

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf...../2020



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**Académique Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** Automatique et Informatique Industrielle

**Etudiants :** -*MENASRIA Selma*  
-*AZAIZIA Abdelmalik*

### Thème

**Modélisation et surveillance d'un système de  
trois réservoirs par automate hybride**

Mme. BOUCERREDJ Leila  
M. BOUDJEHEM Badreddine  
Mme. CHAABI Lilia

MCA  
MCA  
MAA

Univ. Guelma Encadreur  
Univ. Guelma Président  
Univ. Guelma Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## ***Remerciement***

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail..*

*Tout d'abords, je tiens à remercier notre encadreur Mme.BOUCERREDJ Leila notre professeur pour son accueil, ses conseils, ses critiques constructives et sa disponibilité pendant la période de mise en œuvre du mémoire. Ses connaissances scientifiques et son esprit d'analyse nous permis de mener à terme ce de recherche.*

*Je tiens à remercier Monsieur M. BOUDJEHEM Badreddine qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Je remercie très sincèrement Mme CHAABI Lilia qui aussi m'a fait l'honneur d'avoir accepté de porter un jugement sur mon travail de recherche et de faire partie du jury de soutenance de ce mémoire.*

*Un grand merci à tous ceux qui, par leur soutien sous une forme ou une autre, m'ont aidé dans la réalisation de ce travail. Une pensée très reconnaissante pour mes parents qui sont à l'origine de ma formation.*

*À mon âme jumelle HAFED KH merci d'avoir été toujours à mes cotés malgré la distance dans cette aventure, de croire en moi plus que personne d'autre et d'avoir partagé aussi les moments les plus heureux.*

*Merci aussi à toute ma famille et mes chers amis BOUAAFIA Zahira (Maya), Meriem, Ismahan, Youssra, roumaissa.*

## Résumé

La plus part des systèmes automatique sont des systèmes dynamiques hybrides qui ont une grande importance dans plusieurs secteurs industriels, ainsi que dans beaucoup d'autres activités humaines. Les systèmes dynamiques sont de plus en plus complexes. Cette complexité est due au grand nombre de composants constituant ces systèmes. Malgré les besoins de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements, ces systèmes ne sont pas à l'abri de défaillances. C'est pourquoi les activités de surveillance, diagnostic (détection, localisation, identification de défaillances), réparation ou reconfiguration sont très importantes. Ces activités permettent de détecter et localiser les défauts, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

De nos jours, l'implémentation des systèmes automatisés suppose la mise en place d'outils importants pour le diagnostic et la surveillance pour aider les entreprises dans leur recherche permanente d'un meilleur fonctionnement de leurs systèmes à moindre coût.

L'étude que nous allons faire se base sur le contrôle et la surveillance des systèmes dynamique hybride par automate hybride, qui est largement connus dans la modélisation et l'analyse des systèmes dynamique hybride ainsi que dans les études de la sûreté de fonctionnement.

**Mots-clés** : Système automatique, Système dynamique hybride, sûreté de fonctionnement, surveillance, diagnostic, Matlab/Simulink/Stateflow.

## **Abstract**

Most automatic systems are dynamic hybrid systems, which are of great importance in several industrial sectors, as well as in many other human activities. Dynamical systems are more and more complex. This complexity is due to the large number of components constituting these systems. Despite the high security requirements, the reduction in operating costs and the control of equipment availability, these systems are not immune to failures. This is why the activities of monitoring, diagnosis (detection, location, identification of faults), repair or reconfiguration are very important. These activities make it possible to detect and locate faults, minimize repair time, and provide a reliable and easily interpretable diagnosis despite the complexity of the equipment.

The implementation of automated systems today means putting in place important diagnostic and monitoring tools to help companies in their ongoing pursuit of better functioning of their systems at lower cost.

The study we are going to do is based on the control and monitoring of hybrid dynamic systems by hybrid automaton, which is widely known in the modeling and analysis of hybrid dynamic systems as well as in dependability studies.

**Keywords:** Automatic system, Hybrid dynamic system, dependability, monitoring, diagnosis, Matlab / Simulink / Stateflow.

## ملخص

معظم الأنظمة الأوتوماتيكية هي أنظمة هجينة ديناميكية لها أهمية كبيرة في العديد من القطاعات الصناعية، وكذلك في العديد من الأنشطة البشرية الأخرى. الأنظمة الديناميكية أكثر تعقيداً. يرجع هذا التعقيد إلى العدد الكبير من المكونات التي تشكل هذه الأنظمة. على الرغم من متطلبات الأمان العالية، وانخفاض تكاليف التشغيل والتحكم في توفر المعدات، فإن هذه الأنظمة ليست محصنة ضد الأعطال. هذا هو السبب في أهمية أنشطة المراقبة والتشخيص (الكشف والموقع وتحديد الأعطال) أو الإصلاح أو إعادة التكوين. تتيح هذه الأنشطة اكتشاف الأخطاء وتحديد موقعها وتقليل وقت الإصلاح وتوفير تشخيص موثوق به وسهل التفسير على الرغم من تعقيد المعدات.

يعني تنفيذ الأنظمة المؤتمتة اليوم وضع أدوات تشخيص ومراقبة مهمة لمساعدة الشركات في سعيها المستمر لتحسين أداء أنظمتها بتكلفة أقل.

تعتمد الدراسة التي سنقوم بها على التحكم في الأنظمة الديناميكية الهجينة ومراقبتها بواسطة التشغيل الآلي الهجين، وهو أمر معروف على نطاق واسع في نمذجة وتحليل الأنظمة الديناميكية الهجينة وكذلك في دراسات الاعتمادية.

**الكلمات المفتاحية:** النظام الآلي، النظام الديناميكي الهجين، الاعتمادية، المراقبة، التشخيص، ما تلاب / سيمولينك / ستاينقلو

## Sommaire

Résumé

Introduction générale..... 1

### Système dynamique hybride

I.1. Introduction : .....3

I.2. les systèmes dynamiques : .....3

I.3. Systèmes dynamiques hybrides : .....4

I.3.1. Systèmes continus.....4

I.3.2. Systèmes à événements discrets .....5

I.3.3. Systèmes dynamiques hybrides : .....6

I.4. Exemples de systèmes dynamiques hybrides : .....7

I.4.1. Systèmes continus supervisés par un contrôleur à événements discrets .....7

I.4.2. Systèmes continus comportant des discontinuités : .....7

I.4.3. Systèmes comportant des éléments discrets et continus : .....9

I.4.4. Systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction : ..... 10

I.4.5. Systèmes discrets pour lesquels des dynamiques continues sont introduites par abstraction : ..... 11

I.4.6. Systèmes complexes composés de sous-systèmes continus et discrets : ..... 13

I.5. Structure générique d'un système dynamique hybride : ..... 14

I.6. Catégories de phénomènes hybrides : ..... 15

I.7. Complexité des systèmes dynamiques hybrides : ..... 16

I.8. Modèles formels pour les SDH : ..... 17

I.8.1. Approches basées sur une extension des modèles continus : ..... 17

I.8.2. Approches basées sur une extension des modèles discrets : ..... 18

I.8.3. Approches mixtes : ..... 19

I.9. Outils de simulation des SDH : ..... 21

I.9.2. Surveillance des SDH : ..... 25

I.10. Les réseaux de Pétri hybrides : ..... 25

I.11. Conclusion : ..... 25

### Modélisation des Systèmes Dynamiques Hybrides

II.1 Introduction : ..... 27

II.2 Structure générique des SDH : ..... 27

II.2.1 Méthode de fonctionnement : .....	27
II.2.1.1 Approche discret :.....	28
II.2.1.1.1 Modification de dynamique continue causées par des sorties discrètes :.....	28
II.2.1.1.2 Modification de dynamique continue causées par des entrées discrètes : .....	28
II.2.1.1.3 Modification de dynamique continue causées par la structure du système :.....	29
II.2.1.2 Approche continu : .....	30
II.2.2 Spécification de fonctionnement : .....	31
II.2.2.1 Spécification discrète :.....	31
II.2.2.2 Spécification continue : .....	31
II.3 Conception ou élaboration des SDH : .....	33
II.3.1 Approche événementielle : .....	33
II.3.2 Approche continue :.....	33
II.3.3 Approche mixte : .....	33
II.4 Les outils de modélisation : .....	34
II.4.1 Automates Hybrides : .....	34
II.4.2 Réseaux de Pétri .....	35
II.4.2.1 Réseau de Pétri hybride : .....	35
Définition : .....	35
II.4.2.2 Réseau de Petri hybride élémentaire : .....	37

### Surveillance des systèmes dynamiques hybrides

III.1. Introduction : .....	39
III.2. La surveillance: .....	40
III.2.1. La détection :.....	40
III.2.2. Le diagnostic :.....	45
III.2.3. La surveillance prédictive .....	41
III.3. La correction : .....	41
III.4. Les méthodes de surveillance : .....	41
III.5.Choix de la méthode de surveillance et modèle de bon fonctionnement : .....	42
III.6. Description et caractérisation des défaillances : .....	44
III.6.1. Défaillances affectant le comportement du système dans un mode : .....	44
III.6.2. Défaillances affectant l'évolution discrète :.....	44
III.7. Conclusion : .....	45

## Application

### Modélisation et surveillance par automate hybride

#### “ Système de régulation à trois réservoirs ”

IV.1 Introduction .....	46
IV.2. Définition d'un mode .....	47
IV.3 Stateflow .....	47
IV.3.1 Les objets de stateflow : .....	48
IV.3.1 Les états : .....	49
IV.3.2 Les transitions : .....	50
IV.3.2.1 Les transitions par défaut : .....	50
IV.3.2.2 Les labels des transitions : .....	51
IV.3.3 Les évènements : .....	52
IV.3.4 Les objets data ( <i>Données</i> ) : .....	52
IV.3.5 Algorithme de simulation .....	53
IV.3.6 Exemple d'application .....	53
IV.4. Cas d'application: .....	56
IV.5. Modélisation : .....	58
IV.6. Simulation du modèle hybride : .....	59
IV.7. Conclusion .....	69
Conclusion générale	
Références bibliographiques .....	85

# *Table des figures*

## *Chapitre I. Systèmes dynamiques hybrides*

Figure I.1. a- Système physique (continu/discret). b- Automate correspondant.	06
Figure I.2. Evolution continue et discrète du SDH.	07
Figure I.3. Balle en rebondissement.	08
Figure I.4. Circuit électrique intrinsèquement hybride.	09
Figure I.5. Evolution du courant dans la self.	10
Figure I.6. Système hydraulique.	11
Figure I.7. Exemple de vanne pneumatique	11
Figure I.8. Architecture générique d'un système de production.	12
Figure I.9. Procédé batch.	14
Figure I.10. Structure du système dynamique hybride.	15
Figure I.11. Réseau de Pétri hybride	18
Figure I.12. a-système de bacs.                      b -Automate hybride correspondant	20

## *Chapitre II. Modélisation d'un système hybride*

Figure II.1 Structure du système dynamique	29
Figure II.2 Partie d'un automate hybride	32
Figure III.3. Modèle de thermostat avec spécification de fonctionnement.	32
Figure II.4 Automate hybride	35
Figure II.5 Exemple de Réseau de Pétri élémentaire	37
Figure II.6 Exemple de Réseau Hybride élémentaire	38

## Chapitre III. Surveillance des systèmes dynamiques hybrides

Figure III.1. Un exemple de détection grâce à un émulateur	40
Figure III.2. Différentes méthodes de surveillances	42

## Chapitre IV. Application

Figure IV.1. Matlab / Simulink / Stateflow.	48
Figure IV.2. Système de régulation de trois réservoirs.	57
Figure IV.3 le schéma interne du bloc physique du cas d'application.	60
Figure IV.4. Le schéma bloc de calculateur.	62
Figure IV.5. Schéma interne de l'automate hybride	63
Figure IV.6. Schéma de simulation du cas d'étude.	64
Figure IV.7. Evolution du volume dans R1 et R2 et R3.	65
Figure VI.8. Evolution des modes.	65
Figure VI.9 évolution du volume dans les réservoirs 1, 2 et 3 ( $V_1$ bloqué en ouverture et $V_2$ en bon fonctionnement, $V_3$ en bon fonctionnement).	66
Figure VI.10 évolution du volume dans les réservoirs ( $V_1$ bloqué en ouverture et $V_2$ bloqué en ouverture en l'électrovanne 3 occupé a vidangé le réservoir 2).	67
Figure VI.11 les modes ( $V_1$ bloqué en ouverture et $V_2$ en bon fonctionnement, $V_3$ bon fonctionnement).	68
Figure IV.12 les modes ( $V_1$ et $V_2$ bloqué en ouverture et $V_3$ occupé a vidangé le réservoir 2, $V_3$ en bon fonctionnement).	68

Les procédés industriels automatiques sont complexes, mono-variables ou multi-variables, leurs dynamiques présentent un double aspects, c'est-à-dire de nature continue et/ou discrète (évènementielle).

Les changements de structures dans ces systèmes mènent à des discontinuités dans leurs dynamiques. Ces changements peuvent être causés pas des évènements discrets qui sont générés par des actionneurs discrets, capteurs ou par des discontinuités inhérents au procédé. Mais pour garantir le bon fonctionnement de l'ensemble d'un système automatisé, il est nécessaire de prendre en compte à la fois les aspects continus et évènementiels (discrets) de sa dynamique.

Cette problématique qui s'intéresse aux phénomènes continus et discrets de façon globale et qui est relativement récente (années 90) donne naissance à une classe très importante et très particulières des systèmes automatiques connus sous le nom de *Système Dynamique Hybride (SDH)*.

Les systèmes dynamiques hybrides sont des systèmes pour lesquels les dynamiques discrètes et continues interagissent. Cette interaction détermine le comportement du système.

La modélisation hybride des systèmes automatiques doit mettre en évidence les interactions réelles entre les deux sous systèmes continus et séquentiels.

Sachant que nous ne disposons pas souvent d'un modèle de comportement réel, un travail de simulation s'impose. Les outils informatiques pour la modélisation et la simulation des procédés se sont développés conjointement avec les outils et techniques informatiques.

L'objectif de ce mémoire est la modélisation et la surveillance d'un système automatique hybride par un automate hybride modélisé sous stateflow sous le logiciel Matlab.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une étude détaillée des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH). Cette étude comprend une large définition de ce type de systèmes, ainsi les différentes classes de ce genre de systèmes. Des exemples illustratifs sont présentés.

Le deuxième chapitre : on s'intéresse aux méthodes et les outils de modélisation des systèmes dynamiques hybride.

# Introduction générale

---

Dans le troisième chapitre : Comprend des définitions sur la surveillance et le diagnostic ainsi que le Toolbox « state flow ».

Le quatrième chapitre fait l'objet de l'application sur un exemple de SDH qui est le modèle de régulation de volume des trois réservoirs.

## Systeme dynamique hybride

### I.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous ferons un état de l'art sur les systèmes dynamiques hybrides (*SDH*) ainsi que les différentes propriétés qui les caractérisent. Différentes classes des *SDH* illustrées par des exemples seront abordées montrant ainsi les éléments qui font que ces systèmes soient complexes.

Ce chapitre est consacré à deux formalismes mathématiques pour la modélisation et d'analyse des systèmes dynamiques hybrides, à savoir les réseaux de Petri hybrides et les automates hybrides linéaires. Afin de comprendre ces deux formalismes hybrides, on est dans l'obligation de présenter tout un ensemble de modèles de *RdPs* (*Discrets, temporisés, temporels et continus*). Notre choix est porté sur les réseaux de Petri Hybrides (*RdPH*) comme outil formel de modélisation dans la mesure où il est le mieux adapté aux systèmes hybrides à flux continu et où toutes les variables sont positives. L'automate hybride linéaire est le modèle le plus général pour la représentation du comportement hybride.

### I.2.les systèmes dynamiques :

Un système dynamique est un modèle permettant de décrire l'évolution au cours du temps d'un ensemble d'objets en interaction, défini par l'équation différentielle :

$$\dot{X}(t) = f(X(t), t) \quad (I.1)$$

Définir un système dynamique nécessite de définir deux catégories de descriptions :

Une représentation d'état :

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) \quad (I.2)$$

Il s'agit d'une liste de variables, que l'on appelle vecteur d'état  $X$ , permettant de d'écrire à tout instant un ensemble d'objets. Le nombre de ces variables correspond au nombre de degrés de liberté de notre système ;

Une fonction de transition :

$$\mathbf{f} = e^{At} \quad (I.3)$$

cette fonction décrit l'évolution dans le domaine de temps, elle donne ainsi l'évolution du vecteur d'état entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$ .

### I.3. Systèmes dynamiques hybrides :

Les *SDH* sont des systèmes où la dynamique discrète interagit avec la dynamique continue. C'est cette interaction qui détermine le comportement qualitatif et quantitatif du *SDH*.

Un système est défini comme étant un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns avec les autres de façon à former une entité unique accomplissant une activité clairement définie (générateur de vapeur, colonne de distillation, moteur électrique, etc.). Souvent, ce sont ces composants technologiques intervenant dans le processus physique ainsi que leurs tâches prédéfinies qui déterminent la nature du système. Dans la littérature, nous avons recensé trois types de systèmes : les systèmes continus, les systèmes à évènement discret et les systèmes dynamiques hybrides.

#### I.3.1. Systèmes continus

Les systèmes continus (*SC*) sont caractérisés par une dynamique dépendant du temps. Les grandeurs physiques (température, pression, volume, etc.) caractérisant l'état du procédé sont généralement continues et de nature analogiques. Le comportement de ce type de système est décrit par des variables (à temps continu/discret), le système est dit continu ou discret (échantillonné). La description de la dynamique du procédé est alors une représentation mathématique, fonction des grandeurs physiques, donnée sous forme d'un modèle d'entrée / sortie ou d'espace d'état.

##### Définition 1.

Formellement, un système continu est composé d'un 5-tuple :

$$SC = (T, X, X_0, U, \Phi):$$

- $T \in \mathcal{R}$  est l'intervalle du temps
- $X \subseteq \mathcal{R}^n$  est l'espace d'état continu.
- $X_0 \subseteq X$  est l'espace d'état initial du système continu,

- $U \subseteq \mathcal{R}^r$  est le vecteur de commande,
- $\Phi$  le vecteur champ déduit par l'équation différentielle de la forme

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)); \quad x(t_0) = x_0$$

$f: X \rightarrow \mathcal{R}^n$  vecteur champs continu

### I.3.2. Systèmes à événements discrets

Un système à événement discret (*SED*) est caractérisé par son comportement dynamique qui se traduit par le changement d'état suite à l'occurrence d'un événement. Les événements peuvent être de deux types : l'événement temporel est un événement uniquement déterminé par rapport à la variable *temps* ; l'événement contrôlé dépend des conditions d'évolution du système et s'obtient par des règles, il définit soit un événement d'état, soit un événement de commande. L'instant d'occurrence d'un événement n'est pas connu a priori. Pour cette catégorie de système, la notion d'événement est essentielle. Il s'agit des systèmes pour lesquels la dynamique est gouvernée par des événements dont les dates d'occurrence n'ont pas une importance fondamentale, seul compte réellement l'ordre d'occurrence des événements. Les variables qui décrivent les *SED* prennent leurs valeurs dans un ensemble dénombrable [1].

