

Evaluation des performances d'une unité de production de semoule par : Réseaux de Petri hybrides

SAIT. BELKACEM

Laboratoire d'Automatique de Sétif

Département d'Electrotechnique

Université Ferhat ABBES Sétif

Sait_belkacem19@yahoo.fr, <http://www.univ-setif>

Résumé- De nombreux procédés industriels sont des systèmes dynamiques hybrides (SDH) par nature, ce qui signifie que leur comportement résulte de l'évolution et de l'interaction de variables continues et de variables discrètes. Ces systèmes sont classiquement constitués de processus continus interagissant avec (ou supervisés par) des processus discrets. Les objectifs que l'on peut assigner à l'étude des SDH consistent à apporter une solution en terme de modèle, de méthode de performance et en particulier les fonctions commande et surveillance. Nous nous intéressons dans cet article à la modélisation et l'analyse des Systèmes Dynamiques Hybrides à dominante événementielle. L'approche de modélisation est basée sur l'utilisation des réseaux de Petri hybrides (RdPH). La méthode est illustrée sur un exemple industriel : une unité de production de semoule.

Mots clés : Modélisation, Systèmes dynamiques hybrides, Réseaux de Petri hybride, Evaluation de performance.

I. INTRODUCTION

Les systèmes dynamiques sont généralement continus ou discrets ou les deux à la fois. Les Systèmes Dynamiques Continus (SDC) ont des variables qui ont un comportement continu dans le temps (tension, courant, vitesse, couple....). Ils sont souvent modélisés par des équations différentielles ou équations d'états ou fonctions de transferts. Les systèmes basés sur les principes de la physique sont des systèmes dynamiques continus. Pour les systèmes Dynamique Discrets (SDD), l'espace des variables des sorties est un ensemble discret de valeur booléenne (états ouverture / fermeture d'un interrupteur, nombre d'interrupteurs ouverts/fermés simultanés dans un convertisseur statique, nombre d'impulsions pour la commande des interrupteurs). Les modèles classiques utilisés pour les (SDD) sont: les réseaux de Petri, les automates, les réseaux de file d'attente et le Grafset.

Les systèmes incluant les deux caractéristiques continues et discrètes sont appelés les Systèmes Dynamiques Hybrides. Sous une forme très simplifiée, un SDH comporte deux sous ensembles, un bloc continu, un bloc discret :

- le bloc continu symbolise l'évolution dynamique de l'état continue.
- le bloc discret présente le système à événement discret il reçoit des événements internes, externes et condition.

Tout procédé comprend ces deux caractéristiques, c'est l'utilisateur en fonction de son point de vue qui opère un choix. Donc il existe divers modèles de même procédé correspond à divers systèmes. Si les techniques de modélisation des systèmes continus et discrets sont connues. Pour les systèmes dynamiques hybrides un outil unifié de modélisation est nécessaire pour:

- Comprendre et assurer la consistance de l'interaction des deux parties, continue et discrète du système hybride.
- Aider à la conception, à la surveillance et au développement de la commande;
- Simplifier la simulation et mener des analyses formelles plus précises.

La modélisation : cherche à formaliser des modèles précis qui peuvent décrire le comportement riche et complexe des SDH. Ce domaine a reçu l'attention des chercheurs et plusieurs formalismes ont été proposés afin d'établir un modèle homogène permettant la conciliation entre les parties discrètes et continues. Dans Chombart [11], les approches de modélisation des systèmes dynamiques hybrides sont classées en trois classes principales à savoir:

- L'approche discrète, consistant à approximer les dynamiques continues à se ramener à un système à événements discrets,
- L'approche continue, consistant à approximer les dynamiques discrètes par des systèmes continus afin d'utiliser la théorie des systèmes continus,
- Enfin la troisième approche est celle qui considère à la fois les comportements continus et discrets dans une même structure. L'intérêt de cette dernière approche réside dans le fait qu'elle ne fait aucune abstraction d'information concernant le système à étudier, c'est cette approche qui est retenue pour notre étude.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la méthode de modélisation et l'analyse des systèmes hybrides à dominante événementielle basées sur l'utilisation des réseaux de Petri. La méthode est illustrée sur un exemple industriel tel que l'unité de production de semoule.

