7[e] *Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'08 - du* 31 *mars au* 2 *avril* 2008 *- Paris - France*
«Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Communication, Coopération et Coordination»

PROPOSITION D'UNE EXTENSION DES RÉSEAUX DE PETRI AUTOMODIFIANTS POUR LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES HYBRIDES ÉVOLUTIFS

O. LEJRI

Laboratoire LI3
École Nationale des Sciences de l'Informatique
Campus Univ. de la Manouba
2010 La Manouba Tunisie
ons.lejri@gmail.com

M. TAGINA

Laboratoire LI3
École Nationale des Sciences de l'Informatique
Campus Univ. de la Manouba
2010 La Manouba Tunisie
moncef.tagina@ensi.rnu.tn

RÉSUMÉ : *Dans cet article, nous nous intéressons à l'utilisation des réseaux de Petri (RdP) et leurs extensions pour la modélisation des comportements dynamiques ou évolutifs des systèmes complexes et plus précisément des systèmes hybrides. Nous commençons alors par étudier les RdP hybrides et la modélisation des systèmes hybrides à travers ces formalismes, puis, nous présentons une extension des RdP reconfigurables de Guan et Lim, présentés dans le cas des systèmes discrets, au cas des systèmes hybrides.*

MOTS-CLÉS : *modélisation, reconfiguration, RdP hybrides, RdP hybrides reconfigurables.*

1. INTRODUCTION

L'étape de modélisation est une étape primordiale dans le processus de contrôle des systèmes. En effet, bien au delà du but analytique qu'a joué la modélisation pendant de nombreuses années, les modèles, devenus de plus en plus riches, fidèles à la réalité et évolutifs, permettent aujourd'hui la surveillance des systèmes, leur commande et même leur reconfiguration.

Dans cette optique, nous abordons les réseaux de Petri qui sont des formalismes de modélisation très utilisés surtout grâce à leur aspect graphique très intuitif. Ils permettent de définir, d'analyser, de suivre et de contrôler le comportement des systèmes.

Nous nous intéressons dans ce qui suit à l'utilisation des Réseaux de Petri (RdP) pour la modélisation des comportements dynamiques évolutifs des systèmes complexes et plus précisément des systèmes hybrides.

Ces derniers sont définis comme étant une classe des systèmes complexes définie par la coexistence de dynamiques discrètes et continues (systèmes discrets qui évoluent dans un environnement continu ou encore des systèmes continus à contrôle discret).

Plusieurs extensions des réseaux de Petri ont été présentées dans la littérature (David & Alla 1987, Bail, Alla & R.David 1992, David & Alla 2001, Guan & Lim 2004). Nous nous proposons dans nos travaux d'étudier certaines de ces extensions ainsi que leur adéquation pour notre problématique qui est la modélisation des systèmes hybrides.

Toutefois, la modélisation, dans notre cas, sera abordée dans un contexte particulier qui est celui de la reconfiguration de contrôle. Les modèles que nous cherchons alors à construire devront être représentatifs des comportements normaux des systèmes (avec tout ce que implique la modélisation des systèmes hybrides), mais aussi prendre en charge l'aspect tolérance aux fautes. C'est à dire, ils devront s'adapter aux éventuelles défaillances qui pourraient affecter le système.

Les contraintes que nos modèles devront alors satisfaire sont les suivantes :

- Exprimer la double dynamique discrète/continue caractéristique des systèmes complexes.
- Représenter le comportement du système et gérer son évolution au cours du temps dans le cas d'absence de défaillance.
- Exprimer l'adaptation du système à la présence

de défaillance pour qu'il puisse continuer à fonctionner en dépit de celle ci.

Nous commencerons, dans ce qui suit, par une étude des réseaux de Petri hybrides. Nous utiliserons alors ce formalisme pour construire un modèle réseaux de Petri hybride d'un exemple particulier de système hybride qui est le système des trois bacs (Lunze, Askari & al 2001, Askari-Marnani, Heiming & Lunze 2001). Nous dégagerons par la suite les points forts et les points faibles de ce formalisme (par rapport à notre problématique).