#### Définition 2.

Formellement, un système à événement discret est composé d'un 5-tuple :  $SED = (T, Q, Q_0, U, \Phi)$  :

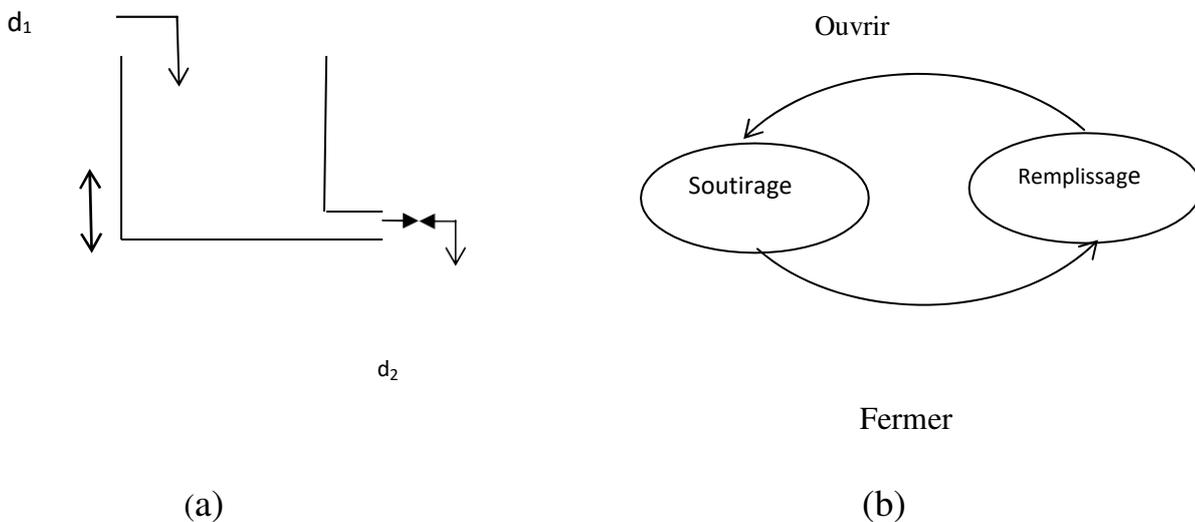
- $T \in \mathcal{N}$  est l'intervalle de temps
- $Q$  est l'ensemble des états finis ou infinis,
- $Q_0 \subseteq Q$  est l'ensemble des états initiaux,
- $U$  est l'ensemble fini des entrées (alphabets),
- $\Phi: Q \times Q$  est la fonction de transition entre les états, elle détermine le comportement du système.

**Exemple 1.** Considérons un bac qui peut être rempli et vidé (figure (1.a)). Le comportement de ce système peut être décrit par la variable continue  $h$  si l'on s'intéresse au niveau de remplissage du bac.

Dans ce cas on peut modéliser le système par l'équation différentielle :

$$\dot{h} = d_1 - d_2 * a \tag{1.4}$$

$d_1$  étant le débit d'alimentation,  $d_2$  le débit de soustraction et  $a$  une variable booléenne décrivant l'état de la vanne :  $a=0$  si la vanne est fermée et  $a=1$  si la vanne est ouverte. Ce même système peut être décrit par une variable discrète qui indique si le bac est en état de soutirage ou en état de remplissage, dans ce cas le système peut être modélisé par un automate à état fini (figure (1 .b)).



**Figure I.1.** a- Système physique (continu/discret). b- Automate correspondant.

### I.3.3. Systèmes dynamiques hybrides :

Le mot *hybride* signifie, en général, la composition ou la nature hétérogène. Le terme «*Systèmes hybrides* » s'applique lorsque les systèmes ont un comportement défini par des entités ou des processus de caractéristiques distinctes. Un système dynamique hybride (*SDH*) est un système dynamique où le comportement est déterminé par l'interaction des deux dynamiques : continue et discrète.

#### Définition 3.

Formellement, un système dynamique hybride (*SDH*) est composé d'un 5-tuple :

$$SDH = (T, (x, q), (x_0, q_0), U_c \cup U_d, \Phi):$$

- $T \in \mathcal{R}^?$  est l'intervalle de temps

- $(x, q) \subseteq X \times Q$  représente l'état complet du système hybride.
- $(x_0, q_0)$  est l'ensemble des états initiaux.
- $U_c \cup U_d$  représente l'ensemble des commandes continues et discrètes.
- $\Phi : X \times Q \rightarrow \mathcal{R}^n$  définit un sous-ensemble des trajectoires pour chaque état discret.

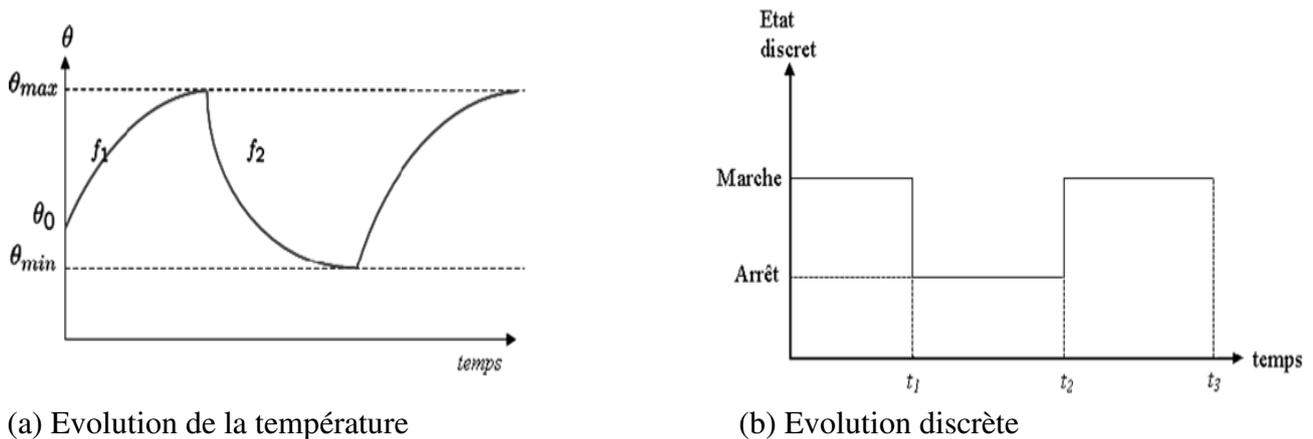
## I.4.Exemples de systèmes dynamiques hybrides :

Nous avons recensé dans la littérature six classes de systèmes hybrides. Des exemples pris dans des domaines très variés nous permettrons d'illustrer le caractère très général du problème.

### I.4.1.Systèmes continus supervisés par un contrôleur à événements discrets

Un procédé continu, commandé ou supervisé par un système à événements discrets, est appelé système hybride par la commande. Cette classe de systèmes hybrides est largement étudiée dans la littérature [2].

Où  $\alpha \in \mathbb{R}$  est une constante réelle positive qui dépend de la puissance du système de chauffage, et  $k$  est une constante déterminée par la pièce. Ainsi, l'évolution de la température est contrainte par une équation d'état qui dépend de l'état discret "Marche" ou "Arrêt". Un exemple d'évolution est donné par la figure 2 (a).



**Figure I.2.** Evolution continue et discrète du SDH.

### I.4.2. Systèmes continus comportant des discontinuités :

Les phénomènes de discontinuités se produisent lorsque l'état passe instantanément de sa valeur courante à une autre valeur. Ce phénomène de commutations est illustré à travers l'exemple classique d'une balle en rebondissement ou la collision entre deux corps [3]. Dans les deux cas, la vitesse change brutalement et subit donc un saut.

#### Exemple 2. Balle en rebondissement :

Considérons l'exemple d'une balle en chute libre qui rebondit sur le sol de façon élastique (figure 3). La position initiale de la balle est  $(0, y_0)$ . La vitesse instantanée  $v(t)$  de la balle a deux composantes  $v_y$  et  $v_x$ . Quand la balle arrive au sol, elle rebondit et la composante de la vitesse  $v_y$  change de signe.

Lors du contact avec le sol aux instants  $t_i$ , la composante de vitesse  $v_y(t_i)$  change de signe de façon instantanée et passe à la valeur  $-v_y(t_i)$ . La balle effectuera une nouvelle trajectoire avec la vitesse  $v(t)$  ( $t \geq t_i$ ) de composantes  $-v_y$  et  $v_x$ . Ainsi le changement de signe de la composante de vitesse  $v_y$  permet d'avoir des évolutions différentes de la balle. Chaque état de la vitesse caractérise une dynamique des variables  $x$  et  $y$ .

De tels phénomènes peuvent être étudiés soit en considérant des équations d'états non linéaires discontinues (et de ce fait non dérivables) soit en considérant une succession d'équations d'état continues.

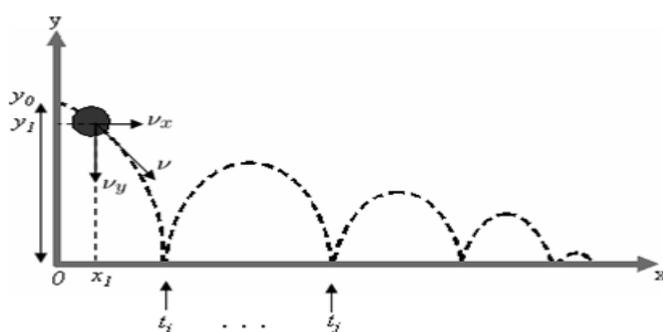


Figure I.3. Balle en rebondissement.

### I.4.3. Systèmes comportant des éléments discrets et continus :

Certains systèmes sont constitués intrinsèquement d'éléments de type "*continu*" (les variables contraintes ou produites ont une évolution continue) et d'éléments de type "*discret*" (les variables contraintes ou produites sont à valeur discrète). Les circuits électroniques, contenant des éléments à caractéristiques continues (résistance, condensateur, self, etc.) et des éléments à caractéristiques discrètes (interrupteur, diode, thyristor, etc.), sont des exemples de tels systèmes.

#### Exemple 3. Circuit électrique :

Le système illustré par la figure 4 est composé d'une source de courant, d'une diode  $D$ , d'une résistance  $R_L$ , d'un interrupteur  $Sw$ , et d'une self  $L$  [4]. Quand l'interrupteur est fermé, le courant  $I_L$  traversant la self génère un flux magnétique  $\phi_0$ . Lors de l'ouverture de l'interrupteur le flux se décharge très rapidement

Ce changement d'état discret de l'interrupteur crée une discontinuité du flux qui passe de  $\phi_0$  à

0. Cette variation du flux entraîne l'apparition d'une force électromotrice (*f.e.m*) selon la loi :

$f.e.m = d\phi/dt$  donc d'un courant induit  $I_i$ . Le rapport  $d\phi/dt$  est important, la différence de potentiel  $V_L$  (qui est la *f.e.m*) au borne de la self est donc importante.

La diode est alors passante car le courant  $I_L$  généré par la self est supérieur au courant de seuil  $I_s$  de la diode (voir figure 4). Quand le courant  $I_L$  généré par l'inductance devient inférieur à  $I_s$ , la diode passe à l'état "*Bloqué*". Ces différents modes d'exploitation du circuit sont représentés par la figure 5. L'évolution du système met en évidence une dynamique continue entrecoupé par des commutations dues à l'état discret de l'interrupteur qui peut être "*Fermé*" ou "*Ouvert*" et à l'état discret de la diode qui peut être "*Passant*" ou "*Bloqué*". Le changement d'état discret de l'interrupteur crée une discontinuité du flux dans l'inductance qui passe instantanément de  $\phi_0$  à 0.

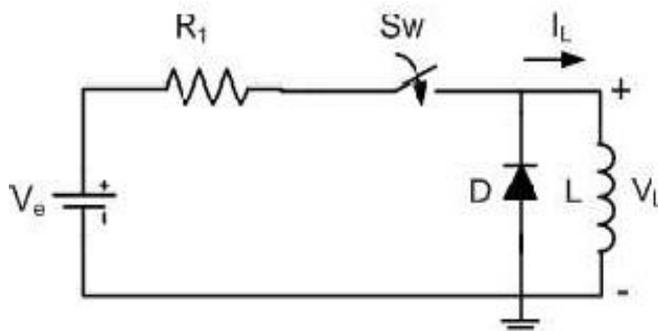
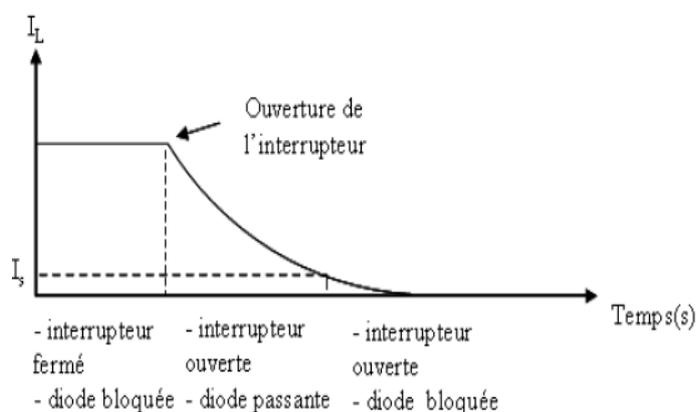


Figure I. 4. Circuit électrique intrinsèquement hybride.



**Figure I.5.** Evolution du courant dans la self.

#### I.4.4. Systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction :

Dans certains cas où les phénomènes physiques sont complexes, la modélisation nécessite l'utilisation de fonctions non-linéaires difficiles à manipuler. Certains travaux proposent d'introduire des phénomènes discrets au sein de l'évolution continue afin de simplifier la modélisation [5].

Un système non-linéaire, un multi-modèle, ou un système continu par parties, correspondent tous à des structures résultant de l'agrégation de modèles continus locaux. Cette succession de modèles continus peut être représentée comme un *SDH*. La dynamique discrète sera introduite par abstraction des dynamiques rapides qui peuvent avoir lieu au moment du changement de modèle (commutations spontanées). Les dynamiques complexes mais très rapides par rapport à la dynamique globale peuvent être négligées. Ces approximations doivent être utilisées avec beaucoup de précautions et dépendent de l'utilisation qui est faite du système et des objectifs visés.

#### Exemple 4. Système hydraulique :

Le système de la figure 6 est constitué d'un réservoir de section  $S$  muni d'une conduite  $C$ . Une vanne pneumatique  $V$  (figure 7) située sur  $C$  et commandée en Tout ou Rien (*TOR*), permet de prélever du liquide pour utilisation. Une pompe  $P$  permet d'alimenter le réservoir et une commande automatique (régulateur *PI*) permet de maintenir un niveau de liquide constant dans le réservoir [6].

Le niveau de liquide  $h(t)$  est une variable dont l'évolution est continue. Sa valeur dépend des débits entrants (sortie de la pompe) et sortants (évacuation au travers de la vanne  $V$ ). Ces deux débits ont eux aussi des évolutions continues : le débit d'entrée est régulé (régulateur  $PI$ ) et la valeur du débit de sortie est fonction de l'ouverture (restriction) de la vanne pneumatique. L'ouverture de la vanne est en toute rigueur une fonction continue dans le temps. Son évolution est donnée par la fonction  $\phi_e, \phi_e(x)$ , où  $x$  est la position de la tige.

Lors d'une commande d'ouverture (passage de  $x = 0\%$  à  $x = 100\%$ ), l'évolution continue de  $x$ , donc  $\phi_e$ , est très rapide et la dynamique peut donc être négligée. Ainsi un état discret associé à la vanne peut être considéré. Cet état prend deux valeurs ou modalités correspondant respectivement à  $x = 0\%$  (*vanne fermée*) et  $x = 100\%$  (*vanne ouverte*). Ceci suffit en première approximation à caractériser le comportement de la vanne dans le système global. L'introduction de cet état discret met en évidence deux modes de fonctionnement du système et permet de simplifier la modélisation complète du système.

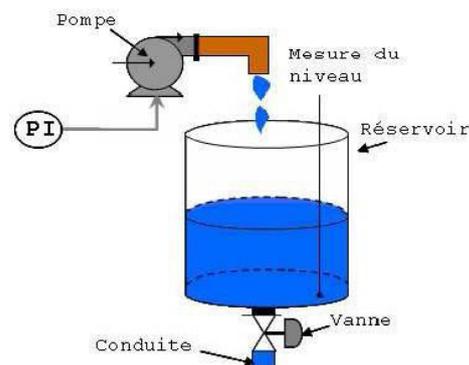


Figure I.6. Système hydraulique

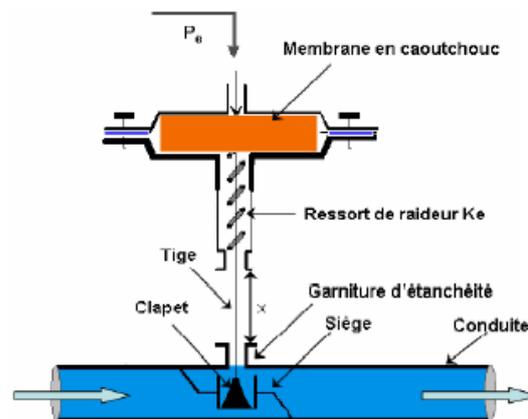


Figure I.7. Exemple de vanne pneumatique.

**I.4.5. Systèmes discrets pour lesquels des dynamiques continues sont introduites par abstraction :**

Ces systèmes sont généralement des systèmes ayant des dynamiques discrètes riches, c'est-à-dire dont l'évolution de l'état discret est rapide par rapport à la dynamique globale du système [7].

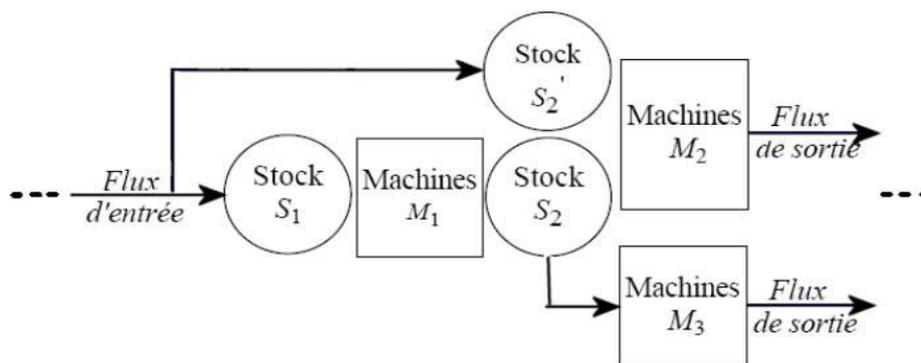
**Exemple 5. Système de production :**

Le système illustré par la figure 8 est composé d'un ensemble de ressources ou stocks ( $S_1, S_2, S_3, \dots$ ) et d'un groupe de machines ( $M_1, M_2, M_3, \dots$ ). Chaque groupe est composé d'un nombre de machines identiques. Les stocks ( $S_1, S_2, S_3, \dots$ ) sont utilisés pour emmagasiner les pièces (matière première ou pièces en cours de traitement) jusqu'au moment où une machine en aval est disponible pour commencer un nouveau traitement. Ce système de production peut être vu comme étant un système hybride ayant une évolution continue, représentant les flux de pièces dans le système et une évolution discrète liée à l'état des ressources. Le niveau des pièces dans les stocks peut être modélisé par une équation différentielle linéaire :

$$\mathbf{x}'(\mathbf{t}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{t})$$

Où  $x = [x_1 \dots; x_i \dots; x_n]$ ,  $t$  représente le niveau de pièces dans les stocks (la composante  $x_i$  représente le niveau de pièces dans le stock  $S_i$ ) et  $u$  étant le débit des pièces en entrée.