II. OUTIL DE MODÉLISATION

Le couplage d'un modèle en RdP avec une représentation d'activité continue à été étudié par plusieurs auteurs.[7] ont modifié la théorie de base en ajoutant de nouvelles places et de nouvelles transitions destinés à représenté l'évolution linéaire ou exponentielle d'une variable continue . L'objectif initial du RdP continu était de diminuer la taille des modèles classiques lorsque le nombre de jeton devenait trop important et de raisonner en termes de flux. [8] ont étendu cette approche à des systèmes caractérisés par des phénomènes d'accumulation de pièces et régit par des lois de comportement des places dont les transitions sont contrôlées par le calcul d'une équation d'état. Dans les travaux de Le Bail, Alla et David [1], [3], [4] et [6], ils ont développé à partir des RdP continus les *RdP hybrides*. Ces réseaux contiennent des places et des transitions discrètes (représentées graphiquement avec un contour simple) et continues (représentées avec un contour double). Ainsi, la partie continue permet de modéliser les flux continus et la partie discrète les fonctionnements logiques (vanne ouverte/fermée). Au niveau de l'interface continu/discret et afin de garantir que le marquage des places discrètes reste entier, tout arc connectant une place discrète et une transition continue doit avoir son arc réciproque.

L'outil de modélisation proposé est les Réseaux de Petri Hybride temporisés (RdPHT). Le Réseau de Petri Hybride temporisés est une extension des réseaux Petri qui intègre deux types de RdP: Un réseau de Petri continu modélise l'évolution de l'état continu du SDH et un réseau de Petri temporisés modélise l'évolution de la variable discrète du SDH.

III. RÉSEAUX DE PETRI HYBRIDE

Dans le but de fournir un modèle basé sur les réseaux de Petri permettant la modélisation homogène des systèmes physiques réunissant à la fois une partie continue est une partie discrète, Les réseaux de Petri hybrides ont été définis, [4], [7]. Un modèle autonome de réseaux de Petri hybride a été défini, mais la notion d'autonomie est insuffisante pour des système réels, car la variable temps intervient toujours dans le fonctionnement des ces systèmes. Il était donc nécessaire d'ajouter cette variable au modèle autonome. Ainsi les RdP hybrides temporisés ont été définis. On considère uniquement le RdP hybride dont les temporisations sont associées aux transitions.

A. Définitions et notations

Définition 1 : Un RdP hybride marqué temporisé, appelé simplement RdP hybride [6], est un 7-uplet

$R_H = (P, T, h, Pré, Post, tempo, M_0)$ tel que :

- P et T sont, respectivement, les ensembles finis et non vides des places et des transitions, tels que $P \cap T = \emptyset$,
- $h: P \cup T \rightarrow \{C, D\}$, appelée fonction hybride, indique pour chacun des nœuds s'il s'agit d'un nœud discret (D) ou continu (C),
- $Pré$ est l'application d'incidence avant, telle que :

$$Pré : P \times T \rightarrow N \quad si \quad h(P) = D$$

$$Pré : P \times T \rightarrow R^+ \quad si \quad h(P) = C$$

- $Post$ est l'application d'incidence arrière, telle que :

$$Post : P \times T \rightarrow N \quad si \quad h(P) = D$$

$$Post : P \times T \rightarrow R^+ \quad si \quad h(P) = C$$

- $Tempo : T \rightarrow R^+$ associe à chaque transition T_j un nombre réel positif d_j tel que :

La temporisation associée à une D-transition T_j vaut d_j .