Nous passerons par la suite aux réseaux de Petri automodifiants ou automodifiés et plus précisément aux réseaux de Petri reconfigurables. Nous présenterons alors deux approches différentes pour aborder la notion de reconfigurabilité dans les RdP. Nous proposerons aussi une extension de chacune de ces deux approches aux réseaux de Petri hybrides pour aboutir à ce que nous appellerons les réseaux de Petri hybrides reconfigurables.

2. LES RÉSEAUX DE PETRI HYBRIDES

Les réseaux de Petri(Diaz & al. 2001) sont des graphes bipartis caractérisés par un quadruplet $R = \{P, T, Pré, Post\}$ avec:

- P : un ensemble de places.
- T : un ensemble de transitions.
- $Pré : P \times T \mapsto \mathbb{N}$: une application d'incidence avant représentant la pondération de l'arc allant d'une place p vers une transition t.
- $Post : P \times T \mapsto \mathbb{N}$: une application d'incidence arrière représentant la pondération de l'arc allant d'une transition t vers une place p.

Étant donnée la nature des systèmes hybrides, leur modélisation nécessite des formalismes qui prennent en considération la dynamique discrète et la dynamique continue qui caractérisent l'évolution de ce type de systèmes. Les réseaux de Petri hybrides (David & Alla 2001) constituent une réponse à ce type de problèmes.

Un réseau de Petri hybride est une interconnexion de réseaux de Petri discrets (caractérisés par un marquage discret : $M(p_i) \in \mathbb{N}$) et de réseaux de Petri continus (caractérisés par un marquage continu : $M(p_i) \in \mathbb{R}$).

2.1. Généralités sur les réseaux de Petri hybrides

n réseau de Petri hybride autonome est un sextuple $Q = (P, T, \Pr é, Post, M_0, h)$ avec :

1. P, T, $Pré$ et $Post$ définis comme pour les réseaux de Petri ordinaires
2. $h : P \cup T \mapsto \{D, C\}$ est une fonction hybride qui indique pour chaque noeud (place ou transition) si c'est un noeud discret (ensembles P^D et T^D) ou continu (ensembles P^C et T^C)
3. $M_0 : P \mapsto \mathbb{R}^+$ où M_0 est le marquage initial

Une D-transition (transition discrète) peut avoir des places d'entrée et de sortie qui sont de nature quelconque (elles peuvent être aussi bien des D-places que des C-places).

Les places d'entrée et de sortie d'une C-transition sont, généralement, des C-places et éventuellement des D-places et ceci si et seulement si la D-transition représente la place d'entrée et de sortie de la C-transition (présence d'un cycle). Cette dernière condition est traduite par l'égalité suivante: $Pré(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$ Si $P_i \in P^D$ et $T_j \in T^C$

Une transition discrète t est tirable si et seulement si:

$\forall p_i \in P$, on a , $M(p_i) \geq Pré(p_i, t)$

Une transition continue t est tirable si chaque place d'entrée vérifie les conditions suivantes :

a) si p_i est une place discrète $M(p_i) \geq Pré(p_i, t)$

b) si p_i est une place continue, l'une des deux possibilités se présente :

- **i)** $M(p_i) > 0$ ou bien
- **ii)** $M(p_i) = 0$ et p_i est ravitaillée

Les réseaux de Petri hybrides (RdPH) permettent la modélisation de la double dynamique caractérisant les systèmes hybrides(Svadova 2001).

2.2. Modélisation du système des trois bacs à l'aide des réseaux de Petri hybrides

Comme le montre la Figure 1, le système des trois bacs se compose de trois bacs ou réservoirs connectés par des pipes pouvant être contrôlés par plusieurs valves. Les niveaux du liquide dans les bacs 1 et 2 (celui de droite et celui de gauche dans la Figure 1) peuvent être maintenus aux niveaux souhaités à l'aide de deux pompes identiques (Pompe1 et Pompe2).

L'objectif principal du système est de fournir un flux de liquide continu pour le consommateur. Cet objectif doit être satisfait tant que possible même si cela peut impliquer dans certaines conditions le changement du comportement normal du système.