L'évolution discrète du système de production est décrite par l'occurrence des événements associés à l'intervention de l'opérateur pour démarrer ou arrêter le flux d'entrée et aux états des ressources. L'occurrence de l'un de ces événements entraîne le changement de l'état discret: flux d'entrée démarré, flux d'entrée arrêté, machine 1 en marche ou en arrêt, etc.



**Figure I.8.** Architecture générique d'un système de production.

#### I.4.6. Systèmes complexes composés de sous-systèmes continus et discrets :

Dans les industries dites de « *process* », élaborant les matières premières qui seront travaillées par les industries manufacturières, la production peut se faire en continu ou par des traitements successifs : on parle de procédés de *traitement par lots*. Ces procédés, très présents dans le domaine de l'industrie chimique, pharmaceutique ou agro-alimentaire, comportent des séquences de transfert et de conditionnement relevant des systèmes à événements discrets (*SED*) et des opérations continues pendant un certain temps : évaporation, cristallisation, mélange, etc.

##### Exemple 6. Procédé Batch :

Les procédés Batch sont constitués intrinsèquement de plusieurs sous-systèmes hybrides. Chacun de ces sous systèmes peut présenter les caractéristiques citées précédemment. La figure 9 présente un schéma simplifié d'une chaîne de fabrication de produits chimiques, composée de trois réservoirs  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , des vannes  $V_i$ ;  $i = 1$  à 5 des pompes  $P_1$  et  $P_2$ , d'un thermostat, d'un agitateur, d'un réacteur, d'un convoyeur et des stocks  $S_1$  et  $S_2$ . Les vannes permettent de fournir des produits qui seront mélangés à d'autres produits dans les réservoirs  $T_1$ ,  $T_2$ , et  $T_3$ . Les vannes, les pompes, la résistance thermique, l'agitateur et le convoyeur sont commandés en Tout ou Rien.

L'objectif du procédé est de produire, à partir de deux produits "A" et "B" un produit chimique "D". Les produits A et B fournis à travers les vannes  $V_1$  et  $V_2$  au réservoir  $T_1$  sont d'abord mélangés et ensuite chauffés. Le mélange de A et B est alors transporté au réservoir  $T_2$  où il réagit avec un autre produit C. Le produit résultant est ainsi transporté dans le réservoir  $T_3$ , attendant pour remplir les bouteilles vides qui sont ensuite transportées par le convoyeur servi par le stock  $S_1$ . La nature hybride du système est clairement illustrée dans cet exemple, d'abord il contient des processus discrets (l'état des stocks  $S_1$ ,  $S_2$ ) et des processus continus (l'évolution des niveaux, la température, la concentration des produits dans le réservoir 1). En plus, il est piloté par une commande discrète de type Tout ou Rien [5].

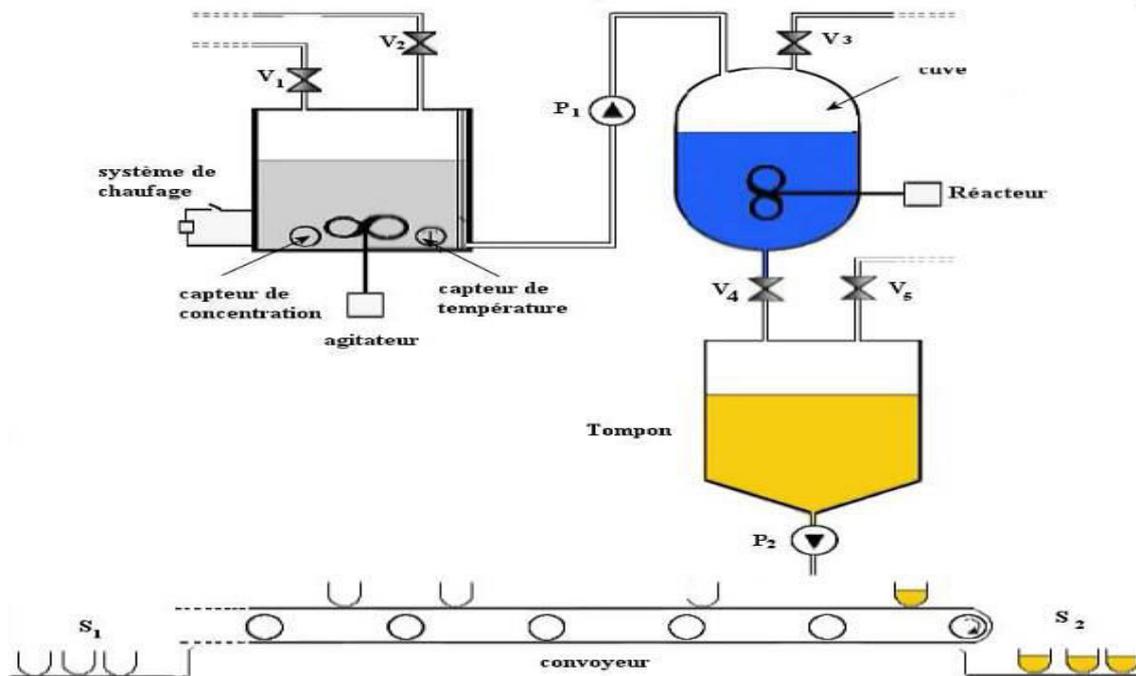


Figure I.9. Procédé batch.

### I.5. Structure générique d'un système dynamique hybride :

D'une façon générale, un système dynamique hybride *SDH* est composé d'un système dynamique continu, d'un système à événement discrets et d'une interface qui gère les interactions entre les deux évolutions (continue et discrète) (voir figure 10) [5].

#### ➤ La partie discrète :

La partie discrète est associée à un système à événement discret *SED* dont l'évolution est représentée par un ensemble fini d'états. La transition d'un état discret à un autre état discret successeur est réalisée grâce à l'occurrence d'événements. Ces événements sont de deux types : événements contrôlés et événements autonomes.

Les modèles les plus classiques permettant d'appréhender les *SED* sont les automates à états finis, les réseaux de Pétri et les State harts [18].

#### ➤ La partie continue :

L'évolution de la partie continue est caractérisée sur un espace de temps continu et peut être représentée de différentes manières (équations différentielles ordinaires, algèbro-différentielles, les fonctions de transfert, les bonds graphs, etc.). Le modèle de comportement continu est exprimé sous la forme d'état :

$$Y(t) = \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), z(t)) \\ h(t) = (x(t), z(t)) \end{cases} \quad (1.5)$$

Où  $x(t)$  est le vecteur d'état,

$y(t)$  est le vecteur des sorties,

$z(t)$  est un vecteur regroupant les entrées connues ou inconnues, les perturbations, etc.,

$f$  et  $h$  sont des fonctions vectorielles linéaires ou non linéaires.

➤ **L'interface :**

L'interface traduit l'interaction entre la partie continue et la partie discrète du SDH. La représentation formelle de l'interface est plus complexe et dépend des approches de modélisation considérées.

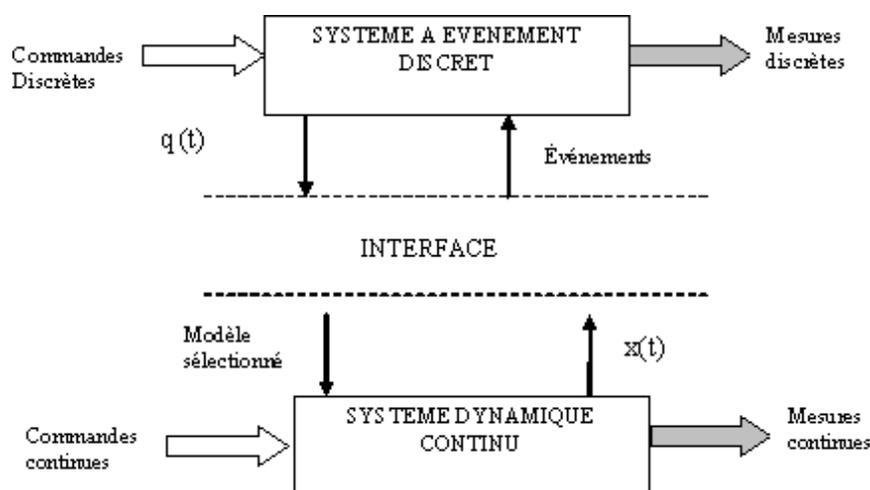


Figure I.10. Structure du système dynamique hybride.

**I.6. Catégories de phénomènes hybrides :**

L'influence de l'évolution de la partie continue sur l'évolution de la partie discrète et inversement est une transition correspondant à un changement de modalité de l'état discret qui entraîne soit la modification du modèle d'état continu, on parle alors de commutation ("*switching*"), soit une discontinuité du vecteur d'état discret, on parle alors de saut ("*jump*"). Une classification

des phénomènes physiques considérés comme hybrides en quatre catégories est présentée par Branicky [3]. Commutations autonomes (avec continuité de l'état) caractérisées par un changement de  $x$  lorsque l'état continu  $x$  atteint certains domaines dans l'espace des états continus. Exemple d'un circuit électrique comportant une diode.

Saut autonome où la variable d'état  $x$  change de façon discontinue, lorsqu'elle atteint une certaine région de l'espace d'état. La balle en rebondissement est un exemple illustratif de ce phénomène.

Commutations contrôlées où la variable d'état  $x$  change instantanément en réponse à une entrée externe (commande). Le système constitué d'un réservoir avec une vanne d'alimentation et une vanne d'évacuation présente clairement un cas de système à commutation commandée.

- Sauts commandés où la valeur de  $x$  change de façon discontinue sous l'influence d'une action extérieure. Les systèmes électrotechniques avec des entrées impulsives illustrent un cas de saut commandé.

### **I.7.Complexité des systèmes dynamiques hybrides :**

Van der Schaft et Schumacher énumèrent les principaux comportements types que nous pouvons rencontrer lors de l'étude des comportements d'un *SDH* [9]:

- Le système atteint un état où il n'existe plus de trajectoires continues définies et où il n'y a aucune transition menant d'un état vers un autre. Le système est dit alors « *bloqué* ».
- Le système commute indéfiniment entre deux états, cette situation est appelée « *livelock* ».
- Les durées des trajectoires continues (i.e., le temps pendant lequel le système évolue entre deux sauts/commutations) deviennent de plus en plus petites. Le système est dit « *Zeno* ».
- L'ensemble des trajectoires est vaste et nous n'avons donc pas une solution unique.
- L'évolution du système rencontre plusieurs événements simultanés. Nous avons plusieurs changements d'état au même instant.
- Un état du système commute sur lui-même indéfiniment.
- La partie continue tend vers l'infini dans un temps fini.

En fait, les problèmes rencontrés lors de l'étude des trajectoires d'un système dynamique hybride sont à la fois les problèmes rencontrés lors de l'étude d'un système continu et d'un système discret avec en plus des phénomènes qualifiés d'hybrides.

### **1.8. Modèles formels pour les *SDH* :**

D'une manière générale, un modèle est une représentation abstraite permettant d'agréger l'ensemble des connaissances que l'on a du système. Un meilleur modèle reproduit les caractéristiques importantes du système pour une application donnée tout en éliminant les détails qui ne sont pas pertinents pour l'analyse.

Les travaux sur la modélisation des *SDH* sont récents et continuent d'être un thème de recherche traité par des communautés scientifiques différentes. Un nombre important de travaux dédiés à la modélisation des *SDH* existe dans la littérature [10], [11] et [12]. Plusieurs formalismes mathématiques pour la représentation d'un *SDH* ont été proposés dans le but d'établir des concepts comme la stabilité, la contrôlabilité, le monitoring et la surveillabilité ainsi que de techniques de commande et de vérification [5]. Ces dernières années, un ensemble de travaux sur la modélisation des *SDH* par les réseaux de Pétri hybrides ont été développés [13], [14], [15], [16].

D'une manière générale, une synthèse des différentes approches de modélisation des *SDH* peut être résumée en trois grandes classes : les approches basées sur l'extension des modèles continus, celles basées sur l'extension des modèles discrets et celles qui sont mixtes.

#### **1.8.1. Approches basées sur une extension des modèles continus :**

L'approche bond graph hybride est une extension des modèles bond graph a été proposée. Dans cette approche, l'ensemble de toutes les dynamiques continues d'un système à commutations est représenté sous la forme d'un modèle bond graph incluant des éléments spécifiques appelés interrupteurs idéaux. Les changements d'état de ces interrupteurs modifient instantanément la structure du modèle de façon à traduire ses différents modes de fonctionnement. Ces interrupteurs constituent en réalité une extension du formalisme bond graph, à l'origine destiné à décrire du point de vue énergétique la dynamique de systèmes exclusivement continus [17] et [18]. L'intérêt d'utiliser les bonds graph pour modéliser la partie continue des systèmes à commutations réside à la fois dans sa modularité intrinsèque, qui permet la construction de modèles complexes par simple composition de modèles élémentaires, et aussi dans l'existence de procédures systématiques pour déduire à partir des modèles construits graphiquement, des schémas de calcul explicites en vue de leur simulation.

De telles procédures, bien connues dans le cas de modèle bond graph standard, ont été généralisées aux modèles incluant des interrupteurs idéaux [19] [20], Ces éléments, qui selon la terminologie propre au bond graph alternent des comportements en source d'effort et en source de

flux en fonction de leur état binaire, ont initialement été introduit pour modéliser les interrupteurs physiques rencontrés dans les circuits électriques notamment les dispositifs à semi-conducteurs.

### I.8.2. Approches basées sur une extension des modèles discrets :

Un exemple type de cette extension est celui des *RdP* hybrides. Dans les *RdP* discrets, le marquage d'une place peut correspondre soit à un l'état booléen d'un élément du système (ressource disponible ou pas), soit à un nombre entier naturel qui compte une capacité d'objets (nombre de pièces dans un stock). Cependant, lorsqu'un *RdP* contient un grand nombre de jetons, le nombre d'états atteignables explose. Cette limitation des *RdP* a conduit à l'apparition des *RdP* . Le marquage de places dans un *RdP* continu est un nombre réel et le franchissement des transitions est un processus continu. Ainsi, le franchissement des transitions consiste à retirer une quantité de marquage  $q$  des places d'entrées de la transition et de rajouter la même quantité  $q$  aux places de sorties de cette transition. Cette modélisation fournit une très bonne approximation pour certains modèles discrets. Cependant, si le nombre de pièces dans un stock peut être approximé à un processus continu, l'état d'un élément du système tel qu'une vanne ouverte ou fermée ne peut être modélisé par un nombre réel. La modélisation d'un système hybride conduit naturellement aux *RdP* hybrides contenant une partie discrète et une partie continue [21], [22].

Un *RdPH* est composé de places et de transitions continues (*C-places* et *C-transitions*) et des places et transitions discrètes (*D-places* et *D-transitions*). Le marquage d'une *C-place* est représenté par un nombre réel, dont l'unité est appelée marque, et le marquage d'une *D-place* est représenté par un nombre entier dont l'unité est appelée jeton. La partie continue permet de modéliser les flux continus tandis que la partie discrète modélise le fonctionnement logique (*vanne ouverte/fermée*). Le *RdPH* de la figure 2 modélise un *SDH* composé de deux réservoirs.

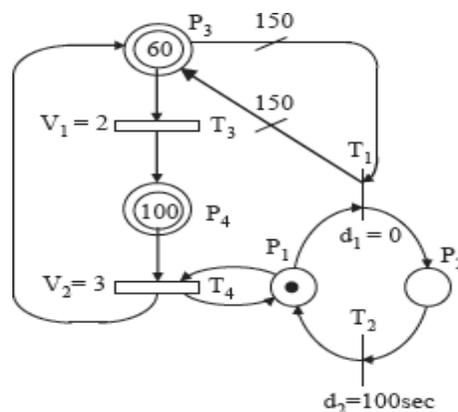


Figure I.11. Réseau de Pétri hybride

Nous pouvons citer quelques exemples d'usage des *RdPH* : modélisation d'un système d'approvisionnement en eau [23], un système hydraulique pour la production d'électricité et un système de fabrication de transistors.

### I.8.3. Approches mixtes :

Parmi ces approches nous rencontrons les *RdP* mixtes et les State harts hybrides. Les modèles dits mixtes reposent sur la collaboration de deux sous-modèles, l'un pour l'aspect événementiel, basé par exemple, sur les automates à états finis ou les *RdP* et l'autre pour l'aspect continu basé sur des équations d'états. L'aspect hybride est pris en compte dans l'interface entre les deux sous-modèles. Parmi les modèles basés sur cette approche nous trouvons les automates hybrides. Les automates à états finis sont constitués de sommets représentant les états discrets, de transitions entre sommets définies par un triplet: sommet source, sommet destination et événement, d'un ensemble fini de symboles décrivant les événements (appelé alphabet) et d'un état initial. Le comportement global d'un système à événement discret est décrit par l'ensemble des trajectoires d'événements qui peuvent être exécutées en parcourant l'automate à états finis à partir de l'état initial.

Les automates temporisés sont des automates finis étendus par un ensemble de variables réelles, appelées *horloges*. Les automates hybrides sont une extension des automates temporisés où la dynamique continue n'est plus représentée par des horloges mais par des équations différentielles quelconques. De façon informelle, un automate hybride apparaît comme l'association d'un automate d'état fini pilotant un ensemble d'équations dynamiques continues [24]. Cependant, il est rapidement apparu que même pour traiter des problèmes simples, il est nécessaire d'introduire un mécanisme permettant de structurer les modèles et de les définir de manière modulaire. Ainsi, la composition d'automates hybrides est basée sur la composition synchrone. Cet état de fait rend difficile la conception et la description des automates hybrides pour la modélisation du comportement d'un système. Notons que cette difficulté n'altère pas l'intérêt des automates hybrides pour les traitements théoriques tels que la vérification, la synthèse de la commande ou la définition des interactions entre la partie événementielle et la partie continue [24].

Dans [25], les auteurs définissent l'automate hybride comme étant une extension de l'automate discret en associant une évolution continue à chaque état discret. La composante continue est décrite par un ensemble d'équations différentielles et la composante discrète par un automate à états fini. Un automate hybride évolue par alternance de pas continus, où les variables d'état et le temps évoluent de façon continue, et de pas discrets où plusieurs transitions discrètes et instantanées peuvent être franchies.

D'un point de vue informel et général, un automate hybride apparaît comme un automate à état

fini pilotant un ensemble d'équations différentielles modélisant la dynamique continue du système. Le modèle est composé d'un ensemble fini des variables réelles  $X$  et d'un graphe d'évènements étiqueté  $(S, E)$ . L'ensemble  $S$  est composé par les sommets du graphe et les éléments de l'ensemble  $E$  représentent les transitions discrètes.

L'état de l'automate change instantanément à l'occurrence d'un évènement discret ou par l'écoulement du temps lors de la validation d'une condition logique spécifiée sur la valeur de la variable continue

Considérons l'automate hybride de la figure 1.b, il décrit le comportement du système de bacs présenté par la figure 1.a. On veut garder le niveau de liquide dans chaque réservoir au dessus des seuils  $H_{1min}$  et  $H_{2min}$ .

L'automate comporte 4 sommets  $S_1, S_2, S_3, S_4$  et trois variables d'états continues  $h_1, h_2$  (modélisant les niveaux de liquides dans les deux réservoirs) et  $x$  (horloge modélisant le délai entre l'instant de décision de commutation de la vanne et sa commutation effective). Les transitions entre sommets sont franchies si l'un des seuils est atteint.