La vitesse maximale de franchissement associée à une C-transition T_j vaut $V_j = 1/d_j$.

- M_0 est le marquage initial, $M_0 = (M_0^D, M_0^C)$ avec M_0^D est le marquage initial des places discrètes et M_0^C est le marquage initial des places continues.

Les fonctions Pré et Post doivent vérifier le critère suivant : si P_i et T_j sont une place et une transition telles que :

$$h(P_i) = D \text{ et } h(P_i) = C, \text{ alors nous avons aussi } Pré(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j).$$

Le critère donné dans la définition assure que le marquage des places discrètes (D-places) reste entier quelle que soit l'évolution se produisant.

Nous pouvant aussi définir la matrice d'incidence associée à un RdP hybride de la manière suivante :

$$W = [W_{ij}], \text{ tel que : } W_{ij} = Post(P_i, T_j) - Pré(P_i, T_j)$$

Il est possible, sans modifier la structure du réseau, de numéroter les places et les transitions du réseau de façon à ce que toutes les places discrètes aient un indice plus petit que celui des C-places et que toutes les transitions discrètes aient un indice inférieur à celui des C-transitions.

De cette façon, la matrice d'incidence peut être représentée de la manière suivante :

$$W = \begin{bmatrix} W^D & 0 \\ W^{CD} & W^C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le marquage $M(t)$ à instant t donnée peut être déduit à partir du marquage $M(0)$ en utilisant l'équation fondamentale suivante.

$$M(t) = \begin{bmatrix} M^D(t) \\ M^C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^D(0) \\ M^C(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W & 0 \\ W^{CD} & W^C \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} \sigma(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} 0 \\ \nu(u) \end{bmatrix} du \right) \quad (2)$$

$M^D(t)$ et $M^C(t)$ sont, respectivement, le marquage discret et le marquage continu à l'instant t . $M^D(0)$ et $M^C(0)$ sont,

respectivement, le marquage initial des D-places et des C-places.

Dans l'équation, $\sigma(t)$ représente le nombre de fois que chaque D-transition est franchie (interprétation discrète) entre l'instant initial et l'instant t . Les composantes associées aux C-transitions sont nulles. Les composantes du vecteur $v(u)$ représentent les vitesses instantanées associées aux C-transitions. Les composantes de $v(u)$ associées aux D-transitions sont nulles.

L'état d'un RdP hybride est défini par son marquage. Pour un RdP temporisé (hybride ou non), le marquage M se décompose en $M=M^r+M^n$ où M^r et M^n sont respectivement le marquage réservé et le marquage non réservé du réseau. Seul le marquage non réservé M^n est pris en compte pour la validation des transitions. De plus les vitesses de franchissement des C-transitions se déduisent de ce marquage non réservé. Un état n'a pas de durée puisque le marquage est placé varie continûment. Cependant, il existe des intervalles pendant lesquels le marquage des D-places et les vitesses de franchissement des C-transitions restent constants. Nous pouvons définir un état comportemental invariant appelé IB-état.

Définition 2: Une D-transition T_j est validée à l'instant t si chacune des places P_i de 0T_j vérifie :

$$M^n(P_i) \geq \text{Pré}(P_i, T_j)$$

Notons que cette définition ne fait pas de différence sur la nature de la place P_i (qui peut être soit une D-place, soit une C-place).

Définition 3 : Une C-transition T_j est validée à l'instant t , si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- 1) Pour chaque D-place P_i de 0T_j , $M^n(P_i) \geq \text{Pré}(P_i, T_j)$.
- 2) Pour chaque C-place de 0T_j , $M^n(P_i) \geq o$, ou P_i est alimentée.

Une C-transition qui est validée peut être fortement validée, soit faiblement validée. Elle est fortement validée si chaque C-place de 0T_j est telle que $M^n(P_i) \geq o$, sinon elle est faiblement validée.

