la fonction caractéristique, qui associe à chaque place lot trois valeurs continues et constantes: une vitesse d'entraînement, une densité maximale et une longueur, d)  $Tempo$  est l'application qui associe à chaque transition une valeur temporelle: si  $f(T_j) = D$ , alors  $Tempo(T_j) = d_j$  – durée associée à la transition discrète  $T_j$ , exprimée en unités de temps, si  $f(T_j) = C$  ou  $L$ , alors  $tempo(T_j) = \Phi(T_j) = \Phi_j$  – flux maximum associé à la transition  $T_j$ , exprimée en unité de marques / unités de temps, e)  $\mathbf{M}_0$  est le marquage initial. Ainsi, le marquage d'un Réseau de Petri lots est défini à travers un ensemble de lots cohérents internes pour une place lot, un nombre entier pour une place discrète et un nombre réel positif pour une place continue. La notion de temps est représentée sur les transitions. Plus précisément, un délai  $d$  (unités de temps) est associé à chaque transition discrète, tandis qu'un flux maximal d'écoulement  $F$  (pièces / unité de temps) est associé à chaque transition continue et lot. L'état global du système est défini par le régime des places lots et le marquage des places discrètes, continues et lots du réseau (Demongodin 2001).

L'évolution d'un réseau de Petri lots se fait par franchissement des transitions discrètes, continues et lots. Les conditions de validation prennent en compte l'état du marquage des places continues et discrètes. Les notions de transitions fortement et faiblement validées sont reprises et étendues pour une transition lot, en sachant que les conditions de validation d'une transition lot dépendent essentiellement des caractéristiques des lots cohérents internes constituant le marquage de la place lot. Plus précisément, une condition nécessaire de

validation d'une transition lot est que chacune de ses places lots amont doit comporter un lot de sortie. Pour le franchissement des transitions discrètes et continues, on enlève et on ajoute des marques (réels ou entières) à leurs places discrètes ou continues amont et aval, alors que pour le franchissement d'une transition lot, des lots sont créés ou supprimés à l'intérieur des places lots.

Ainsi, pour la structure classique du système de transport (Fig.2), pour le même scénario de fonctionnement, on peut représenter un modèle Réseau de Petri lots (Fig.12),(Zaytoon 2001).

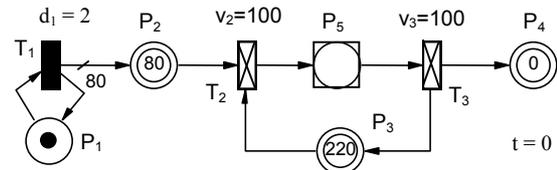


Fig. 12 Réseau de Petri lots modélisant un scénario de fonctionnement pour le système de transport (Fig.2)

Les capacités de stockage pour les deux dépôts  $B_1$  et  $B_2$  (voir Fig.2) sont supposées infinies et on dépose 80 pièces dans  $B_1$  toutes les 2 minutes, à partir de  $t = 0$ . Le convoyeur a une longueur de 11 m et une vitesse de 5 m / min. Ainsi, on peut mettre au plus 20 pièces / m sur le convoyeur. Le comportement des transitions lots  $T_2$  et  $T_3$  est similaire à celui d'une transition continue (flux continu représenté par une vitesse de franchissement quand cette transition est validée). La vitesse maximale associée à ces transitions est :  $v_2 = v_3 =$  vitesse du convoyeur  $\times$  densité maximale =  $5 \times 20 = 100$ . Le marquage d'une place lots est défini par un ensemble de lots, chaque lot étant défini par trois paramètres. La place continue  $P_3$  représente la place disponible sur le convoyeur. Quand le convoyeur est vide,  $m_3 =$  longueur du convoyeur  $\times$  densité maximale =  $11 \times 20 = 220$ . Enfin, la définition d'un lot à un instant  $t$  comporte sa longueur, sa densité et la position de la tête de lot sur le convoyeur :  $Lot_i = (longueur_i(t), densité_i(t), x_i(t), t)$ .