Lorsque la vanne est dans la position A, la hauteur des liquides dans les réservoirs varie d'une manière linéaire suivant les fonctions (avec  $h_{10}$  et  $h_{20}$  : les hauteurs initiales) :

$$h_1(t)=h_{10}+7.t \quad h_2(t)=h_{20}-7.t \tag{1.6}$$

De la même manière, si la position de la vanne est B, les équations deviennent

$$h_1(t)=h_{10}-5.t \quad h_2(t)=h_{20}+5.t \tag{1.7}$$

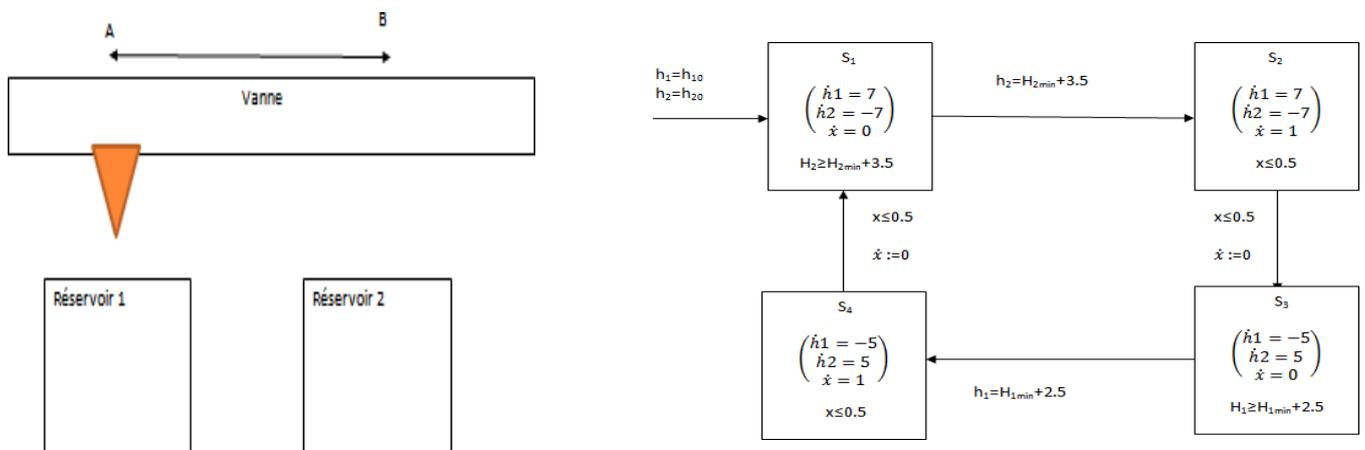


Figure I.12. a-système de bacs.

b -Automate hybride correspondant

Un second exemple d'outils mixtes est les Statecharts hybrides. Ces derniers ont été définis comme une solution pour améliorer la structuration des spécifications à base d'automates afin de faciliter leur description, leur lecture et leur modification. Les Statecharts sont un outil de modélisation graphique pour les systèmes réactifs complexes. Les transitions sont étiquetées par des expressions de la forme "événement déclenchant/action"; où l'action est synchrone avec l'événement déclenchant. Les Statecharts sont habituellement caractérisés par l'expression:

***Statechart = Automates + Profondeur + Orthogonalité + Communication par diffusion.***

Un autre exemple d'outils mixtes les *RdP* mixtes (*RdPM*). Comme pour les Statecharts, les *RdPM* reposent essentiellement sur la définition de l'interface entre la dynamique continue et celle événementielle d'un système. Les *RdPM* donnent une interprétation aux *RdP* par un ensemble d'équations différentielles. Un *RdPM* complet d'un système est modulaire et est constitué d'un ensemble de *RdP* interprétés par des équations algébro-différentielles, chaque *RdP* modélisant les changements d'états discrets d'un phénomène physique. Enfin et de même que pour les automates ou les Statecharts hybrides, l'aspect continu agit sur l'évolution du marquage par l'intermédiaire de conditions de validations associées aux transitions [24].

## **I.9. Outils de simulation des SDH :**

Les systèmes complexes se composent d'un grand nombre de composants agissant les uns sur les autres avec des comportements non-linéaires et hybrides. La construction précise des modèles efficaces de simulation pour ces systèmes est une tâche difficile. Des chercheurs ont adopté le composant orienté objet [26] pour modéliser de grands systèmes hybrides. Les modèles mathématiques indiquent les différents comportements des composants et les modèles formels du calcul définissent des interactions entre les composantes, qui fournissent la base pour développer des environnements efficaces pour simuler le comportement des systèmes hybrides

De nombreux outils de simulation ont vu le jour, ils dépendent généralement du modèle utilisé pour représenter le SDH (bond-graph, automate hybride, etc.), de leur objectif (orienté vers une classe d'application ou au contraire à vocation générale) et du type de simulation utilisée (séquentielle ou globale).

Nous pouvons citer quelques outils de simulation comme :

- *HYSDEL* (*Hybrid System Description Language*) est un langage basé sur la

modélisation *MLD* du système hybride. Cet outil peut être employé pour l'analyse et la synthèse de la commande du *SDH* [27]

- *YAHMST (Yet another Hybrid Simulation Tool)* a été développé au laboratoire d'automatique de Grenoble et appliqué au cas d'un processus batch complexe. Il est implanté à l'aide du langage de programmation orienté objet Java et permet la structuration hiérarchique du modèle. Basé sur l'association à un mode discret d'un jeu d'équations continues, il intègre au solveur un détecteur d'événements, facilitant le calcul des instants de commutation [28].

- *HyBrSim (Hybrid Bond Graph Simulator)* est un outil réalisé sur la base des bonds graphs hybrides. Cet environnement expérimental de modélisation permet d'établir un cadre formel au *SDH* considéré [29]

- *HSML (Hybrid Systems Modeling Language)* a pour but de définir formellement le système et fournir une base pour les langages « *front ends* » pour des environnements de simulation des systèmes hybrides. Le langage *HSML* permet une construction hiérarchique et modulaire des modèles; définition du temps continu, du temps discret et composants à base logique; établissement du programme prioritaire des composants en temps discret ; mécanismes pour la manipulation d'état-événement ; traitement des conflits; vérification rigoureuse de type et de gamme; une base sémantique stricte qui permet la vérification et la validation du modèle.

- *HSCAP (Hybrid Sequential Causal Assignment Procedure)* permet la mise à jour dynamique de l'information causale [30]. Il est Constitué de structures de diagramme de bloc reconfigurable.

### **I.9.1. Analyse des *SDH* :**

La simulation est une approche expérimentale permettant d'analyser les propriétés du système. Cependant elle ne permet pas en général de considérer toutes les évolutions du fait de l'explosion combinatoire du nombre de situations possibles. Ainsi, de nombreux travaux ont été consacrés à la vérification formelle en parallèle avec les travaux sur les propriétés structurelles des modèles comme la stabilité, l'observabilité et la commandabilité.

- **Vérification des *SDH* et accessibilité :**

La vérification formelle des propriétés est un domaine très important dans l'analyse des *SDH*. Elle permet de s'assurer que des problèmes tels que le blocage ou le non déterminisme dû aux transitions discrètes ne se posent pas lors de l'exécution du modèle. Notamment, si une séquence infinie d'événements se produit en un temps fini, comme dans le cas où deux phases bouclent sur elles-mêmes, alors l'exécution ne s'arrêtera jamais. Cela signifie que le modèle représentant le système n'est pas adapté ou que le système lui-même est mal conçu.

La vérification de propriétés de sûreté et l'analyse de l'accessibilité des *SDH* sont en général des problèmes non décidables [25], toutefois quelques techniques et algorithmes sont de plus en plus utilisés. La vérification a été principalement appliquée à des systèmes modélisés par des automates hybrides. Il s'agit d'une vérification du modèle au sens informatique en utilisant la logique temporelle ou le model-checking . Parmi les outils informatiques dédiés à la vérification nous pouvons citer *HyTech (HYbrid TECHnology)*, conçu sur la base d'automates hybrides linéaires [25].

- **Vérification des *SDH* :**

Un grande part des travaux sur la vérification des *SDH* provient de ceux utilisés pour la vérification des systèmes à événement discrets (*SED*). A ce titre nous pouvons citer deux principales méthodes de vérification : la première est basée sur une abstraction du comportement continu par un *SED* et la seconde tend à adapter les méthodes vouées aux *SED* à la dynamique continue.

La vérification basée sur l'abstraction des événements discrets consiste à définir les régions de l'espace d'état hybride pour construire le modèle discret. Chacune de ces régions est alors associée à un état discret. Les transitions discrètes sont alors établies et les régions sont dédoublées d'une manière itérative selon les considérations de l'accessibilité. Le processus itératif du modèle discret s'arrête quand il n'y a plus de changement de l'ensemble des secteurs hybrides dans deux itérations consécutives. Le modèle discret est alors une bi-simulation du système hybride qui peut être employé pour la vérification.

Une des difficultés de cette approche est le calcul de l'ensemble hybride de prédécesseurs d'un secteur. La difficulté principale est liée à l'algorithme itératif où il est impossible de garantir sa convergence. Afin de palier cette difficulté, une décomposition itérative de la région est

généralement arrêtée à une certaine étape. Le modèle discret résultant est alors une abstraction du système hybride [31] et [32].

Vérification basée sur l'accessibilité des systèmes hybrides :

Une deuxième famille d'approches s'intéresse à la vérification des propriétés d'accessibilité des systèmes hybrides. Cette restriction aux propriétés d'accessibilité peut sembler être importante. Tant que l'espace d'états des *SDH* inclue implicitement le temps, plusieurs propriétés importantes comme celles de la sûreté peuvent être exprimées comme celles de l'accessibilité. La vérification de l'accessibilité est intégrée dans les outils comme HyTech.

I.9.2. Stabilité, observabilité et commandabilité :

Des travaux sur l'analyse des propriétés structurelles des *SDH* concernent essentiellement l'étude de la stabilité, de l'observabilité et de la commandabilité. La plupart de ces travaux tendent à étendre les approches classiques comme celle de Lyapunov pour l'étude de la stabilité et les méthodes de discernement d'état pour caractériser formellement l'observabilité des *SDH*

L'étude de la stabilité des *SDH* a donné lieu à de nombreux travaux. Par contre, les problématiques liées à la commandabilité et à l'observabilité du système n'ont pas suscité autant d'intérêt dans la communauté des systèmes hybrides.

**Synthèse de la commande des *SDH* :**

La problématique de la commande des *SDH* consiste dans la synthèse d'une commande admissible menant le système d'une "*région hybride initiale*" à une "*région hybride finale*" pendant un intervalle de temps fini. Pour cela, deux orientations peuvent être considérées: synthèse des contrôleurs discrets, et synthèse des contrôleurs hybrides.

La synthèse d'un contrôleur discret est basée sur le principe de recherche d'une stratégie discrète qui permet de restreindre le comportement du système à satisfaire les spécifications de commande.

La synthèse d'un contrôleur hybride s'intéresse davantage à la dynamique continue du système hybride. La commande recherchée porte essentiellement sur la partie continue (régularisation autour de l'origine, optimisation d'un critère portant sur les variables continues, etc.). De nombreuses approches issues de la commande des systèmes continus sont donc proposées. Trois types de commandes sont ainsi considérés pour les systèmes hybrides: la commande optimale. la

commande prédictive et la commande stabilisante.

### I.9.2. Surveillance des *SDH* :

La surveillance n'a pas reçu beaucoup d'attention dans la communauté des systèmes hybrides. La plupart des travaux de surveillance à base de modèle qui ont été réalisés, se basent sur des modèles d'abstraction du système hybride afin de ramener la surveillance des *SDH* à un problème de surveillance soit de systèmes purement continus, soit de systèmes purement discrets [33]. La surveillance à base de modèle mixte a été également considérée dans les travaux de [34]. Ces deux derniers étendent les méthodes classiques de surveillance comme l'approche des *observateurs* ou les approches de diagnostic qualitatives pour la détection et la localisation des défaillances du *SDH*. Cependant toutes ces approches nécessitent en général d'utiliser un grand nombre de capteurs qui permettent de connaître la modalité de l'état discret courant dans lequel le système se trouve.

### I.10. Les réseaux de Pétri hybrides :

Un réseau de Pétri hybride (RdP hybride) [4], est composé par des places et des transitions continues (C-places et C-transitions) et des places et transitions discrètes (D-places et D-transitions). Le marquage d'une C-place est représenté par un nombre réel, dont l'unité est appelée marque, et le marquage d'une D-place est représenté par un nombre entier dont l'unité est appelé jeton.

En exemple, on modélise un système de fabrication produisant des pièces par lots de cinq par un RdP hybride. A la fin de la production de 2 lots de 5 pièces, on entame un nouveau cycle de production. Ce système est illustré par la figure (II.6).

Le marquage de la place  $P_1$  (D-place) est associé au nombre de lots à l'entrée du système de fabrication. Les valeurs  $d_1$  et  $d_2$  représentent les temps de chargement et de déchargement des pièces (D-transitions). La transition  $T_3$  modélise une machine dont la vitesse de production est  $V_3$  (C-transition). Les stocks d'entrée et de sortie de la machine sont respectivement définis par les places  $P_2$  et  $P_3$  (C-places). Le franchissement continu de la transition  $T_3$  correspond à une production continue à la vitesse  $V_3$  quand la place  $P_2$  n'est pas vide. Lorsque  $P_2$  est marqué, le franchissement d'une quantité  $V_3 dt$  de  $T_3$  correspond au retrait de  $V_3 dt$  marques à  $P_2$  et à l'ajout de la même quantité à  $P_3$ .

**I.11. Conclusion :**

Ce chapitre à été dédié à la présentation des systèmes dynamiques hybrides, nous nous sommes limités à quelques descriptions des trois types de systèmes (continus, discrets, et hybrides). Nous avons passé en revue les principales classes de systèmes hybrides considérées dans la littérature pour ensuite dégager les caractéristiques communes qui doivent être prises en considération lors de la phase de modélisation afin de donner une représentation uniforme à tous les types de *SDH*. Les travaux sur les systèmes hybrides sont récents et ont bien évidemment concerné, dans un premier temps, la modélisation. D'autres problèmes ont ensuite été abordés dans la littérature comme la surveillance, la reconfiguration, la stabilité et l'observabilité des *SDH*.

Nous avons fait un tour d'horizon sur l'ensemble des travaux de recherche menés dans le cadre des *SDH*. Ces travaux concernaient les méthodes formelles pour la modélisation, les approches de vérification des propriétés et les outils de simulation. Nous avons aussi soulevé les problèmes liés à la synthèse de la commande et à la surveillance des *SDH*.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les formalismes de modélisation des systèmes hybrides.et les RDP. Nous étions dans l'obligation de présenter tout une variété de Rdp (discret, temporisés, temporels et continus).

## *Modélisation des Systèmes Dynamiques Hybrides*

### **II.1 Introduction :**

Afin d'étudier les Systèmes Dynamique Hybride (SDH), les différentes approches développées pour le système continu et le système discret ont pu être combinées pour définir une modélisation hybride. D'une part les équations différentielles, liées au processus physique, permettent de représenter l'état continu... Et d'autre part un automate ou un réseau de pétri modélise l'état discret du système.

Généralement afin de concevoir une loi de commande un observateur ou un algorithme de diagnostic et de surveillance pour un SDH une modélisation par un automate hybride peut être utilisée. Un automate hybride se définit (d'une manière non formelle) par un ensemble fini d'états discrets appelés modes. Chaque mode est associé aux équations différentielles propres au type de fonctionnement du système. Un ensemble fini de transitions entre les modes est défini pour traduire les possibles passages d'un mode à un autre. Le franchissement d'une transition est géré par loi de commutations.

### **II.2 Structure générique des SDH :**

D'une manière générale, en vue de la commande, un système dynamique peut être décrit en termes de système à commander, représentant la **méthode de fonctionnement** ou **procédé**, et par ses **spécifications de fonctionnement**, décrivant le fonctionnement désiré du système en boucle fermée.

#### **II.2.1 Méthode de fonctionnement :**

Les systèmes dynamiques hybrides sont des systèmes dont le comportement dynamique est défini par l'interaction entre ses dynamiques continues et discrètes. Par conséquent, la méthode de fonctionnement lui aussi possèdera les deux approches [13, 14, 15] :

- approche continu,

- approche discret.

### II.2.1.1 Approche discret :

D'une manière générale, l'évolution discrète d'un système dynamique hybride est déterminée par l'occurrence des évènements d'origine externes ou internes dont la nature peut être contrôlable ou non. L'occurrence des évènements implique des changements de la dynamique continue du système.

Dans les systèmes dynamiques hybrides, ces modifications peuvent être soit par une structure particulière du procédé physique, soit par des entrées/sorties discrètes générées par différents composants du système [9].

#### II.2.1.1.1 Modification de dynamique continue causées par des sorties discrètes :

Dans bon nombre de système réel, les capteurs sont utilisés pour signaler aux opérateurs les dépassements de certains seuils qui peuvent générer un fonctionnement non désiré du système.

Ainsi, leur utilisation est étroitement liée à la manière dont les spécifications de fonctionnement du système sont formulées. Les informations qu'ils fournissent sont explicitement prises en compte lors de la synthèse d'un modèle de commande.

La remarque concernant la nature incontrôlable des événements générés par des capteurs en cas de détection d'un seuil, par exemple, reste toujours vraie.

#### II.2.1.1.2 Modification de dynamique continue causées par des entrées discrètes :

Les éléments fréquemment utilisés dans les systèmes réels qui peuvent introduire des discontinuités dans leur fonctionnement sont les actionneurs discrets (*les vannes avec leurs états correspondants : ouvert ou fermé*). En général, ce sont des éléments auxquels sont associées des fonctions de contrôle système (*la commande manuelle/automatique de fermeture/ouverture de vannes*).

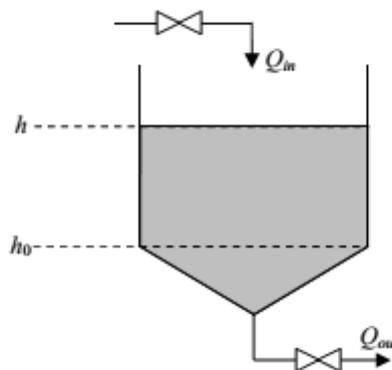
Pour pouvoir intégrer des actionneurs discrets dans le modèle global d'un processus, il faut d'abord définir les concepts de modélisation qui leur correspondent. Les événements modélisant un changement d'état du système seront forcément des événements dont la nature est contrôlable pour pouvoir agir sur leur date d'occurrence.

De plus dans ce cas si, les événements sont utilisés pour modéliser ou concevoir les états des actionneurs. Il s'agit donc de modéliser les états discrets du système global et de définir les transitions entre ces états. Ceci permettra de construire un modèle global de fonctionnement du système.

### II.2.1.1.3 Modification de dynamique continue causées par la structure du système :

Nous allons présenter dans les lignes qui suivent une utilisation des capteurs qui permet la modélisation de discontinuités dans l'évolution du système.

Dans le cas des systèmes réels, les variables d'état  $x(t)$  peuvent modéliser des variations de volume, de température ou bien de concentration. Le champ de vecteur  $f(x(t))$  est en général, une fonction continue mais parfois il peut présenter des discontinuités. Celles-ci reflètent des changements de la dynamique continue dus aux caractéristiques du procédé physique. Pour illustrer ce phénomène, considérons un réservoir représenté par la figure III.1.