Le vecteur d'évolution d'un RdP hybride est le vecteur composé du :

- Vecteur de validation des D-transitions,
- Vecteur des dynamiques des C-places.

Définition 4 : L'IB-état d'un RdPH correspond à un intervalle de temps tel que :

- Le marquage des D-places est constant.
- Le vecteur de validation e^D des D-transitions est constant
- Le vecteur vitesse instantanée des C-transitions est constant.
- Lorsque un IB-état est obtenu, M^C a toujours la même valeur à l'entrée de l'IB-état.

B. Graphe d'évolution

L'état d'un réseau de Petri discret temporisé est défini par le marquage des places et les durées résiduelles associées aux marques réservées [6]. L'état d'un RdPCC est défini par son marquage qui implique un vecteur vitesse de franchissement

instantané (de manière univoque s'il n'a pas de conflit effectif). Le graphe d'évolution d'un RdPCC est représenté par des nœuds correspondant à un vecteur vitesse instantané constant.

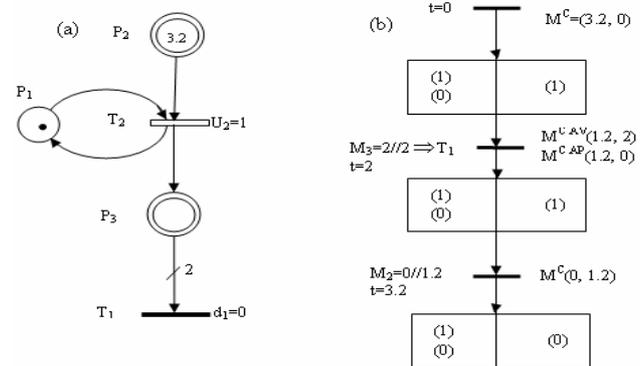


Fig. 1. (a) Réseaux de Petri hybride
(b) Graphe d'évolution RdPH.

Le graphe d'évolution d'un RdPH peut être représenté par des nœuds correspondant aux IB-état (état comportemental invariant ou terme venant de l'anglais « Invariant Behavior State ») et par les transitions entre ces nœuds comme montre la figure suivante.

IV. EXEMPLE : LA SEMOULERIE

Le passage du blé à la semoule se fait successivement en quatre étapes principales suivantes :

- 1) Le pré nettoyage;
- 2) Le nettoyage;
- 3) La mouture;
- 4) L'ensachage des produits finis.

A. Description de fonctionnement de la partie mouture

La mouture est l'activité de base dans l'ensemble des activités d'une semoulerie, c'est à travers cette opération qu'on passe du blé nettoyé à la semoule. Différents équipements sont nécessaires pour effectuer cette opération :

1). Les brosses SR

Elles effectuent la première opération de la partie mouture, chaque brosse est sous forme d'un cylindre creux avec un vis tournant à l'intérieur permettant le passage du blé à travers ses trous pour le séparer de son enveloppe extérieure.

2). Le tarare TR

Le tarare est une machine destinée à la séparation des refus légers (enveloppes), son principe est basé sur la vibration assurée par deux moteurs vibreurs et un courant d'air qui en circulant, sépare le blé des refus légers.

3). Les appareils à cylindres RM

Le nombre de ces appareils dépend de la productivité de chaque semoulerie. Ils se différencient au niveau des caractéristiques des cylindres, c'est-à-dire l'inclinaison et la profondeur des cannelures sur leurs surfaces latérales, et la vitesse de rotation des cylindres qui est obtenue par

l'alimentation d'un moteur pour chaque deux cylindres. Chaque appareil RM constitue de: deux cylindres, un bac et un distributeur.

4) Les plansichters SF

Le Plansichter est forme d'un cube équipé d'une série de tamis superposés en nylon ou en métal permettant de tamiser le produit venant directement des broyeurs.