Au début (à  $t = 0$ ) les 80 pièces représentées par  $m_2$  entrent sur le convoyeur à la vitesse maximale ( $v_2 = V_2 = 100$ ), les marquages  $m_2$  et  $m_3$  décroissent à la vitesse 100 ; le marquage  $m_5$  est constitué du lot  $L_1 = (5t, 20, 5t, t)$ , c'est – à – dire que sa densité est 20 (maximale) et que sa longueur augmente avec le temps comme la position de sa tête. Ceci dure jusqu'à  $t = 0,8$  (Fig. 13).

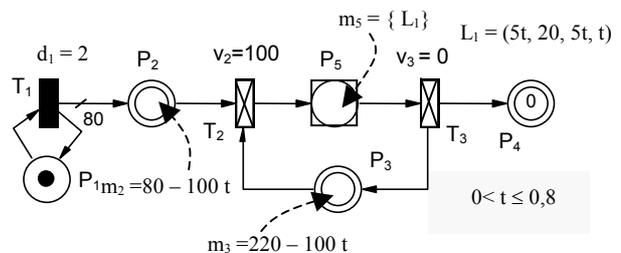


Fig. 13 Evolution du Réseau de Petri lots pour  $0 < t \leq 0,8$

Après  $t = 0,8$ , les 80 pièces du lot  $L_1$  sont sur le convoyeur et se déplacent sur celui – ci :  $m_2 = 0, m_3 =$

ct. = 140, le seul paramètre qui évolue est la tête de lot ( $x_1 = 5t$ ), (Fig.14),(Zaytoon 2001).

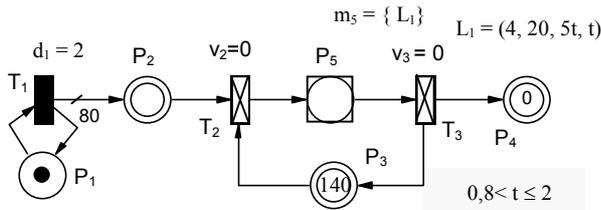


Fig.14 Evolution du Réseau de Petri lots pour  $0,8 < t \leq 2$

A  $t = 2$ , la transition  $T_1$  est franchie : le jeton est retiré de  $P_1$ , 80 marques sont déposées dans  $P_2$ , un nouveau jeton est déposé dans  $P_1$  (qui valide à nouveau  $T_1$  pour un autre franchissement à  $t = 4$ ), (Fig.15).

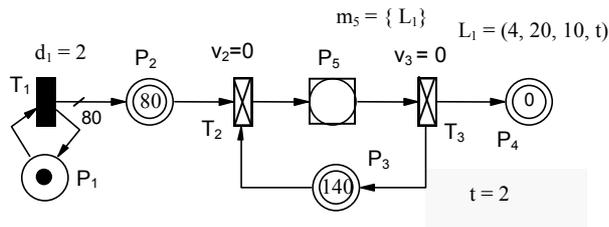


Fig.15 Evolution du Réseau de Petri lots pour  $t = 2$

Après  $t = 2$ ,  $m_5 = \{L_1, L_2\}$  avec  $L_1 = (4, 20, 5t, t)$  et  $L_2 = (5(t - 2), 20, 5(t - 2), t)$  : c'est - à - dire que le premier lot de longueur 4 continue à progresser vers la droite et qu'un deuxième lot est en train de se constituer (Fig.16), etc (Zaytoon 2001).