**Figure II.1.** Exemple d'une structure physique

La forme du réservoir implique un changement de modèle mathématique, qui modélise la variation du niveau de fluide dans le réservoir, lorsque le niveau est au-dessous du seuil  $h_0$ . Ainsi, si le niveau dans le réservoir respecte la relation  $h > h_0$ , l'équation modélisant la vitesse de variation du niveau dans le réservoir est donnée par :

$$S\dot{h}(t) = Q_{in} - Q_{out} \quad 3.1$$

Où :

$Q_{in}$  et  $Q_{out}$  : Représentent les débits d'entrée et de sortie respectivement.

het  $h_0$ : Les niveaux de fluide.

$S$ : La section du réservoir.

Si  $h < h_0$  alors le niveau dans le réservoir varie en conformité avec la dynamique décrite par :

$$S \left( \frac{h(t)}{h_0} \right)^2 \dot{h}(t) = Q_{in} - Q_{out} \quad 3.2$$

Dans ce cas, les équations différentielles modélisant la variation de niveau dans le réservoir ne présentent pas de discontinuités, cependant dans la dynamique du système on distingue deux comportements différents. Pour différencier ces deux comportements, la solution repose sur l'utilisation d'une variable discrète associée à chaque dynamique continue.

Dans les procédés réels, cette distinction peut se faire en utilisant un capteur qui détecte le seuil où le changement de modèle intervient. Dans l'exemple considéré, pour distinguer les deux comportements du système, l'utilisation d'un capteur qui détecte le seuil  $h_0$  peut fournir cette information.

Les changements de comportement dont l'origine se trouve dans la structure physique du système correspondent au phénomène de commutation autonome. L'utilisation des capteurs, pour modéliser d'une manière explicite les discontinuités introduites par la structure physique du système, implique naturellement l'occurrence d'un événement généré au moment où le changement du comportement continu du système intervient. De tels événements sont des événements incontrôlables dans le sens où leur occurrence ne peut pas être empêchée.

### II.2.1.2 Approche continu :

L'évolution dynamique d'un système est déterminée souvent par les processus physiques qui ont lieu. Ainsi, le modèle mathématique est obtenu à partir des propriétés physiques du système permettant de trouver une description de celui-ci sous la forme de représentation d'état. Le modèle mathématique général est du type :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad 3.3$$

Où  $u(t)$  représente le vecteur d'entrées et  $x(t)$  est le vecteur des variables d'état.

Le modèle présenté par la relation (3.3) est assez général et l'analyse de ses propriétés doit être réalisée en temps continu

### II.2.2 Spécification de fonctionnement :

Globalement, les spécifications introduisent des restrictions dans l'évolution du procédé. Ainsi, pour formuler le problème de synthèse de la commande, il est nécessaire qu'après la description du procédé (système à commander), une description de ses spécifications de fonctionnement soient faite.

L'objectif de la synthèse consistera à restreindre l'évolution du procédé telle que le fonctionnement en boucle fermée du procédé couplé avec son système de commande respecte toujours les spécifications imposées. Dans le cas des systèmes hybrides, les restrictions imposées par des spécifications du système peuvent être décrites en les divisant en deux groupes:

- les spécifications correspondant à la partie **continue** du système.
- les spécifications correspondant à la partie **discrète** du système.

#### II.2.2.1 Spécification discrète :

La partie discrète d'un système hybride peut être vue comme une machine à états finis. En général, les spécifications discrètes sont données sous la forme de conditions logiques décrivant l'ordre d'occurrence des événements dans le système pendant son fonctionnement.

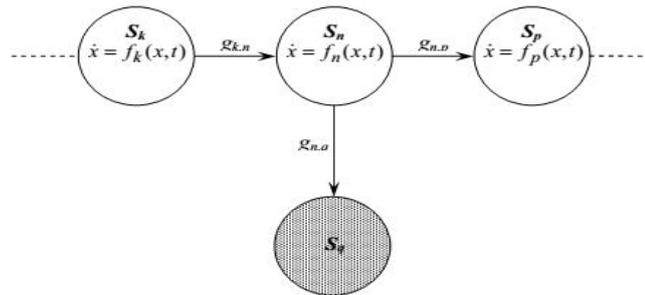
L'outil de modélisation permettant de prendre en compte tous les aspects présentés dans une même structure est l'**automate hybride**

#### II.2.2.2 Spécification continue :

Les spécifications continues correspondent à des restrictions imposées sur les valeurs des variables d'état continues  $\dot{x}$ , exprimées par des conditions logiques qui limitent leur évolution à une certaine région de l'espace d'état, appelée région désirée. Toute évolution sortant de cette région est non désirable. Si nous utilisons des automates pour modéliser le système étudié, l'**évolution non désirée** sera représentée par un sommet appelé **sommet interdit**.

#### ✓ Exemple :

Considérons la partie d'un automate hybride présentée dans la figure



**Figure II.2:** Partie d'un automate hybride

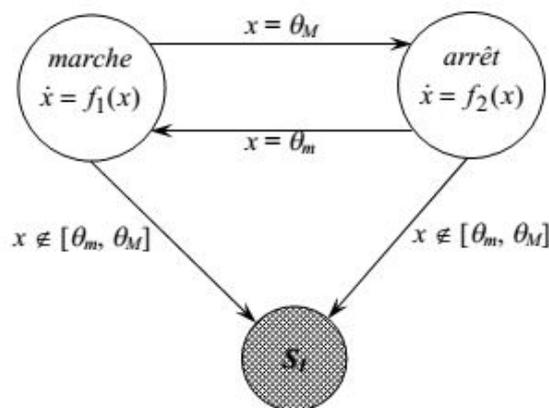
L'évolution dynamique de l'automate hybride a lieu par une alternance de pas discrets et continus. Ainsi, l'évolution continue a lieu dans les sommets de l'automate tandis que l'évolution discrète est réalisée par le franchissement des transitions (arcs) du graphe. Le sommet interdit  $S_q$  est atteint depuis le sommet  $S_n$  par la validation de la transition étiquetée par  $g_{n,q}$ .

En effet, un **sommet interdit** modélise la situation où les spécifications continues du système ne sont plus vérifiées.

✓ **Exemple :**

Considérons thermostat utilisé pour maintenir la température du procédé dans un intervalle imposé.

Le système de chauffage sera arrêté ou redémarré en fonction des informations envoyées par le capteur de température du procédé. L'intervalle de température imposé, représente la spécification continue. Le dépassement des seuils de cet intervalle peut impliquer des défaillances dans le système, provoquées par exemple par le sur chauffage des différentes composantes. Les états interdits permettent la modélisation d'une telle situation. Ainsi, le modèle automate où les évolutions non désirées sont représentées est illustré dans la figure 3.3



**Figure III.3.** Modèle de thermostat avec spécification de fonctionnement.

### II.3 Conception ou élaboration des SDH :

De manière générale, un SDH sera élaboré ou conçu par un ensemble de système à dynamique continue interagissant avec un ou plusieurs systèmes à évènements discrets. Il y a en général trois classes principales des approches de conception des systèmes dynamiques hybrides (*SDH*) :

- l'approche continue,
- l'approche événementielle,
- l'approche mixte.

#### II.3.1 Approche événementielle :

Cette approche est purement discrète, elle consiste à concevoir ou modéliser les systèmes hybrides en supprimant les dynamiques continues ou à faire une approximation de l'évolution continue de façon à ce que le système hybride soit représenté uniquement par les évènements qui le caractérisent. La modélisation événementielle d'un SDH permettra ainsi de faire appel à la théorie classique de superviseur des SED (*Systèmes à Evènement Discret*) pour la synthèse d'un modèle de commande.

#### II.3.2 Approche continue :

Contrairement à l'approche événementielle dans cette approche, il s'agit avant tout d'étudier le comportement des modèles continus en présence des discontinuités, et éventuellement, de définir un modèle étendu, c'est-à-dire consiste à définir une approximation des dynamiques discrètes du système hybride par des équations différentielles (*ou aux différences*) pour modéliser l'occurrence des évènements discrets. L'idée est qu'en utilisant une approche unifiée dans le domaine des systèmes continus, où les théories sont bien établies (*les questions de stabilité, de commandabilité et d'observabilité...*) pourront être étudiées selon les théories classiques.

#### II.3.3 Approche mixte :

L'approche mixte repose sur la supposition que le fonctionnement d'un système hybride est une séquence de deux phases. La première étape correspond à une transformation de l'état continu décrite en termes de temps écoulé durant cette phase. Dans la seconde étape, l'état est soumis à un changement discret instantané. Ainsi, les modèles développés dans le cadre de

cette approche reposent sur l'interaction de deux sous-modèles, l'un pour les aspects évènementiels, basé sur les automates à états finis, les réseaux de Pétri ou des extensions de ces formalismes, et l'autre, formalisé par des équations d'état (*souvent par des équations différentielles*) pour les aspects continus. Chacun des aspects, continu ou évènementiel, est ainsi décrit sous une forme classique est l'aspect hybride est clairement pris en compte dans l'interface entre les deux sous-modèles.

L'aspect évènementiel influe sur le modèle continu en validant certain des équations continues en fonction de l'état discret actif et l'aspect continu agit sur le modèle évènementiel en validant ou en forçant le franchissement de certaines transitions.

Parmi les outils de modélisation résultant de cette approche mixte, on retrouve : les automates hybrides [13]représentant le modèle formel fondamental de cette approche, les statecharts hybrides pour apporter des solutions aux problèmes posés par la spécification des modèles, en particulier de la structuration hiérarchisée [22], et enfin les différents extensions des réseaux de Pétri [23], [28], [31].

## II.4 Les outils de modélisation :

### II.4.1 Automates Hybrides :

Un automate hybride est un outil de représentation qui permet de tenir compte explicitement des deux évolutions continue et discrète du SDH. Il apparaît comme l'association d'un automate à états finis pilotant un ensemble d'équations dynamiques continues. Les équations modélisant le comportement continu à un instant donné dépendent de l'état de l'automate mais ce dernier peut évoluer en fonction de la valeur des grandeurs continues [27], [31].

Un automate hybride est un graphe composé de sommets (*ou places*) et d'arcs orientés modélisant les transitions discrètes qui relient les sommets. Tout arc orienté doit avoir un sommet destination.

✓ **Exemple :**

$$\text{Mode 1: } \dot{x}(t) = a_1x(t) + b_1$$

$$\text{Mode 2: } \dot{x}(t) = a_2x(t) + b_2$$

$$a_1, a_2, b_1, b_2 \in \mathbb{R}$$

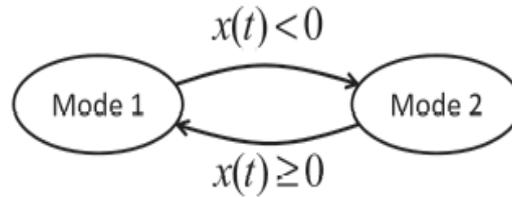


Figure II.4 : Automate hybride

En effet, cette modélisation permet de représenter à la fois l'évolution de l'état discret (entre les modes 1 et 2) et la dynamique de l'état continu  $x(t)$  associé à chaque mode.

#### II.4.2 Réseaux de Pétri

Les réseaux de Pétri représentent un formalisme puissant pour la modélisation et l'analyse des systèmes à événements discrets comme les systèmes de télécommunication, les réseaux de transports, les systèmes automatisés de production, etc. Leur représentation graphique permet de visualiser d'une manière naturelle le parallélisme, la synchronisation, le partage de ressources et le non déterminisme, leur représentation mathématique permet d'établir les équations d'état à partir desquelles il est possible d'apprécier les propriétés du modèle et les comparer au comportement du système modélisé [35].

Depuis leur apparition, les RdP (réseau de Petri) ont connu nombreuses extensions notamment pour la prise en compte des aspects stochastiques, temporels, ...etc.

##### II.4.2.1 Réseau de Pétri hybride :

###### Définition :

Un Rdp hybride (Hybrid Petri Nets ( $PN_H$ )) est une structure  $PN_H = (P, T, b, E, Pré, Post, \Sigma, Tempo, V, M_0)$  tel que :

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble de  $n$  places,  $P = P^C \cup P^D$  avec :
  - $P^C = \{P_1, P_2, \dots, P_{n_C}\}$  est l'ensemble fini de places continues (ou C-places) ;
  - $P^D = \{P_{n_C+1}, \dots, P_n\}$  est l'ensemble fini de places discrètes (ou D-places) ;
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble de  $m$  transitions,  $T = T^C \cup T^D$  avec :
  - ❖  $T^C = \{T_1, T_2, \dots, T_{m_C}\}$  est l'ensemble fini de transitions continues (ou C-transitions) ;
  - ❖  $T^D = \{T_{m_C+1}, \dots, T_m\}$  est l'ensemble fini de transitions continues (ou C-transitions) ;
- $b: PUT \rightarrow \{D, C\}$  est une application qui désigne les nœuds discrets,  $h(x) = D$ , et les nœuds continus,  $h(x) = C$  ;

- $E$  est un ensemble fini d'événements ;
- $\Sigma : T^D \rightarrow E$  est une fonction qui associe à chaque transition discrète un événement de  $E$  ;
- Pré et Post désignent respectivement les applications d'incidence avant et arrière, ces applications doivent satisfaire la condition suivante :

$$\forall (P_i, T_j) \in P^D \times P^C : \text{Pré}(P_i, T_j) = \text{Post}(P_i, T_j);$$

- ❖ Tempo :  $T^D \rightarrow \mathbb{Q}^+$  est une application qui associe à chaque D-transition la durée de sa temporisation.
- ❖  $V : T^C \rightarrow R^+$  est une application qui associe à chaque C-transition sa vitesse maximale de franchissement.
- ❖  $M_0$  est le marquage initial, des D-places contiennent un marquage entier positif et les C-places contiennent un marquage réel positif ;

La condition sur les applications d'incidence avant et arrière est repérée sur le RdP par des boucles reliant les D-places aux C-transitions, elle signifie qu'une marque discrète ne peut pas être fluidifiée par une transition continue. Le modèle RdP hybride ainsi défini permet donc la modélisation des conditions logiques influant sur le comportement du système, mais il permet aussi la modélisation de transformation de marques continues en marques discrètes et vice-versa (formation et éclatement de lots) [36], [37], [38].

Nous numérotons les nœuds du RdP de telle sorte que les nœuds continus aient les indices les plus petits ; cela fait que la matrice d'incidence a la forme suivant :

$$W = \begin{pmatrix} W_C & W_{cD} \\ 0 & W_D \end{pmatrix}$$

Les RdP élémentaires constituent une classe particulière de RdP hybrides où il n'y a pas de transformation de marquage, du discret vers le continu ou du continu vers le discret. Dans ce modèle le RdP T-temporisé contrôle le comportement du RdP continu  $C$  via des boucles connectant certaines D-places à certaines C-transitions, ce qui signifie que ces dernières ne sont validées et par conséquent ne peuvent être franchies que si les D-places sont marquées.

Le RdP continu  $C$  à son tour peut influencer le comportement du RdP T-temporisé une D-transition  $T_j$  peut avoir comme condition de franchissement le marquage d'une C-place  $P_i$  qui atteint un seuil  $S$ . Graphiquement ceci est représenté de deux manières soit par une boucle (un arc de  $P_i$  vers  $T_j$  et un arc de  $T_j$  vers  $P_i$ ) dont le poids est  $S$  si ce seuil est un seuil supérieur c'est-à-dire si le marquage de  $P_i$  ne peut être supérieur à  $S$ .

Dans le cas contraire si le marquage de  $P_i$  ne doit pas être inférieur à  $S$ , un arc inhibiteur est utilisé pour relier  $T_j$  à  $P_i$ . Et dans les deux cas le franchissement de  $T_j$  ne modifie pas le marquage de  $P_i$ .

**II.4.2.2 Réseau de Petri hybride élémentaire :**

**Définition :** (Rdp hybrides élémentaire) (Réseau de Petri en anglais : Petri Net (RdP : PN))

Un élémentaire est un couple  $(PN_H, I)$  tel que :

- $PN_H$  est un RdP dont les applications Pré et Post satisfont la condition suivante :
- $\forall (P_i, T_j) \in (P^D \times T^C) \cup (P^C \times T^D)$ , alors  $Pré(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$
- $I: (P_i, T_j) \rightarrow \mathbb{R}$ , est une application d'inhibition, si un arc inhibiteur de poids  $S$  relie la place  $P_i$  à la transition  $T_j$ , le franchissement de  $T_j$  n'est possible que si le marquage de  $P_i$  est inférieur à  $S$  [37].

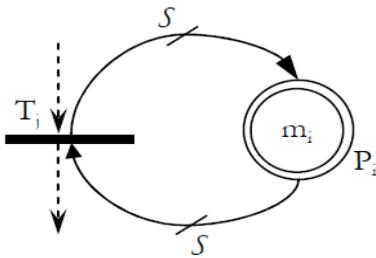


Figure a. validation de  $T_j$  si  $m_i \geq S$  ;

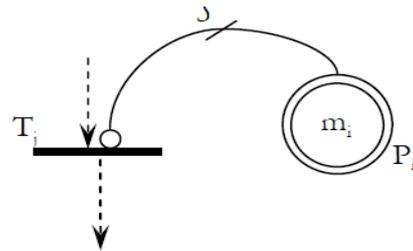


Figure b. validation de  $T_j$  si  $m_i < S$

**Figure II.5** Exemple de Réseau de Pétri élémentaire

✓ **Exemple :**

Considérons un système constitué de deux réservoirs et de trois vannes, comme illustré dans la figure a. Les vannes sont caractérisées par leur débit  $V_1, V_2$  et  $V_3$  (litres/ seconde), et sont supposées être ouvertes en permanence.

Le système décrit dans les exemples est modélisé par le RdPCC de la figure c. Pour les valeurs numériques suivantes :  $V_1 = 3, V_2 = 4$  et  $V_3 = 6$ . Les marquages des places  $P_1$  et  $P_2$  représentent les quantités de liquide dans les réservoirs. Les vitesses associées aux transitions du RdP continu modélisent les débits des vannes.

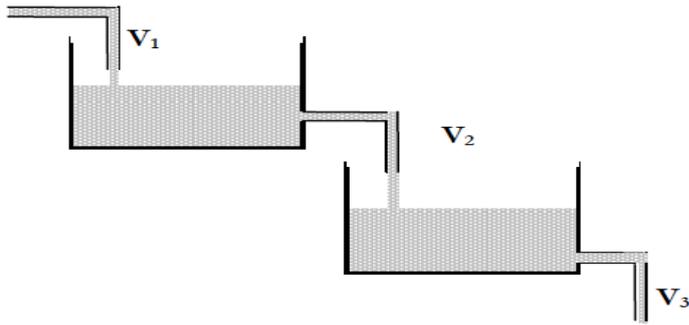


Figure a. système hydraulique

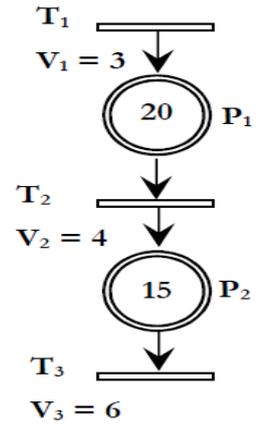


Figure b. RdPCC modèle

Figure II.6 : Exemple de Réseau Hybride élémentaire

A l'instant initial les trois transitions sont fortement validées, une transition est dite fortement validée si toutes ses places d'entrée sont marquées, et elles sont franchies à leurs vitesses maximales.