5) Les sasseurs SD

Ils effectuent l'opération primordiale dans le processus de l'extraction de la semoule, leur rôle est de sélectionner la semoule propre en deux qualités de semoule courante et supérieur, et le son.

6) Le détacheur DS

Le rôle des détacheurs qui ressemble à des brosses est de détacher le produit dans ces dernières étapes (farine) puisqu'il devient très fins et se colle facilement.

7) Le vibreur AV

C'est un appareil très utilisé surtout dans les minoteries, son rôle est de décoller le produit venant du filtre par son mouvement vibratoire.

B. L'enchaînement des différentes étapes de mouture.

D'après la figure 2, le blé nettoyé passe tout d'abord à la brosse, ou il sera débarrassé de son enveloppe extérieur à l'aide de sa vis tournante à une très grande vitesse, plus l'effet du passage à travers le grillage du cylindre creux, au tarares où se fait une séparation de l'amande des enveloppes par l'effet de vibration et de l'air qui y circule. L'amande vêtus est prête à être broyée et le blé passe au broyage qui se fait au niveau du première étage, où on trouve les appareils à cylindres, divisées selon les caractéristiques des cannelures en broyeurs et convertisseurs: les broyeurs effectuent le broyage des grosses particules du blé tandis que les convertisseurs font la mouture à ces dernières étapes c'est à dire quand les particules de blé deviennent de plus en plus petites. A la sortie de chaque broyeurs, le produit sortant est récolté et canalisé dans des tuyaux à transport pneumatique au quatrième étage où se trouve des cyclones reliées à des écluses au niveau desquelles se fait la séparation de l'air du produit, l'air passe ensuite par un filtre avant d'être évacué à l'extérieur. Chaque écluse est reliée a une porte bien déterminée des plansichters à l'étage qui vient juste après (troisième étage); à ce niveau le produit subira une séparation selon l'ouverture des mailles des différents tamis superposés. Le refus de chaque série de tamis est canalisé à un sasseur bien déterminé et le produit passant à travers tous ces tamis, soit environ 12% du produit entrant, est récolté par une vis sous forme de farine désignée par la SSSF (semoule sasseé super fine). La farine passera par le détacheur puis à l'ensachage. La partie de produit qui reste passera au sasseur et elle sera divisée en plusieurs qualités à l'aide des tamis et l'air qui y circule, comme par exemple : 40% en semoule courante SC, 35% semoule supérieur SS, et 5% en son (enveloppe); et 20% non déterminé passera au broyeur suivant jusqu'au dernier convertisseur.

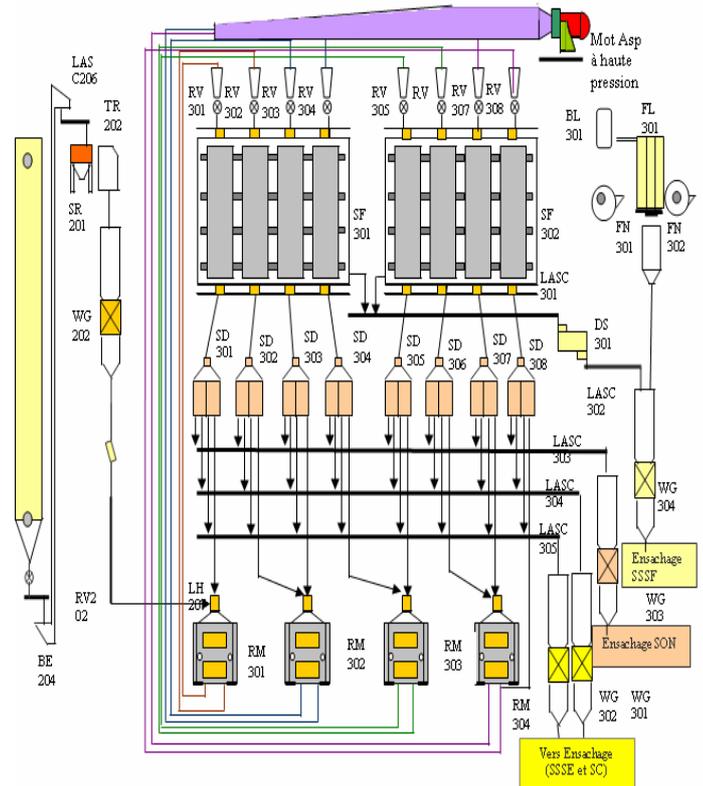


Fig.2. Schéma synoptique de la semoulerie.