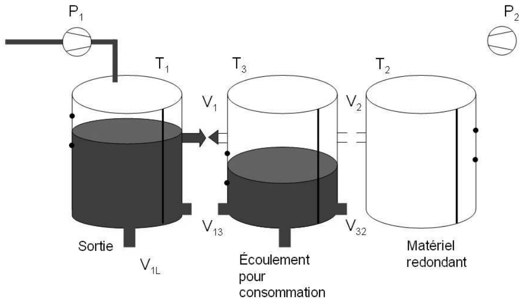

Figure 1: Le système des trois bacs

Vu la nature hybride de ce système, sa modélisation nécessitera l'utilisation des réseaux de Petri hybrides

Avant de commencer la modélisation du système, une étape d'analyse est nécessaire. Cette analyse se concentrera principalement sur le fait de dégager les différentes équations régissant le flux du liquide entre les différentes composantes du système.

Ces équations sont les suivantes:

Le flux du liquide en provenance des pompes P_1 et P_2 et servant au ravitaillement des deux bacs T_1 et T_2 est fixé à:

$$\boxed{Q_{\max} = 6l/min = 0.1 * 10^{-3} m^3/s} \tag{1}$$

Le flux de ravitaillement ou le flux sortant à travers la valve V_N est donné par :

$$\boxed{Q_N = a_Z \times S \times \sqrt{2 \times g \times h_3}} \tag{2}$$

Le flux allant du bac1 au bac3 à travers la valve V_{13} :

$$\boxed{Q_{13}^{V_{13}} = a_Z \times S \times sgn(h_1 - h_3) \times \sqrt{2 \times g \times |h_1 - h_3|}} \tag{3}$$

Le flux allant du bac1 au bac3 à travers la valve V_1 :

Si $h_1 < 0.3$ *et* $h_3 < 0.3 \Longrightarrow Q_{13}^{V_1} = 0$

Si $h_1 < 0.3$ *et* $h_3 \geq 0.3 \Longrightarrow Q_{13}^{V_1} =$
$a_Z \times S \times sgn(0.3 - h_3) \times \sqrt{2 \times g \times |0.3 - h_3|}$

Si $h_1 \geq 0.3$ *et* $h_3 < 0.3 \Longrightarrow Q_{13}^{V_1} =$
$a_Z \times S \times sgn(h_1 - 0.3) \times \sqrt{2 \times g \times |h_1 - 0.3|}$

Si $h_1 \geq 0.3$ *et* $h_3 \geq 0.3 \Longrightarrow Q_{13}^{V_1} = a_Z \times S \times sgn(h_1 - h_3) \times \sqrt{2 \times g \times |h_1 - h_3|}$
(4)

Avec 0.3 représentant $H_{V_1}^1$ qui est la hauteur à laquelle se trouve la Valve V_1 dans le bac T_1 La variation du volume de liquide d'un bac est comme suit :

$$\boxed{\dot{V} = S_{surf} \times \dot{h} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out}} \tag{5}$$

Avec S_{surf} la surface d'un bac et $S_{surf} = 0.0154m^2$
Ainsi on a:

$$\boxed{\dot{h} = \frac{\sum Q_{in} - Q_{out}}{S_{surf}}} \tag{6}$$

Le modèle que nous nous proposons de construire pour le système des trois bacs est un modèle évolutif, dans le sens où il prendra en considération l'évolution du système et ses implications sur le plan comportemental et structurel, que ce soit lors d'un fonctionnement normal ou lors de la détection de défaillance.

En d'autres termes, ce modèle englobera les stratégies de commande du système (lorsque le système ne représente pas de défaillances) aussi bien que celles de reconfiguration du contrôle (notamment structurelle).

Nous présenterons dans ce qui suit quelques modèles réseaux de Petri hybrides relatifs à certains comportements du système des trois bacs.

- La Figure 2 montre le réseau de Petri de ravitaillement du bac1 à l'aide de la pompe P_1. Tant que le niveau de liquide du bac1 est inférieur au seuil minimum $0,5$, le ravitaillement est déclenché, une fois le bac1 rempli jusqu'à $0,5$, la pompe est fermée et le flux de liquide allant de cette dernère vers le bac devient nul.
- La Figure 3 montre le flux continu du liquide entre le bac1 et le bac3 (voir formule 4)

Les réseaux de Petri hybrides nous ont permis de construire un modèle comportemental du système des trois bacs. La simulation de ce modèle permet le suivi des différents paramètres représentant l'état global du système au cours du temps (voir courbe Figure 2).