### II.5 Conclusion

Dans ce chapitre on traite les différents formalismes des systèmes dynamiques hybrides (SDHs), ainsi que les principales approches de modélisation de ce type de système, pour notre cas d'application nous sommes intéressés à l'approche de modélisation par un automate hybride, c'est le but de chapitre suivant.

## *Surveillance des systèmes dynamiques hybrides*

### **III.1. Introduction :**

On a vu auparavant, que la plupart des procédés industriels sont de nature hybride, ce qui signifie que leur comportement résulte de l'évolution et de l'interaction de variables continues et de variables discrètes. Plusieurs recherches dans les deux dernières décennies sont consacrées à la modélisation, la simulation, la vérification et la synthèse de lois de commandes pour ces types de systèmes [39], [40], [41], [42].

Le comportement dynamique d'un système hybride peut être représenté par une succession de modes. Chaque mode est caractérisé par une modalité de l'état discret, un ensemble de contraintes égalités (équations d'état par exemple) et la définition d'un domaine d'admissibilité (décrit par des contraintes inégalités). Une transition d'un mode vers un autre mode a lieu lorsque certaines conditions logiques sont vérifiées. Une transition peut être contrôlée ou spontanée suivant qu'elle est provoquée par un événement externe contrôlé ou un événement interne.

Mais contrairement aux travaux concernant la modélisation, la simulation, la vérification et la synthèse de lois de commandes pour ces types de système, et quant à la à la détection, la localisation ou le diagnostic des défaillances, les travaux concernant ce sujet sont très peu, [43]. De plus, même en fonctionnement normal, une des hypothèses classiquement formulée pour la commande discrète de ces systèmes, est que le mode dans lequel se trouve le système (le mode courant) est à tout instant connu. Ceci est une hypothèse parfois très forte qui n'est pas toujours vérifiée sur une installation industrielle et qui nécessite une instrumentation (capteurs) parfois abondante, performante et coûteuse. La détermination du mode courant est donc une fonctionnalité supplémentaire que doit présenter la couche logicielle de surveillance.

Dans [44] les auteurs proposaient d'utiliser les résidus de parité pour identifier le mode courant du système et estimer l'instant de transition. Les défaillances survenant sur un système hybride peuvent affecter le comportement du système au sein d'un mode ou affecter la séquence d'états discrets. Nous avons ainsi montré comment les résidus d'élimination, issus des relations de redondance analytique, permettent sous certaines conditions de détecter et isoler ces deux types de défaillances.

L'évolution dynamique d'un système hybride peut être décrite par une succession de modes. Chaque mode  $i$  ( $i \in M; M = \{1, 2, \dots, M\}$ , où  $m$  est le nombre de modes) correspond à une configuration physique possible.[45]

### III.2. La surveillance :

La surveillance consiste en l'analyse de l'état du système et en l'extraction d'informations permettant de détecter les défaillances des systèmes et de les diagnostiquer.

#### III.2.1. La détection :

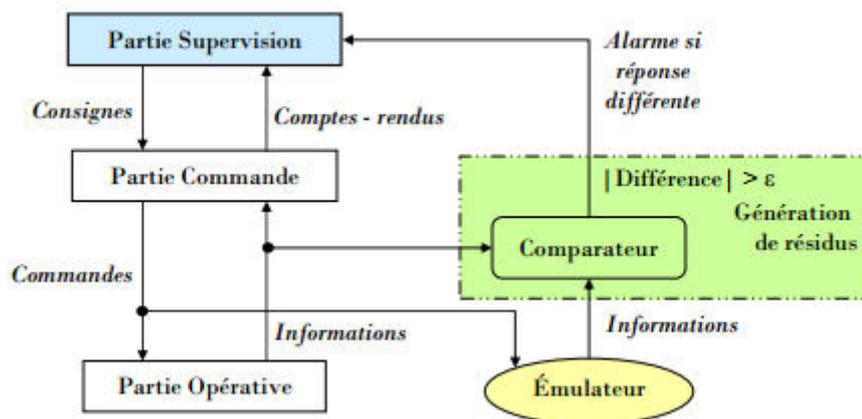


Figure III.1 Un exemple de détection grâce à un émulateur

La **détection** (cf. figure III.1) consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement (mode de fonctionnement dégradé ou défaillant) à partir de la connaissance de certaines de ses caractéristiques. Elle génère alors des symptômes grâce aux observations et aux modèles de référence.

Le **résidu** est établi à partir de la comparaison entre le comportement du système observé et le comportement attendu obtenu à l'aide du modèle de référence. Il traduit la présence ou non du défaut.

#### III.2.2. Le diagnostic :

Le **diagnostic** consiste à déterminer les composants ou organes défaillants du système physique à l'aide d'un raisonnement logique basé sur les symptômes et les observations du système. Dans la littérature scientifique, on rencontre aussi bien les termes « diagnostic de défaillances » (failure diagnosis) que « diagnostic de pannes » (fault diagnostic). Même s'il est logique de s'intéresser aux défaillances, la recherche de défauts apporte plus d'informations pour trouver les éléments défaillants et peut amener au diagnostic prédictif de défaillances. La localisation de défaut consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une défaillance. Ce raisonnement s'appuie sur les symptômes qui se sont révélés lors de la phase de détection.

L'identification d'un défaut permet de déterminer l'amplitude et l'évolution probable au cours du temps du défaut.

### III.2.3 La surveillance prédictive :

La **surveillance prédictive** consiste en l'analyse de l'état présent et passé du système physique afin d'établir les dégradations et futures défaillances du système. On retrouve dans cette fonctionnalité les sous parties détection et diagnostic.

La **détection prédictive** détecte une dégradation du système et ainsi prédit la possibilité d'une future défaillance. Le diagnostic prédictif, appelé aussi pronostic, consiste à déterminer les composants ou organes qui ont entraîné une dégradation du système mais pas encore une **défaillance**.

### III.3. Les corrections :

La **reprise** consiste à trouver le remède de la panne. Dans le cas le plus simple, c'est le remplacement de l'élément défaillant.

La **maintenance** est la fonction qui permet le remplacement ou la réparation des équipements usagés ou défaillants. Nous distinguons deux types de maintenance :

- La maintenance préventive imposée par la sûreté de fonctionnement. Elle peut être :
  - soit systématique, c'est-à-dire effectuée selon un échéancier établi suivant le temps d'usage ou à partir du nombre d'unités d'usage ;
  - soit conditionnelle: elle intervient, lors de la prédiction d'une future défaillance du système physique, c'est-à-dire lors d'une dégradation des performances du système.
- La maintenance corrective, effectuée après défaillance. Elle intervient au cours de la fonction reprise.

Elle est :

- soit curative: elle consiste en la remise en l'état initial, ce qui peut correspondre au remplacement du composant défectueux.
- soit palliative: dans ce cas une solution de secours provisoire, permettant au composant défaillant d'assurer au moins une partie de ses fonctionnalités ; il doit toutefois être suivi d'une action curative dans les plus brefs délais[46].

### III.4. Les méthodes de surveillance :

- les méthodes sans modèles (model-free methods).
- les méthodes avec modèles (model-based methods).

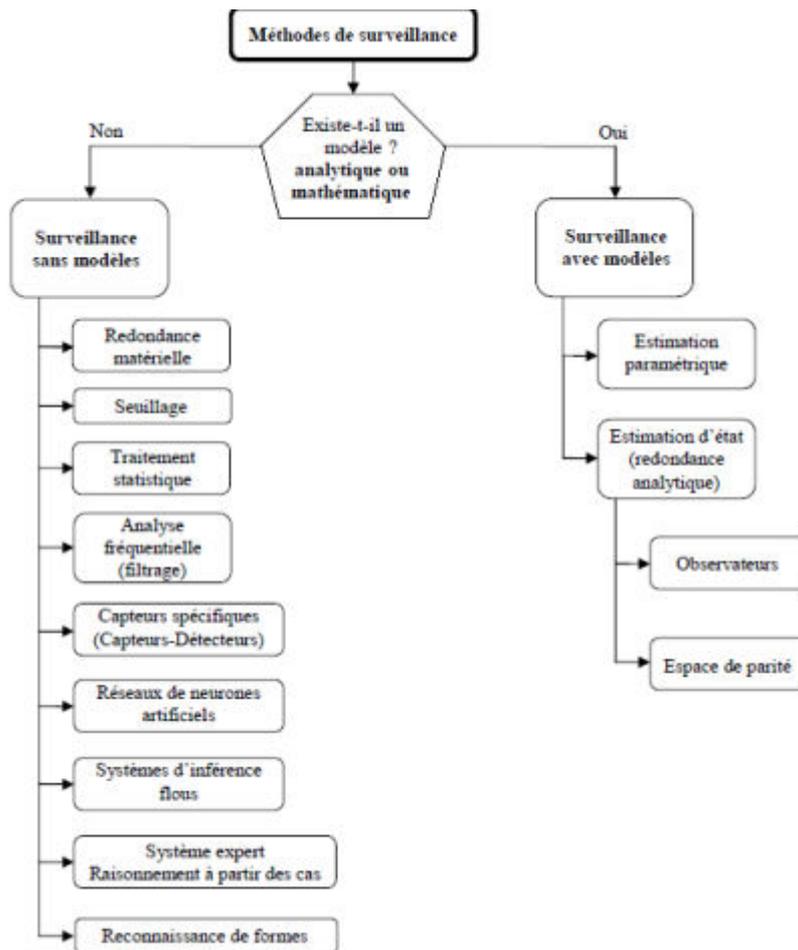


Figure III.2. Différentes méthodes de surveillances

### III.5. Choix de la méthode de surveillance et modèle de bon fonctionnement:

Un système hybride est formellement modélisé par les huit éléments suivants :

$$\langle Q, X, G, F, Y, H, \sigma_s, \sigma_c \rangle$$

Où:

- $Q$  est l'ensemble de modalité que peut prendre le vecteur d'état discret  $q$ ,  
 $Q = \{q_i : i \in M\}$  et  $q_0$  est l'état discret initial.
- $X = \bigcup_{i \in M} X_i$  définit l'espace d'état continu,  $X_i$  représente l'espace d'état atteignable dans le mode  $i$ .  $x_i(t) \in X_i$  ( $\dim[x_i(t)] = n_i$ ) est le vecteur d'état continu à l'instant  $t$ . Le domaine  $X_i$  est décrit par un ensemble de contraintes inégalité  $g_i : g_i(x_i(t)) \leq 0$ .
- $G$  représente l'ensemble de toutes contraintes inégalité.
- $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  est un ensemble fini de fonctions lisses. Chaque fonction définit un trajectoire du vecteur d'état continu  $x_i(t)$ .

$\dot{x}_i(t) = f_i(x(t), u_i(t), d_i(t))$ , ou :  $u_i(t) \in R^p$  est un vecteur d'entrée (commande continue) supposé connu,  $d_i(t) \in R^\sigma$  est un vecteur d'entrées inconnues (ou de perturbations).

Nous avons choisi d'utiliser le formalisme des automates hybrides pour représenter le comportement des SDH. Cet outil résulte de la combinaison d'un automate à état fini avec des équations d'état continues. Dans cette représentation les arcs orientés sont étiquetés par les conditions de transition (spontanée ou contrôlée). Chaque place correspond à un mode. Dans chacune des places, les équations différentielles et algébriques qui contraignent l'évolution de l'état continu dans ce mode ainsi que le domaine (contraintes inégalité) associé au mode sont indiqués. Il existe bien entendu d'autres possibilités de représentations des SDH: Réseaux de Pétri Hybrides ou modélisations de type MLD: Mixed Logic and Dynamic par exemple, qui présentent, tout comme les automates hybrides, certains avantages et inconvénients dans le contexte du diagnostic des défaillances.

### III.6. Description et caractérisation des défaillances :

Un système est dit défaillant lorsque son comportement réel ne correspond pas au modèle de bon fonctionnement. Plusieurs sortes de défaillances peuvent se produire sur un système hybride. En effet, les défaillances peuvent affecter soit l'évolution de l'état continu dans un mode, soit l'évolution discrète c'est à dire la séquence d'états discrets.

#### III.6.1. Défaillances affectant le comportement du système dans un mode :

Un mode est entièrement défini par :

- Un ensemble de contraintes égalité (équations différentielles ou algébriques).
- Un domaine défini par un ensemble de contraintes inégalité.
- Une modalité de l'état discret, c'est à dire une configuration physique du système.

Une défaillance se produisant dans un mode peut affecter une de ces trois entités.

#### III.6.2. Défaillances affectant l'évolution discrète :

L'évolution discrète du système correspond à un chemin (ou trajectoire) dans l'automate hybride, c'est à dire à une succession de places dans un ordre déterminé lorsque le système est en bon fonctionnement. Toute évolution dans l'automate hybride non conforme au comportement normal est considérée comme une défaillance. Trois types de défaillances peuvent être considérés :

**a) Transition vers un mode non successeur :** Si le système fonctionne correctement, seul un sous ensemble  $\sum(i)$  de modes (appelés successeurs) sont accessibles à partir d'un mode  $i$ . Une transition du mode  $i$  vers un mode  $n$  appartenant pas à  $\sum(i)$  est donc une défaillance.

**b) Non transition :** Ce type de défaillance se produit lorsque le système reste dans le mode courant alors que la condition de transition est vérifiée et que le système devrait normalement changer de mode.

**c) Transition anormale vers un mode successeur :** Ce type de défaillance se produit lorsque le système passe d'un mode  $i$  vers un successeur potentiel  $j$  alors que la condition normale de transition n'est pas vérifiée.

Ces trois types de défaillances peuvent être détectées en comparant l'évolution de l'état discret du système en fonctionnement avec l'évolution prévue si le système se comporte normalement. Ceci revient à comparer les trajectoires réelles et théoriques dans l'automate hybride [45].

### **III.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept général de la surveillance des systèmes dynamiques, ainsi plusieurs définitions nécessaires ont été citées. La surveillance regroupe deux fonctions principales : la détection et le diagnostic qui regroupe à son tour deux sous fonctions élémentaires telles que la localisation et l'identification.

Pratiquement, la nature des informations sur les systèmes dynamiques est différente d'un système à un autre, (des connaissances d'expertise, des modèles qualitatifs ou structurels). Cela influe directement sur la manière de procéder la surveillance. Par conséquent, deux grandes classes des méthodes de surveillance ont été citées, à savoir les méthodes sans modèle, et les méthodes avec modèle. Ces méthodes ont été classées selon plusieurs critères : l'évolution de la dynamique du système, la mise en place du système de surveillance, la nature de l'information et sa distribution.

A notre connaissance, il existe peu de contributions de la surveillance et du diagnostic des systèmes dynamiques hybrides. L'introduction du temps et des évènements non observables nous permet de rendre plus efficace les systèmes de surveillance.

## Application

### Modélisation et surveillance par automate hybride

#### “ Système de régulation à trois réservoirs ”

##### IV.1 Introduction

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement repose essentiellement sur la surveillance, qui constitue une interface entre l'installation physique et les opérateurs (hommes ou automatismes). La surveillance fournit des informations sur l'état de fonctionnement (correct, défaillant) des dispositifs surveillés. Elle valide les informations issues des capteurs et localise les dispositifs défaillants. Le système de surveillance constitue une couche particulièrement importante des processus automatisés sûrs de fonctionnement.

La modélisation d'un processus consiste à trouver un modèle paramétré dont le comportement dynamique approche celui du processus. Ce modèle sera utilisé pour effectuer des prédictions de la sortie du processus, ou pour l'apprentissage d'un correcteur, ou encore pour simuler le processus au sein d'un système de commande.

*La première phase* d'une modélisation consiste à rassembler les connaissances que l'on a du comportement dynamique du processus (d'après des expériences et/ou une analyse théorique des phénomènes physiques mis en jeu), ce qui conduit à faire plusieurs hypothèses de structures de modèles susceptibles de décrire ce comportement. Ces structures de modèles, appelées **modèles-hypothèse**, sont caractérisées par le nombre et la nature de leurs variables d'entrée (entrées de commandes ou perturbatrices), d'état et de sortie, et éventuellement par les relations entre ces variables. Par exemple, si l'on a des connaissances précises sur le processus, ces relations peuvent être l'expression de lois physiques. Si ces connaissances sont rudimentaires, on est conduit à choisir des modèles de type “ boîte noire ” on peut également combiner les deux approches au sein d'un même modèle. On est ainsi conduit à un ensemble de modèles-hypothèse concurrents. Chacun d'eux est défini à partir d'une ou de plusieurs fonctions inconnues (ou partiellement connues) d'arguments déterminés, qui vont être réalisées par des fonctions paramétrées.

*La seconde phase* de la modélisation, aussi dite identification, consiste à estimer les paramètres du modèle. Pour cela, on met en œuvre un système d'apprentissage constitué d'un prédicteur de la sortie du processus associé au **modèle-hypothèse**, et un algorithme. L'estimation des paramètres du modèle est effectuée en minimisant une fonction de coût définie à partir de l'écart entre les sorties mesurées du processus (séquences d'apprentissages) et les valeurs prédites. La qualité de cette estimation dépend du modèle-hypothèse choisi, de la richesse des séquences d'apprentissage et de l'efficacité de l'algorithme utilisé.

Ce chapitre se divise en deux parties, dans la première, nous avons illustré théoriquement le modèle choisi pour notre système (la modélisation par automate hybride), et dans la deuxième partie, nous simulons le modèle sur MATLAB à l'aide de la bibliothèque « Simulink » et « Stateflow ».

#### IV.2. Définition d'un mode

Le modèle hybride est un modèle état - transition, accompagné d'équations (**algèbre – différentielles**). En effet, il possède à la fois des variables éléments d'un espace mathématique continu ainsi que des variables faisant partie d'un espace mathématique discret. Ces deux types de variables interagissent entre elles : au sein d'une même phase discrète, les variables continues évoluent d'une manière déterminée et le franchissement d'un seuil par certaines d'entre elles ou par leur dérivée peut provoquer un changement de phase. Chaque phase est caractérisée par des contraintes égalités, des invariants et des conditions de transitions. Nous proposons ainsi les définitions suivantes :

##### Définition 2.1:

Un mode est une phase de fonctionnement du système caractérisé par l'espace d'état. Au sein d'un mode, le comportement du système physique évolue selon une dynamique continue qui lui est propre sans aucun changement discontinu dans les valeurs des variables du système.

##### Définition 2.2:

Le changement de mode ou transition résulte d'un événement ( $e_{ij}$ ). Cet événement permet au système de commuter du mode de fonctionnement courant  $q(i)$  à un autre mode de fonctionnement  $q(j)$ .

On définit la fonction Reset (remise des conditions initiales) qui détermine comment l'état initial du système est réinitialisé lors du changement de mode.

#### IV.3 Stateflow

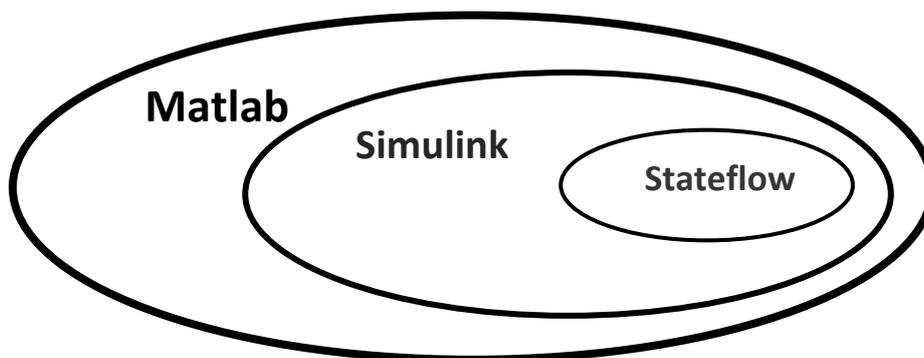
Stateflow est un module développé par la société américaine MathWorks qui permet la simulation de machines d'état. Une machine d'état comporte un nombre fini d'états. Elle modélise le comportement

de systèmes qui passent d'un état à un autre en réponse à des événements. On parle alors de systèmes à événements discrets.