C. Modélisation de l'unité de production de semoule.

La figure 3, représente le modèle RdPH de fonctionnement d'une semoulerie.

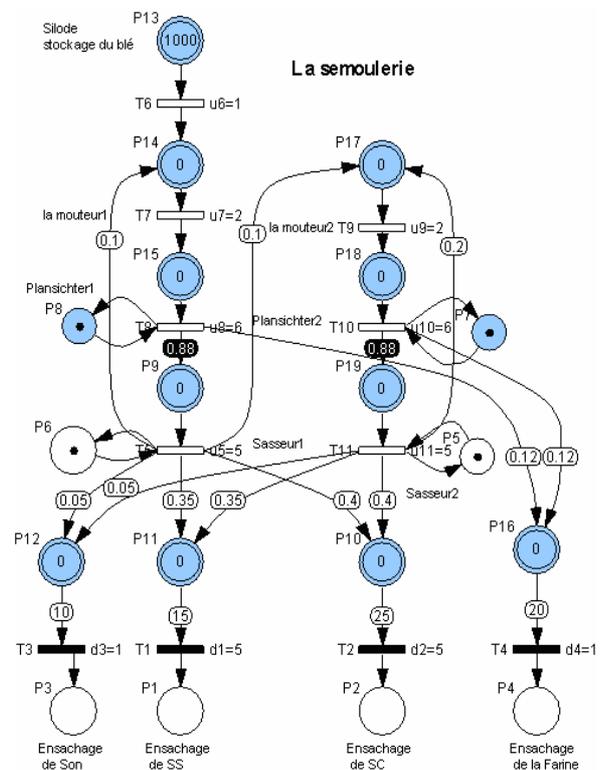


Fig. 3. Modèle RdPH du fonctionnement de la semoulerie.

La place P_{13} représente le silo de stockage du Blé ce dernier va se transformé en quatre types de produits : la farine, le semoule courant, le semoule supérieur et le son selon un pourcentage indiquée par les poids associées aux arcs entrant aux places P_{10} , P_{11} , P_{12} , et P_{16} , qui donne respectivement la quantité de semoule courant, de semoule supérieur, du son et de la farine qui sera met dans des sacs contenant respectivement 25 kg, 15 kg, 10 kg, et 20kg, indiquée par les poids associée aux arcs entrants aux transitions suivantes T_1 , T_2 , T_3 et T_4 qui représentent le système d'ensachage du produit. La transformation du Blé s'effectue à travers la mouture, le plansichter, la sasseur, indiqué la les transitions T_6 , T_7 , T_8 , T_5 , T_{10} et T_{11} . Chaque transition du modèle représente le fonctionnement d'un élément de la semoulerie, cet élément peut être en service ou en arrêt ou bien en maintenance qui peut être représenté par le RdPH élémentaire pour les éléments de transformations du produit figure 4.

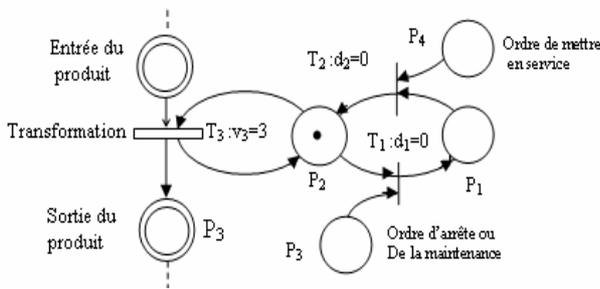


Fig. 4. Modèle de la transformation du produit.