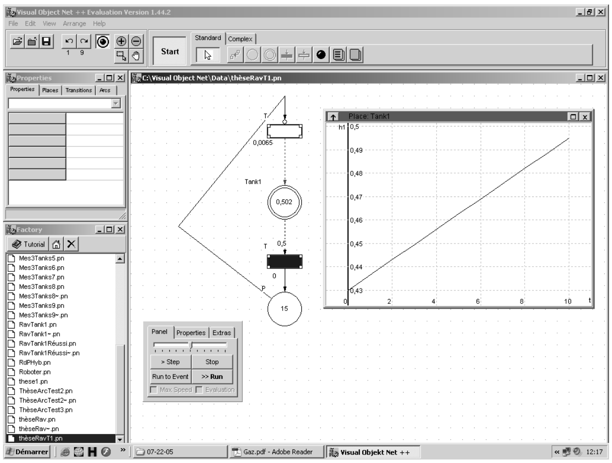

Figure 2: Modélisation du ravitaillement du bac1 à l'aide de la pompe1

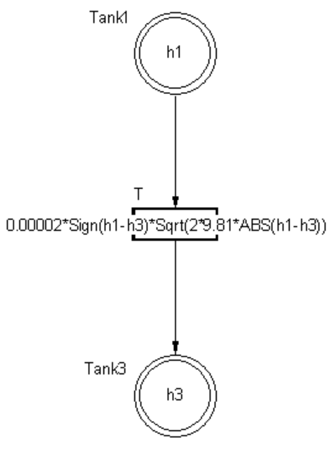

Figure 3: Modélisation du flux de liquide entre le bac1 et le bac3

Toutefois, le modèle que nous aspirons à construire pour le système des trois bacs est un modèle évolutif dans le sens où il prendra en considération l'évolution du système et ses implications sur le plan comportemental et structurel.

Cette évolution peut dans certains cas engendrer un besoin de reconfiguration que ce soit sur le plan structurel ou encore au niveau des lois de commande.

Dans notre cas, la reconfiguration du contrôle de notre système implique dans des situations particulières de basculer de l'utilisation du bac1 vers celle du bac2 ou encore le changement des équations de flux selon l'état global du système. Dans ces cas, notre modèle réseaux de Petri doit être modifié de façon à ce que le sous réseau représentant le comportement non désiré (celui du bac1 par exemple) soit inhibé.

A partir de ces constatations, nous arrivons au fait que malgré la puissance de représentation des RdP hybrides, ils restent non adéquats pour notre problématique qui est la reconfiguration des systèmes hybrides.

3. LES RÉSEAUX DE PETRI AUTOMODIFIANTS

La notion d'automodification a représenté ces dernières décennies un axe de recherche pour différents domaines (les réseaux automodifiants, les protocoles automodifiants,...).

Pour un système dynamique, l'automodification exprime l'aptitude du système à se modifier lui même (modifier sa structure) de manière à évoluer de façon correcte au fil du temps.

Les réseaux de Petri automodifiants ou automodifiés sont une extension des RdP. Ils ont été introduits, dans le cas discret, par Valk (Valk 1978) dans le but d'introduire une certaine dynamicité aux modèles RdP. Cette dynamicité s'exprime à travers des relations de flux entre places et transitions qui sont des fonctions linéaires du marquage.

Ce type de réseaux de Petri et la notion même d'automodification a engendré un nouveau type de RdP qui est les réseaux de Petri reconfigurables.

Les réseaux de Petri reconfigurables permettent d'exprimer les changements dynamiques.

Dans la littérature, nous retrouvons deux types de réseaux de Petri reconfigurables :

- Les réseaux de Petri reconfigurables de Badouel et Oliver (Badouel & Oliver 1998)
- Les réseaux de Petri reconfigurables de Guan et

Lim (Guan & Lim 2004)

Ces deux types de réseaux de Petri reconfigurables, bien que différents de part leurs approches, se basent sur le changement structurel du modèle RdP.