Comme son nom l'indique, ce module permet de tracer des diagrammes d'état (*State Chart*) et des diagrammes de flux (*Flow Chart*). Stateflow est intégré à Matlab et Simulink. Les modèles construits pourront par conséquent comporter des blocs des différentes toolboxes de Simulink et/ou appeler des fonctions Matlab et/ou des fonctions Simulink comme nous le verrons. Ainsi le modèle global d'un système complexe pourra comporter des modèles linéaires continus construits avec Simulink sous la forme de schéma-blocs, des machines à état construites avec Stateflow ou encore des modèles acausaux réalisés en utilisant Simscape.

De plus, Stateflow permet aussi de simuler le comportement de systèmes hybrides c'est-à-dire à événements discrets et continus. C'est par exemple le cas d'une balle qui rebondit sur le sol. En effet, son déplacement dans l'air est continu alors qu'à chaque rebond considéré comme un événement, sa trajectoire est modifiée. C'est encore le cas si un robot doit éviter un obstacle présent sur sa trajectoire.

La modélisation des SDHs est réalisée, par l'outil graphique Simulink et Stateflow, qui fonctionne en symbiose avec Simulink dans le logiciel Matlab comme indiqué dans la figure ci dessous [52]. Ce dernier permet de simuler et visualiser le comportement réel et dynamique du système mécatronique étudié. Les aspects étudiés seront l'observation des paramètres du système (évolutions des volumes), le défaut des composants, ainsi que la simplification du modèle de l'automate.



**Figure IV.1.** Matlab / Simulink / Stateflow.

### IV.3.1 Les objets de stateflow :

Un graphe Stateflow est composé des différents objets suivants :

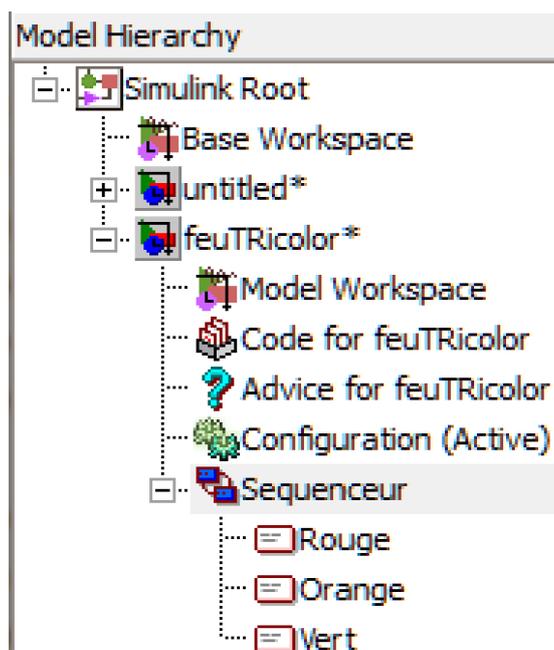
- états
- événements
- transition
- les données

- les conditions
- jonction
- jonction de l'historique

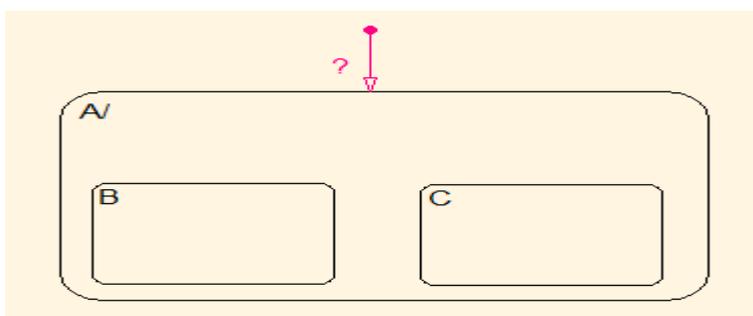
### IV.3.1 Les états :

Dans les états on décrit les actions à réaliser dans le cadre du graphe qui décrit la machine à états finis. Un état peut être actif ou inactif selon des événements qui peuvent intervenir ou des conditions de validation des transitions. En outre un état est appelé super état, ou état parent vis à vis de ceux qu'il contient et ceux-là deviennent des sous-états (*ou enfants*).

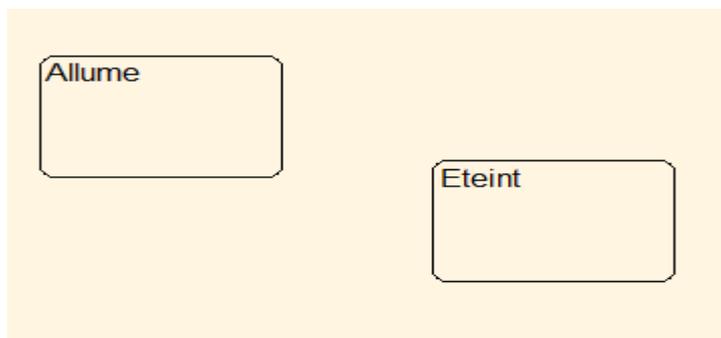
Cette hiérarchie apparaît dans la fenêtre de gauche de l'explorateur (*Tools* → *Explorer*) les états init, Rouge, Orange, et vert sont des sous-états de l'état Séquenceur, lui-même un enfant de l'état racine Feu tricolor. Notons que feu tricolor est un enfant pour Simulink.



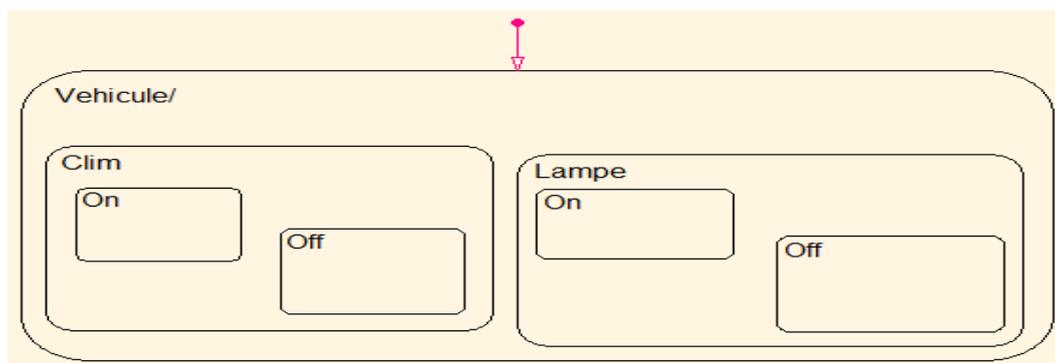
Chaque état possède un parent. Dans le cas suivant, les états **B** et **C** ont l'état **A** comme parent.



Le cas suivant contient des états exclusifs. C'est aussi le cas précédent pour les états **B** et **C** vis-à-vis de l'état parent **A**. Ils ne peuvent pas être actifs en même temps. On dit qu'ils sont en décomposition **OU**. L'exclusivité est réalisée par les transitions qui contiennent des conditions qui valident le passage d'un état vers un autre.



Un graphe Stateflow peut posséder plusieurs états qui peuvent être actifs simultanément. Ces états sont dits parallèles, soit en décomposition **ET**. Les états parallèles sont encadrés par des bords en pointillés. Chaque état possède un nom (*label*) en haut à gauche du rectangle délimitant cet état.

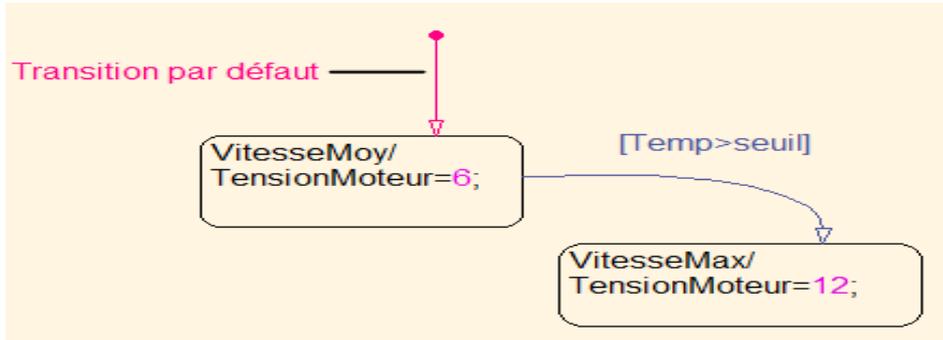


### IV.3.2 Les transitions :

Une transition est un objet graphique qui lie un état à un autre. Un label décrit les circonstances ou les conditions du passage entre ces états.

#### IV.3.2.1 Les transitions par défaut :

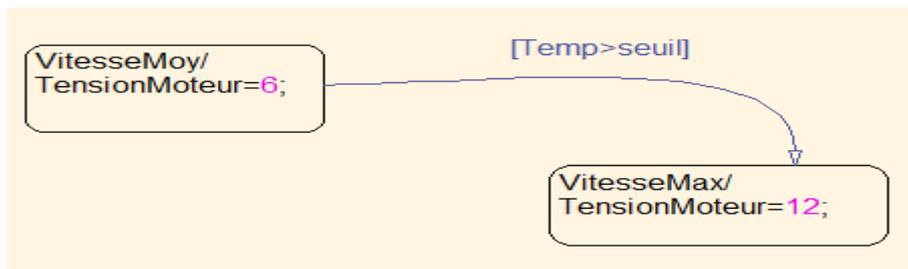
La transition par défaut (*sans aucune condition, ni label*) détermine l'état qui doit être actif lorsqu'il y a ambiguïté entre plusieurs états en décomposition OU et qui ont le même niveau de hiérarchie. Chaque état qui contient des sous-états doit avoir sur l'un d'eux une transition par défaut qui détermine cet état actif dès l'entrée de ce super état (*ou état parent*).



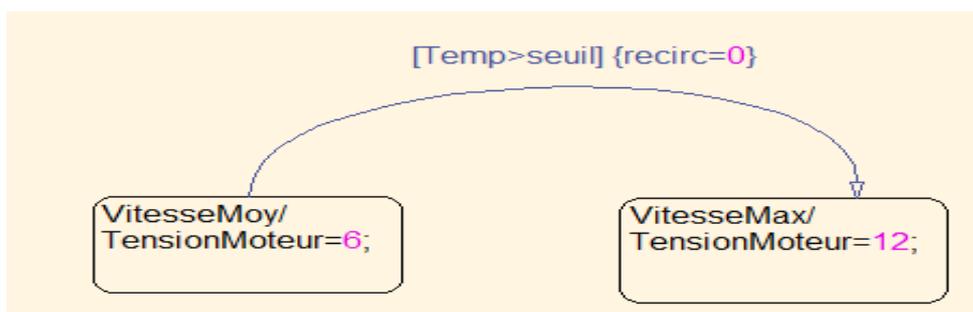
**IV.3.2.2 Les labels des transitions :**

Une condition est une expression booléenne qui valide la transition du passage d'un état vers un autre. La condition est mise entre crochets. Les conditions peuvent faire intervenir des variables locales ou des entrées SIMULINK.

L'exemple suivant montre l'augmentation de la vitesse du ventilateur lorsque la température ambiante dépasse un certain seuil.

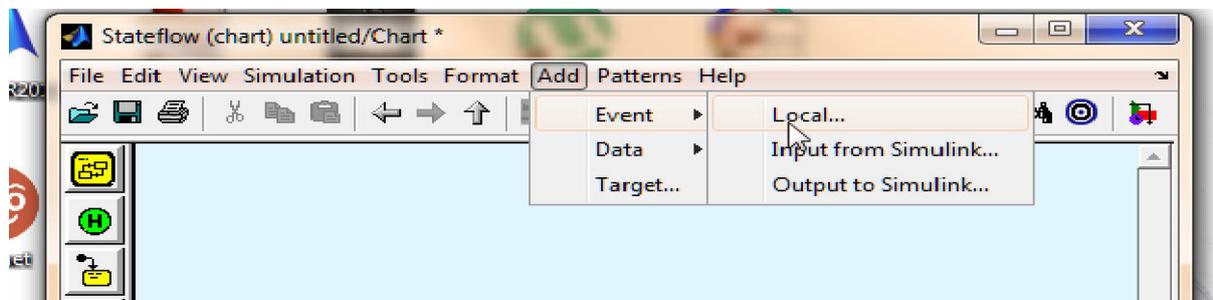


On peut mettre un nom de variable logique locale auparavant mise à 1 lorsque la condition est réalisée. Dans une transition, on peut réaliser des actions comme celles qu'on fait à l'intérieur d'un état. Les actions réalisées dans une transition sont mises entre accolades. Dans le cas suivant, la transition se fait lorsque la température dépasse le seuil et dans ce cas on arrête le moteur de recirculation de l'air en mettant la variable recirc à 0.

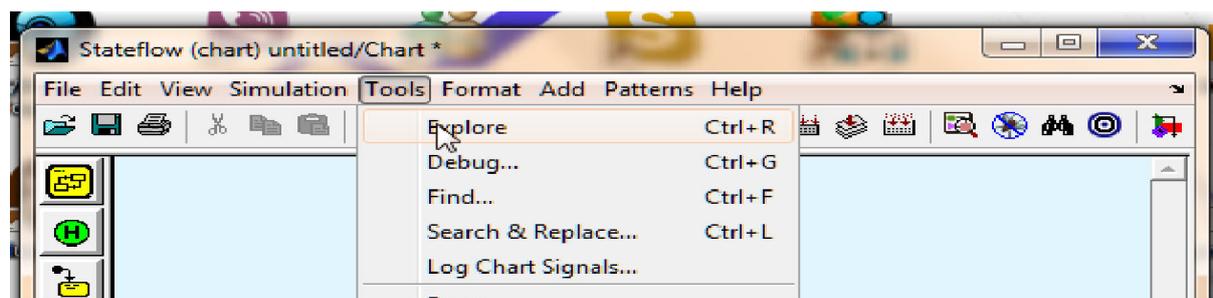


### IV.3.3 Les évènements :

Les évènements, objets non graphiques qui agissent sur l'exécution du graphe Stateflow. Les évènements peuvent être visualisés, pour ce faire il nous faut cliquer sur le menu **Add** de l'éditeur Stateflow (*Tous les évènements doivent être définis par le menu Add*).



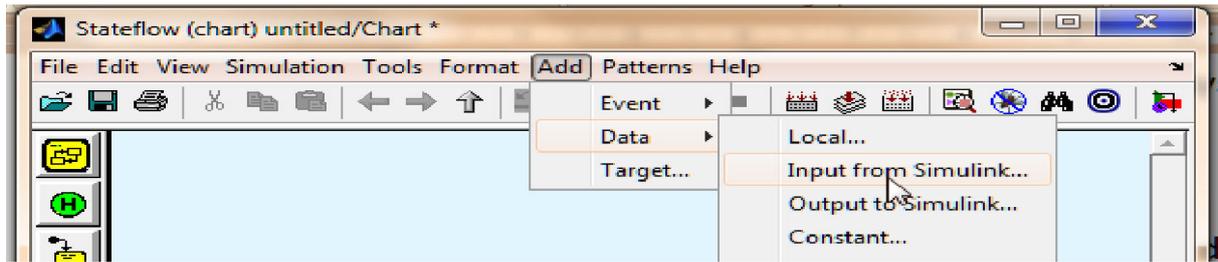
Par la suite, les évènements seront alors visibles via le menu **Tools**→**Explorer**.



L'occurrence d'un évènement peut servir à valider une transition de passage d'un état à un autre ou une action à exécuter. Enfin, les évènements représentant l'environnement (*le monde externe*) doivent être obligatoirement un front montant, descendant ou les deux, ceci afin de simuler le comportement par interruption du système d'ordonnancement.

### IV.3.4 Les objets data (*Données*) :

Les objets Data peuvent être des variables locales, entrées de ou sorties vers SIMULINK, une constante, etc.



Les objets data stockent des valeurs numériques pour référence dans le diagramme Stateflow® mais sont des objets non graphiques.

#### IV.3.5 Algorithme de simulation

*Pas 1 : initialisation des variables;*

*Pas 2 : simulation de la partie discrète;*

*Pas 3 : si aucune transition ne puisse être franchie alors allez au pas 4*

*Sinon retour au pas 2;*

*Pas 4 : intégration du mode  $I$ ;*

*Pas 5 : mise en place et initialisation du modèle continue global*

*Pas 6 : simulation de la partie continue*

*Pas 7 : Si l'occurrence d'un événement est atteinte alors fin de cycle, alors aller au pas 8*

*Sinon retour au pas 6 ;*

*Pas 8 : Obtention du nouveau mode  $I=I+1$ ;*

*Pas 9 : si le temps de simulation total est atteint alors :*

*concaténation des résultats d'intégration de mode,*

*schématisation des résultats,*

*Sinon retour au pas 2;*

*Pas 10 : fin de simulation.*

#### IV.3.6 Exemple d'application

##### ✓ Représentation d'un signal de sortie

Construction d'un modèle simulink de représentation de signal de signal de sortie basé sur un événement agissons sous simulink en utilisant un bloc stateflow. Sachant que le système doit produire une sortie de 1.0 lorsque l'entrée est dans l'intervalle  $0 \leq u \leq 0.5$  et la valeur  $u$  est croissante et produit une sortie égale à 0.004.

Pour construire le modèle simulink, il nous faut suivre les étapes suivantes :

- Ouvrir matlab puis simulink ensuite créer un nouveau modèle.

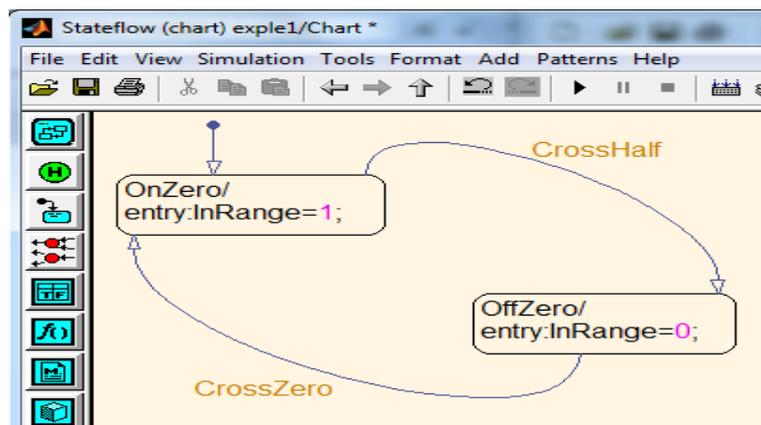
- Ouvrir simulink library browser.