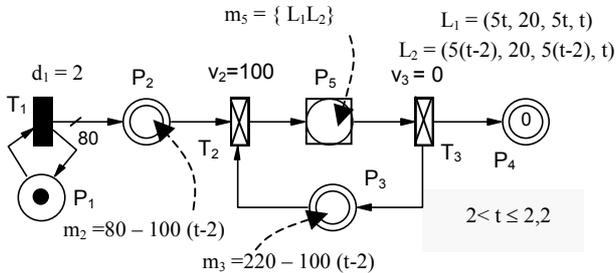


Fig.16 Evolution du Réseau de Petri lots pour  $2 < t \leq 2,2$

Dans l'exemple présenté, la vitesse du convoyeur est constante. On peut très bien avoir une vitesse variable dans le temps. Quand la vitesse du convoyeur change, les vitesses maximales des transitions - lots correspondants changent aussi.

Une transition - lots correspondant à une sortie de convoyeur peut n'être pas validée pour une raison autre que l'absence de lot à cet endroit. Dans ce cas, on a accumulation des pièces, fait qui peut conduire à une variation de la densité d'un lot.

#### 4. CONCLUSIONS

Les systèmes de production à hautes cadences possédant des éléments de transfert et d'accumulation nécessitent des modèles de comportement spécifiques.

Leur grande productivité les rend particulièrement sensibles aux perturbations, qui ralentissent lourdement leurs performances. Les pannes les plus influentes sont les pannes courtes parce qu'elles sont très nombreuses. Il est donc nécessaire d'améliorer les lois de commande et le positionnement des capteurs de la chaîne pour la rendre moins sensible à ces pannes. Comme il n'existe pas de solution analytique, les modèles et les logiciels de simulation se révèlent indispensables (Demongodin 1994).

Dans ce contexte, les Réseau de Petri hybrides et leurs extensions - Réseaux de Petri lots sont des outils de modélisation bien adaptés à ces systèmes. Ainsi, ils modélisent le système physique de façon très naturelle et précise, par opposition avec certains simulateurs actuelles (cellules, temps discontinu etc.) étant très compactes (Zaytoon 2001). Aussi, leur dynamique est basée sur un principe événementiel en ne calculant les états du système qu'aux instants où il subit une discontinuité : apparition, disparition d'un lot, changement de vitesse ou de régime d'un convoyeur. Enfin, l'existence du modèle mathématique, comme base de l'outil de conception et de simulation permet de construire des logiciels efficaces dans un domaine où il n'existait pas jusqu'à maintenant d'équivalent.

Dans le formalisme des Réseau de Petri lots, les notions de pannes aléatoires n'ont pas encore été introduites. Une première extension des réseaux de Petri hybrides intégrant l'aspect stochastique dans la partie discrète du réseau a été déjà étudiée (Dubois et al. 1993). Il serait envisageable de prendre en compte l'aspect stochastique dans les réseaux de Petri lots, afin de représenter les aléas de fonctionnement.

#### 5. BIBLIOGRAPHIE

- Alla, H., Cavaille, J.-B., Le Bail, J., Bel, G., Les systèmes de production par lot : une approche discret - continu utilisant les réseaux de Petri hybrides, Symposium ADPM'92, Paris, Janvier, 1992.
- David, R., Alla, H., *On Hybrid Petri nets*, Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, No.11, p.9 - 40, 2001.
- Demongodin, I., Les Réseaux de Petri lots : Modélisation des systèmes de production à haute cadence en régime transitoire, Thèse, Université de Montpellier II / LIRM, janvier, 1994.
- Demongodin, I., Generalised Batches Petri Net: Hybrid model for high speed systems with variable delay, Journal of Discrete Event Systems: Theory and Applications, vol11, p. 137 - 162, 2001.
- Drath, R., *Objektorientierte Modellierung hybrider Prozesse*, Vorstellung eines neuen Werkzeuges, 42, IWK, TU Ilmenau, 1997, Bd.3, p.533 - 540.
- Drighiciu, M.A., *Studiul sistemelor electromecanice utilizând Rețele Petri*, Teză de doctorat Universitatea din Craiova, 2003.
- Dubois, E., Alla, H., Hybrid Petri Nets with a stochastic discrete part, European Control Conference, P.144 - 149, 1993.
- Zaytoon, J., *Systèmes dynamiques hybrides*, Hermes, Paris 2001.