En effet, ils introduisent une nouvelle idée qui est celle d'inhiber ou effacer ou supprimer un élément ou un composant du réseau.

3.1. Les réseaux de Petri reconfigurables de Badouel et Oliver

Badouel et Oliver ont introduit la notion de réseaux de Petri reconfigurables dans (Badouel & Oliver 1998) dans un contexte de systèmes workflow. Ils les définissent comme étant une structure $N = (P, T, F, R)$ où

- P est un ensemble fini et non vide de places
- T est un ensemble fini et non vide de transitions avec $P \cap T = \emptyset$
- $F = (P \times T) \cup (T \times P) \mapsto \mathbb{N}$ une relation qui associe un poids à chaque arc reliant une place à une transition ou une transition à une place.
- $R = \{r_1, r_2, ...r_k\}$ est un ensemble fini de règles servant à la modification de la structure du réseau. et une règle r est définie par $r : P_1 \rightarrow P_2$ avec $P_1, P_2 \subseteq P$ et $P_1 \cap P_2 = \emptyset$

L'idée de ces réseaux de Petri est que le marquage ne prend plus ses valeurs dans $\mathbb{N}$ mais dans $\mathbb{N} \cup \alpha$ avec $\alpha \notin \mathbb{N}$.

- Si le marquage $M(P)$ d'une place P est $n \in \mathbb{N}$, alors la place est existante dans le marquage M, sinon
- la place est inexistante dans le marquage M

L'activation ou la désactivation des règles permettra de produire un nouveau marquage. Le passage d'un marquage à un autre fait qu'une place puisse passer de l'état *existant* à l'état *inexistant* et vice versa, ce qui a pour conséquence le changement de la structure du réseau.

3.2. Proposition d'une extension des réseaux de Petri reconfigurables de Badouel et Oliver

Bien évidemment, l'utilisation des réseaux de Petri reconfigurables pour la modélisation des système hybrides implique l'extension de cette idée de règles aux réseaux de Petri hybrides.

Dans ce cas, α n'est ni un entier naturel, ni un réel positif (un marquage négatif par exemple), étant donné que le marquage d'un RdP hybride prend ses valeurs dans $\mathbb{N}$ et dans $\mathbb{R}$.

Nous nous proposons d'appliquer les réseaux de Petri de Badouel et Oliver sur notre exemple (voir Figure 4). Nous allons considérer un cas de la reconfiguration structurelle ; le cas où une défaillance nous oblige à faire basculer le système de l'utilisation du bac1 vers le bac2 (matériel redondant). Initialement, la place P_2 est considérée comme inexistante $M(P_2) = -28$ (nous optons, par exemple,pour une valeur de $\alpha = -28$).

Lorsqu'une défaillance est constatée (un trou au niveau du bac1), nous voulons inhiber le bac1 et utiliser le bac2. La règle r avec $r(P_1) = P_2$ est alors tirée. Nous aurons alors $M(P_2)$ =M(P$_1$) et $M(P_1) = -28$.

Bien que les termes utilisés pour différencier les places où le marquage est dans $\mathbb{N}$ et celle où le marquage est α sont existant et non existant, concrètement les places sont existantes au niveau du réseau mais sont activées ou non ou bien prises en considération ou non.

Ceci ne pose pas de problèmes pour le contexte de systèmes de workflow dans lequel ont été introduit les RdP reconfigurables (étant donné que les tâches et leur séquencement sont plus ou moins connus).

Par contre, quand nous nous intéressons aux systèmes hybrides qui sont des systèmes complexes ayant une évolution que nous ne pouvons pas prédéfinir (appartion de défaillance imprévues, etc) le changement structurel, dans le sens des RdP reconfigurables de Badouel et Oliver, implique de prévoir un réseau d'une assez grande taille qui pourra exprimer toutes les possibilités des changements structurels. Ce qui n'est pas une solution intéressante surtout pour des systèmes où le modèle d'un comportement normal est déjà lourd.