V. LA SIMULATION

La simulation du RDPH de l'unité de production de semoule a été réalisée sous le logiciel SYRPHICO (Simulateur de RdP Hybrides et Continus).

Considérons une quantité par exemple de 1000 Kg de Blé, elle sera transformé en quatre types de produit selon les pourcentages de transformations du blé indiqués précédemment comme suit :

- Une quantité de 145,63 Kg de la farine donne 7 sacs de farine de poids 20 Kg et 5.63 Kg reste dans le stock WG 304 comme indique la figure 5.a.
- Une quantité de 427.19 Kg de semoule courant donne 17 sacs de semoule courant de poids 25Kg et 2.19 Kg reste dans le *WG 302* comme montre la figure 5.b.
- Une quantité de 373.8 Kg de semoule supérieur donne 24 sacs de semoule supérieure de poids 15 Kg et 13.8. Kg reste dans le stock *WG 301* comme montre la figure 5.c.

Une quantité de 53.4 Kg de son qui correspond à 5 sacs de son de poids 10kg et 3.4 kg reste dans le stock *WG 303* comme montre la figure 5.d.

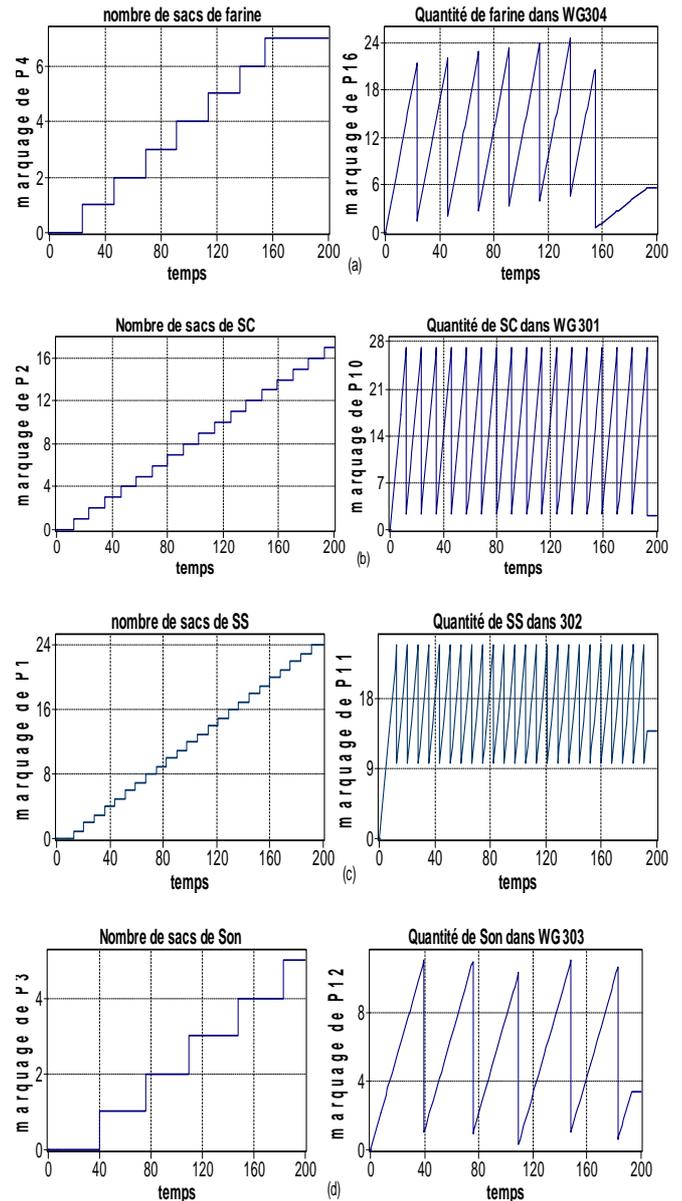


Fig.5. Les résultats de simulation du RdPH de la semoulerie.