3.3. Les réseaux de Petri reconfigurables de Guan et Lim

Guan et Lim introduisirent les réseaux de Petri reconfigurables, dans le cas discret, dans (Guan & Lim 2004) comme un formalisme de modélisation pour les multimédia et protocole d'exécution automodifiants ou automodifiés.

Les auteurs décrivent ces réseaux de Petri comme une réponse à la problématique de modélisation de processus qui sont automodifiés tout au long de leur exécution.

Les réseaux de Petri reconfigurables, selon le sens de Guan et Lim, sont formés par deux couches distinctes

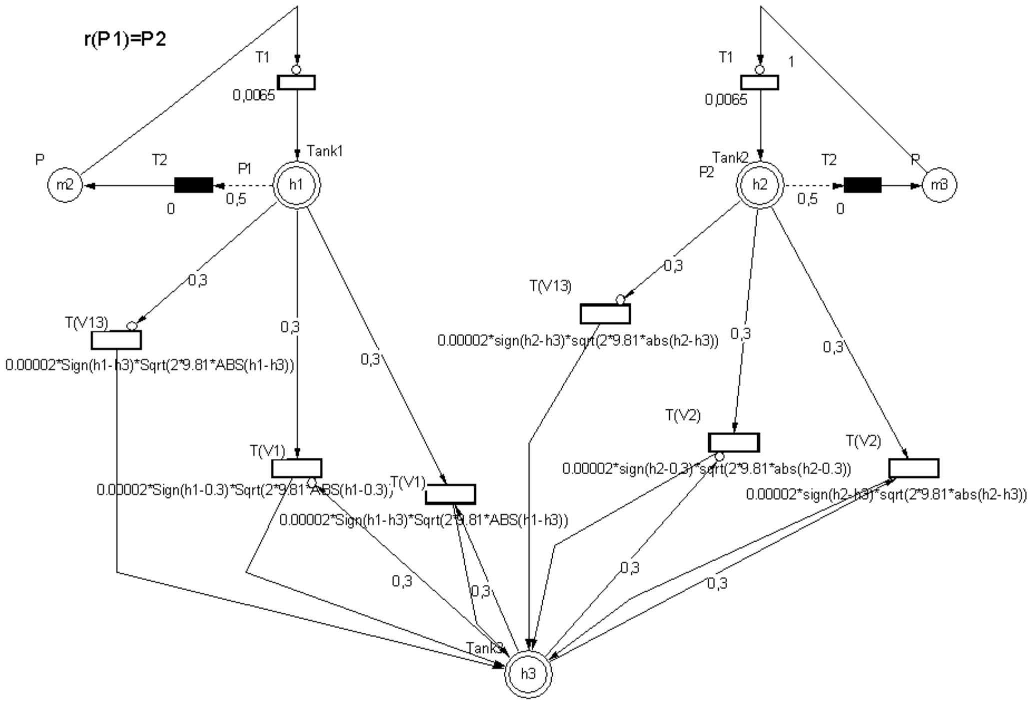

Figure 4: Extension des RdP reconfigurables de Badouel et Oliver aux RdP hybrides

qui sont la couche de contrôle et la couche de présentation (chaque couche étant représentée par un rectangle renfermant un sous réseau de Petri).

Un nouveau mécanisme vient enrichir les réseaux de Petri reconfigurables; ce sont les *modifiers*. Un modifier (mot anglais signifiant modifiant) permet de contrôler, créer, supprimer, activer ou désactiver un autre mécanisme (place, transition, arc, jeton) du réseau.

Une couche d'un RdP reconfigurable est représentée par un septuple $S = \{T, P, A, D, L, COM, M\}$ avec

- P et T sont respectivement deux ensembles finis et non vides de places et de transitons
- $A : \{P \times T\} \cup \{T \times P\}$ est un ensemble d'arcs
- $D : p_b \rightarrow \mathbb{R}^+$ représentant les durées pour les ressources
- $L = \{c_x \text{ ou } p_x\}$ indique si une entité bien déterminée est une couche contrôle ou une couche présentation.
- $COM : f_a \rightarrow \{com_1, com_2, ...com_z\}$ est une relation associant une commande à chaque modifier.
- M est le marquage

La couche présentation sert à la représentation du modèle du système, alors que la couche contrôle renferme les modifiers qui permettront de créer ou supprimer différents éléments du système et donc de changer la structure du modèle.

3.4.Les réseaux de Petri hybrides reconfigurables : proposition d'une extension des réseaux de Petri reconfigurables de Guan et Lim

Etant donné que nous nous intéressons aux systèmes hybrides, le modèle de la couche présentation sera fait à l'aide des réseaux de Petri hybrides.

Or les auteurs représentent les modifiers par des cercles à double trait (représentation qui est consacrée aux places continues). Nous nous proposons donc de présenter les modifiers par des cercles de petites tailles. La figure 5 représente le modèle du système des trois bacs à l'aide de l'extension des réseaux de Petri reconfigurables de Guan et Lim que nous avons nommée *les réseaux de Petri hybrides reconfigurables.*

Une commande peut être une action d'activation

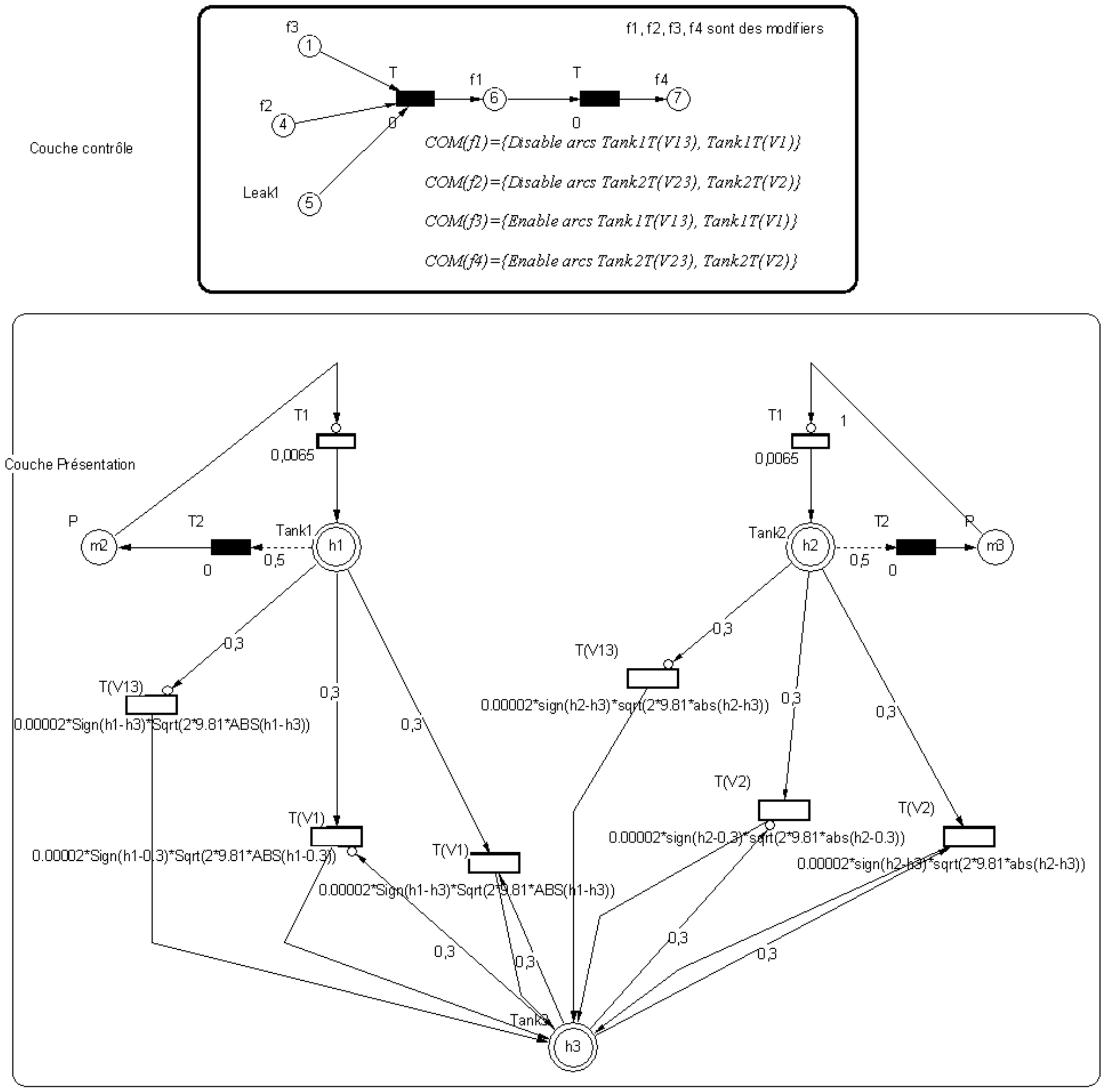

Figure 5: Modélisation du système des trois bacs à l'aide des RdP hybrides reconfigurables

d'un arc, de désactivation d'une transition, de création d'une place, de suppression d'une transition, de blocage d'un jeton, d'inversement du sens d'un arc, etc (Guan & Lim 2004).

Dans cette représentation, nous avons étendu les RdP reconfigurables pour obtenir un nouveau type de RdP qui sont les RdP hybrides reconfigurables.

Ce type de RdP semble adéquat pour la modélisation des systèmes hybrides dans un contexte de reconfiguration. En effet, l'introduction des modifiers offre une grande possibilité de changement structurel au niveau du modèle RdP ce qui est important surtout que notre but est de construire un modèle qui prend en considération le comportement du système aussi bien en cas de fonctionnement normal qu'en cas de défaillance.

4. CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés dans nos travaux à la modélisation des systèmes hybrides à l'aide des réseaux de Petri. Nous nous sommes focalisés tout d'abord sur les RdP hybrides. Ces derniers n'offrant pas tous les mécanismes nécessaires à la modélisation d'un comportement évolutif, nous nous sommes alors penchés sur la notion d'automodification.