La figure 5 montre l'évolution des produits dans les stocks d'entrées et de sorties des balances de chaque produit. D'après les résultats on constate la durée de transformation du blé est de 200 unités de temps. Et durant 50 unités de temps on peut obtenir : un sacs de la farine de 20kg et 3 sacs de 25Kg de la semoule courante et deux sacs 10Kg de son et enfin 2 sacs de 15 Kg de la semoule supérieur. Nous pouvons remarqué qu'après un régime transitoire, nous obtenons un régime stationnaire : Pour le marquage de P_{14} , nous retrouvons une période de 30 unités de temps, pour le marquage de P_8 , nous retrouvons une période de 10 unités de temps. Ces résultats sont obtenus pour un fonctionnement donné se seront utilisé dans l'approvisionnement de l'unité de production.

CONCLUSION

Les Réseaux de Petri Hybrides sont très bien adaptés pour modéliser et analyser les comportements normale et défaillant des systèmes dynamiques hybrides. Ils

permettent de représenter les aspects continus et discrets et leurs interactions du SDH, son évolution permet de déterminer le comportement précis du système dynamique hybride. L'exemple de l'unité de production illustre la méthode et les résultats de simulation nous permet d'analyser le fonctionnement de l'unité en déterminant le taux d'utilisation des machines, le taux d'utilisation des outils, le taux de production, le temps de remplissage des stocks ainsi que les temps moyens ou pourcentage de temps passé par les ressources dans différents états (marche, panne famine où manque de produit, saturation ou blocage de l'aval, changement d'outils). Ces résultats seront utilisés dans l'approvisionnement de l'unité de production.

RÉFÉRENCE

- [1] H. ALLA. "les réseaux de Petri: un outil particulièrement adapté à la modélisation des systèmes hybrides" *ADPM'94, Bruxelles, Novembre 1994*.
- [2] G. W. BRAMS. "Réseau de Petri: théorique et pratique" *Edition Masson Paris 1983*.
- [3] J LE. BAIL, H. ALLA, R. DAVID. "Réseaux de Petri hybride" *TSI, vol 11, n°5/1992 pp 95 à 120*.
- [4] J. LE. BAIL. "Sur les réseaux de Petri continus et hybrides" *Thèse de docteur de l'INPG, Grenoble 1992*.
- [5] E. DEBOIS, H. ALLA. R. DAVID. "Les Réseaux de Petri à vitesse fonction du temps" *APPI, vol, 28, n°5, pp 425 à 443, juin 1994*.
- [6] R. David, H. Alla. "Du Grafcet aux Réseaux de Petri" *Edition Hermès Paris 1992, 2^{ème} édition..*
- [7] R. David, H. Alla, *Discrete*. "Continuous, and Hybrid Petri Nets" *Springer-Verlag Berlin 2004*.
- [8] R. David, H. Alla. "Petri Nets for Modelling of Dynamics Systems-A Survey" *Automatica, Vol 30, N°2, pp175-202, 1995*.
- [9] I Demongodin, N. T. Koussoulas. "Differential Petri Nets: Representing Continuous systems in a Discrete-Event World" *IEEE transactions on Automatic Control, Special Issue on Hybrid Systems Vol.43 pp. 573-579, 1998*.
- [10] I. Demongodin, F. Prunet. "Extension of hybrid Petri nets for accumulation systems" *IMACS Decembre 1992*.
- [11] Chombart A. "Commande supervisée de systèmes hybrides" *Thèse de docteur de l'INPG, Grenoble 1997*
- [12] E. Dubois, H. Alla, R. David. "continuous Petri Net with Maximal speeds depending on time" *CIMAT94, 10-12 October 1994, Troy (New York)*.