A partir de ces notions (RdP hybrides et RdP automodifiés) et en nous basant sur les RdP reconfigurables de Guan et Lim, nous avons introduit les RdP hybrides reconfigurables qui sont une extension des RdP reconfigurables.

Les RdP hybrides reconfigurables permettent de modéliser un comportement évolutif d'un système hybride et de gérer la notion de reconfiguration.

Toutefois, cette reconfiguration reste limitée sur le plan structurel (les RdP ne permettent de gérer que la reconfiguration structurelle du système et ne peuvent en aucun cas, à l'état pur, prendre en charge la reconfiguration des lois de contrôle).

RÉFÉRENCES

Askari-Marnani, J., Heiming, B. & Lunze, J. (2001). Control reconfiguration :the cosy benchmark problem and its solution by means of a qualitative model, *Part of chapter 21 of the final report of the project "control of complex systems" (cosy)*.

Badouel, E. & Oliver, J. (1998). Reconfigurable nets: a class of high level petri nets supporting dynamic changes with workflow systems, *Research Report Publication Interne 1163*, Irisa (Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires).

Bail, J. L., Alla, H. & R.David (1992). Les réseaux de petri hybrides, *TSI* **4**: 143–159.

David, R. & Alla, H. (1987). Continuous petri nets, *Proceedings of the 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets*, Zaragoza (Spain), pp. 275–294.

David, R. & Alla, H. (2001). On hybrid petri nets, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, Vol. 11, pp. 9–40.

Diaz, M. & al. (2001). *Les réseaux de Petri: modèles fondamentaux*, Edition Hermès.

Guan, S.-U. & Lim, S.-S. (2004). Modeling adaptable multimedia and self-modifying protocol execution, *in* Elsevier (ed.), *Future Generation Computer Systems*, Vol. 20, pp. 123–143.

Lunze, J., Askari, J. & al (2001). Three-tank reconfiguration control, control of complex systems, pp. 241–283.

Svadova, M. (2001). Modelling hybrid dynamic systems using hybrid petri nets, *13th International conference on process control* .

Valk, R. (1978). Self-modifying nets, a natural extension of petri nets, *Proceedings of Icalp'78, Lectures Notes in Computer Science*, Vol. 62, pp. 464–476.