Puis dessiner dans ce modèle en utilisant les blocs :

- **Simulink**→ **Sources**→ **Sine Wave**
- **Simulink**→ **Signal Routing**→**Mux**
- **Simulink**→**Discontinuities**→ **Hit Crossing** pour la valeur offset 0 de direction to rising et le nommée Cross zero rising.
- **Simulink**→**Discontinuities**→**Hit Crossing** pour la valeur offset 0.5 de direction to either et le nommée Cross ½.
- **Sumilink**→ **Stateflow**→ **Chart**
- **Simulink**→**Sinks**→**Scope**

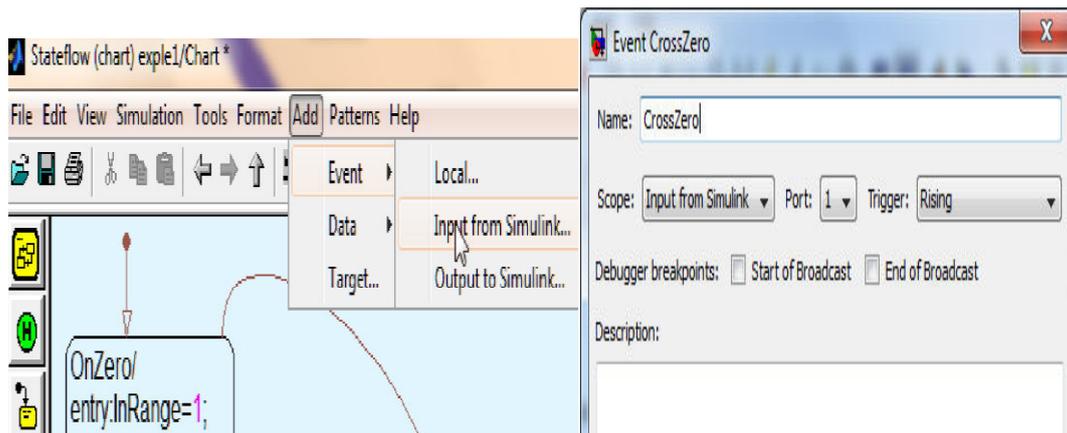
- Ouvrir le bloc chart afin de le modéliser :

- Réaliser la saisie suivant.



Configurer Stateflow afin de définir les deux événements :

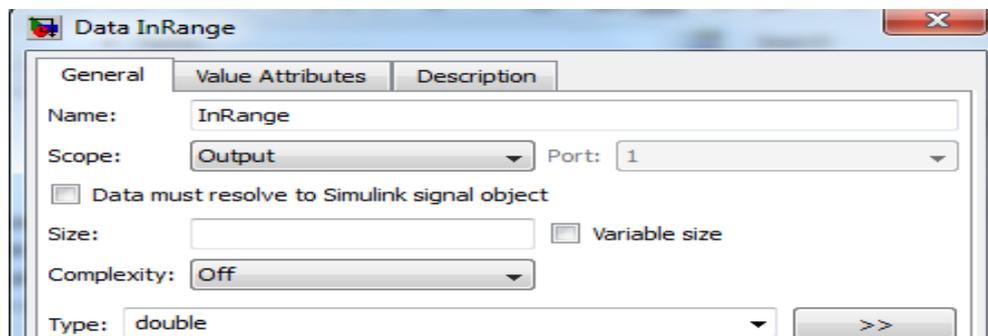
- **Menu stateflow**→ **Add Event**→ **Input from simulink** et configurer comme indiqué ci contre (*Name et Trigger*).



- Faire la même opération pour CrossHalf : l'index devient 2 et Trigger à Either.

Définir la sortie du bloc chart :

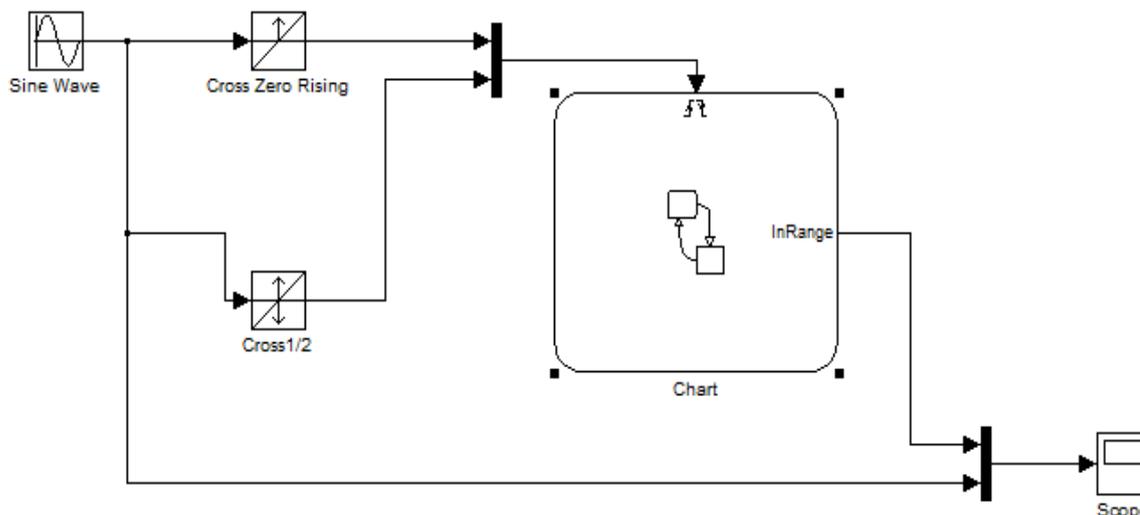
- **Menu stateflow** → **Add Data** → **Output from simulink** puis configurer comme indiqué ci-dessus (*Name*).



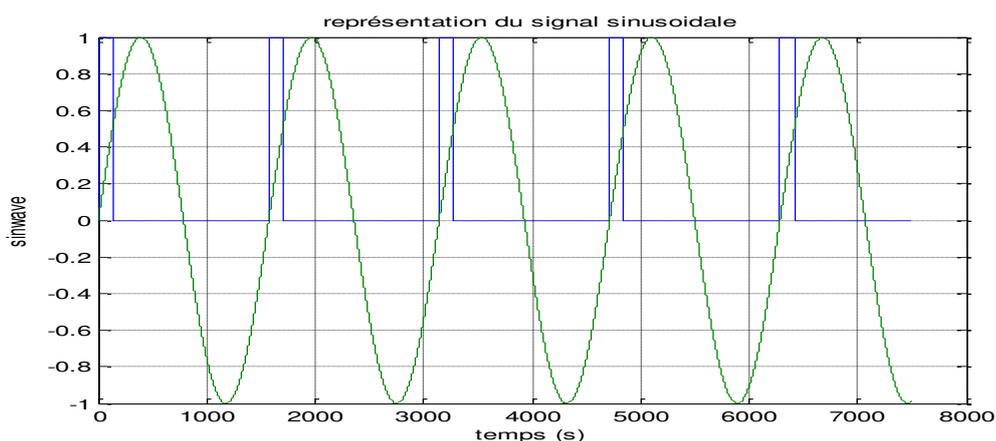
➤ Définir les paramètres de la simulation simulink :

- **Modèle Simulink** → **Simulation** → **Configuration Parameters** puis configurer l'instruction type à fixed step and Discrete, donner à Fixed step size la valeur 0.004 et le stop time la valeur 30.

➤ Réaliser la simulation du modèle suivant :



➤ Résultat de la simulation :



Nous constatons que :

- La sortie passe à 1 à chaque front montant au passage par zéro du signal sinusoïdale.
- La sortie passe à 0 à chaque front descendant au passage par 1/2 du signal sinusoïdal.

#### IV.4. Cas d'application:

##### ✚ Présentation :

Il s'agit d'un système de régulation du volume de deux réservoirs (figure IV.2). Il est constitué d'un calculateur, de deux pompes, de trois électrovannes (tout ou rien), de deux capteurs de volume et des deux réservoirs régulés (Réservoir 1, Réservoir 2) et d'un troisième réservoir de vidange. Les deux réservoirs régulés alimentent des utilisateurs selon un besoin prédéfini (fonction du temps).

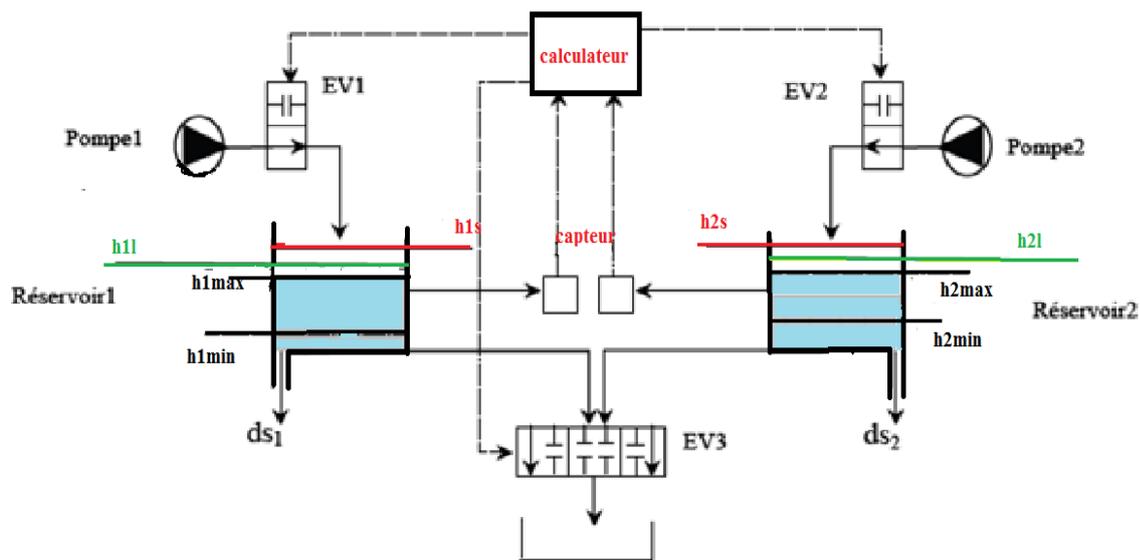


Figure IV.2. Système de régulation de trois réservoirs.

Le volume dans chaque réservoir (1 ou 2) doit rester dans un intervalle donné  $[h_{\min}, h_{\max}]$ . Le contrôle s'opère à l'aide du calculateur qui décide, selon la valeur du volume (délivrée par le capteur), d'approvisionner (ou non) le réservoir en question en alimentant (ou non) l'électrovanne concernée.

Pour chaque réservoir, on distingue donc deux phases de fonctionnement selon quel'électrovanne alimentant ce réservoir est ouverte ou fermée :

- Une phase de conjonction lorsque l'électrovanne est ouverte. Le volume dans le réservoir est croissant durant cette phase, et cela quel que soit la valeur du débit de sortie vers l'utilisateur (le débit d'alimentation de l'électrovanne est bien supérieur, par hypothèse, au débit de sortie).
- Une phase de disjonction lorsque l'électrovanne est fermée. Le volume dans le réservoir est par conséquent décroissant.

La loi de contrôle du calculateur pour chaque réservoir est telle que lorsque le volume dépasse la limite supérieure de commande  $h_{\max}$  pendant la phase de conjonction, alors le calculateur commande la fermeture de l'électrovanne. Lorsque le volume devient inférieur à  $h_{\min}$  (limite inférieure de commande) durant la phase de disjonction, alors le calculateur commande à l'électrovanne de s'ouvrir et on change par conséquent de phase de fonctionnement.

#### ✚ Les modes de défaillances étudiées :

Afin de simplifier l'étude, nous avons considéré que les modes des défaillances des électrovannes **V1** et **V2** prévu pour l'alimentation peuvent être bloqué en ouverture, et l'électrovanne de secours **V3** pour faire la vidange des deux réservoirs peuvent être hors service.

**IV.5. Modélisation :****a. Aspects discrets**

Les électrovannes  $V_i$  ( $i = 1;2;3$ ) sont des éléments pouvant prendre chacun deux modalités :

Pour ( $i = 1;2;3$ ), l'état  $V_i$  de la vanne  $V_i$  peut prendre les deux modalités *Ouverte*:  $O$  ou *Fermée*:  $F$ .

**b. Aspects continus**

En écrivant les équations différentielles l'évolution du volume du liquide dans chaque réservoir,

Pour le remplissage des réservoirs 1 et 2 l'état initial du remplissage est :

$$\begin{cases} \frac{dh1}{dt} = \frac{1}{s} (Qp1) \\ \frac{dh2}{dt} = \frac{1}{s} (Qp2) \\ \frac{dh3}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Etat de fonctionnement normal :

$$\begin{cases} \frac{dh1}{dt} = \frac{1}{s} (Qp1 - Qs1) \\ \frac{dh2}{dt} = \frac{1}{s} (Qp2 - Qs2) \\ \frac{dh3}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Lors de la défaillance des électrovannes  $V_1, V_2$  des réservoirs 1 ou 2 et l'utilisation de l'électrovanne de secours  $V_3$  pour la vidange les deux réservoirs 1 et 2, et comme l'électrovanne de secours ne peut être utilisée que par un seul réservoir à la fois donc les équations sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dh1}{dt} = \frac{1}{s} (Qp1 - Qs1 - Q31) \\ \frac{dh2}{dt} = \frac{1}{s} (Qp2 - Qs2 - Q32) \\ \frac{dh3}{dt} = \frac{1}{s} (Q3) \end{cases} \quad (4.3)$$

Nous considérons les débits d'entrée est bien supérieur par hypothèse au débit de sortie,  $Q_{V1}, Q_{V2}, Q_{V3}$  correspondent respectivement aux débits du liquide à travers les électrovannes  $V_1, V_2, V_3$  qui peuvent être exprimés par rapport à l'état de l'électrovanne  $V_i$  par:

$$Q_{v_i} = \begin{cases} 0 & \text{si la vanne } v_i \text{ est fermée} \\ Q_i & \text{si la vanne } v_i \text{ est ouverte} \end{cases}$$

### c. Expressions des débits

- Les expressions des débits données par la *loi de Torricelli* sont :

$$\begin{cases} Q_1(t) = A\sqrt{2g \cdot h_1(t)} \\ Q_2(t) = A\sqrt{2g \cdot h_2(t)} \\ Q_3(t) = A\sqrt{2g \cdot h_3(t)} \end{cases} \quad (4.4)$$

- Les équations des débits deviennent :

$$\begin{cases} Q_1(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_1} \\ Q_2(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_2} \\ Q_3(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_3} \end{cases} \quad (4.5)$$

## IV.6. Simulation du modèle hybride :

La simulation du cas d'étude est faite dans la plateforme (Simulink et Stateflow) dans le logiciel MATLAB. On s'intéresse seulement au modèle du débordement du réservoir 1.

### a. Simulation du système physique (bloc continu) :

Le bloc « système physique » comporte les trois réservoirs  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  les deux pompes  $P_1$  et  $P_2$ , et les trois électrovannes  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$ , le principe de la réalisation est basé sur les équations linéaires ou différentielles de chaque pièce physique :

$$Q_{p_i} = Q_p \cdot U_p \quad (i=1,2) \quad (4.6)$$

### b. Les équations des réservoirs :

Les deux réservoirs sont identiques et sont décrits par les équations (4.1)

### c. Les équations des électrovannes :

Pour les électrovannes  $V_1, V_2$  et  $V_3$  avec  $U_i$  sont des entres discrètes des vannes  $V_i$  ( $i=1, 2, 3$ )

$$\begin{cases} Q1(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h1} \cdot U1 \\ Q2(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h2} \cdot U2 \\ Q3(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h3} \cdot U3 \end{cases} \quad (4.7)$$

**✚ bloc physique du système**

A l'aide de ces équations, le bloc « système physique » a été réalisé, le schéma bloc interne est illustré dans la figure suivante :

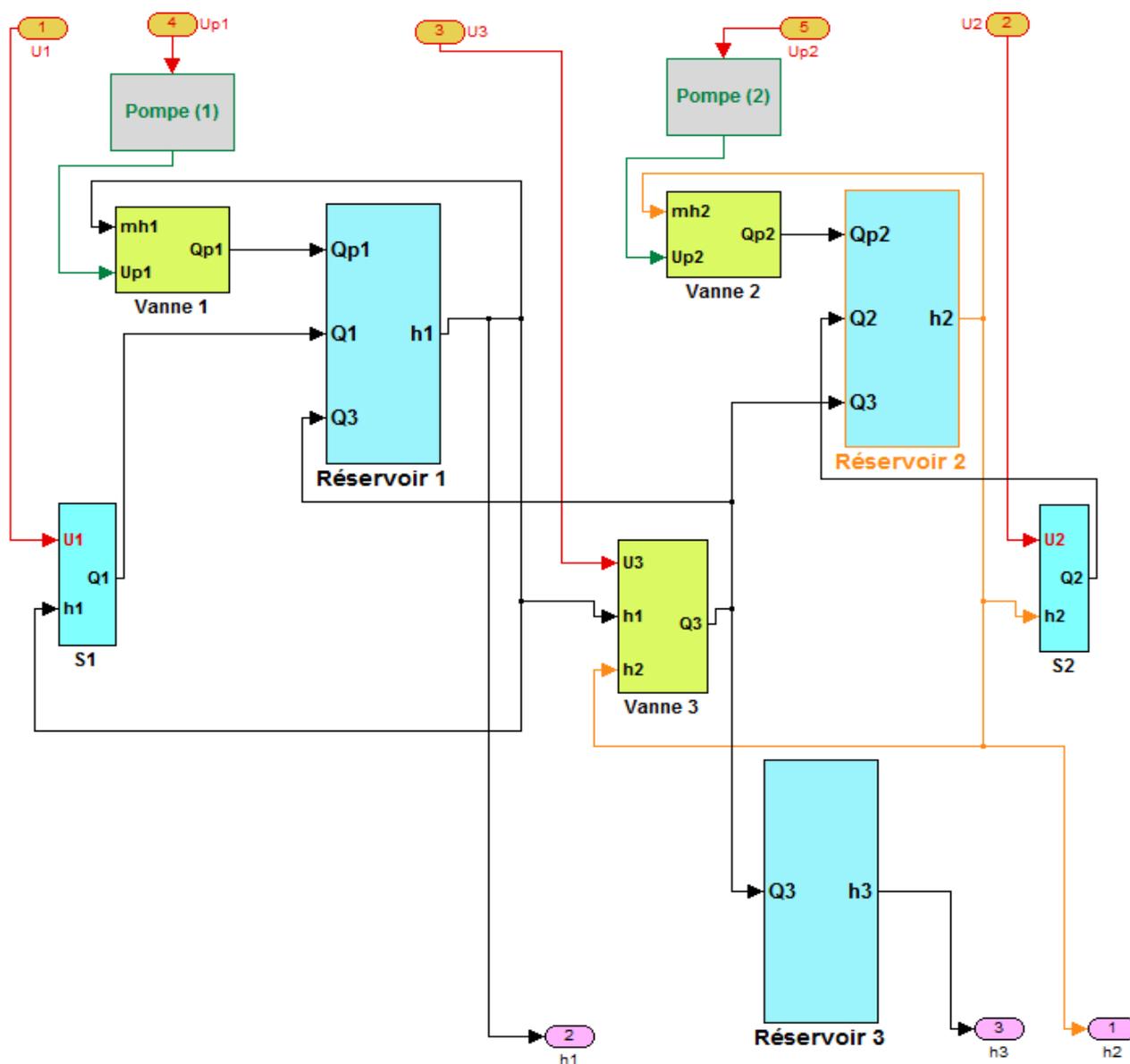


Figure IV.3: le schéma interne du bloc physique du cas d'application.

 **bloc calculateur**

Le bloc « calculateur » est réalisé pour crier les signaux des entrées discrètes du système, il comporte le contrôle des électrovannes et des pompes, le but est d'assurer les états discrètes entrantes dans le bloc « système physique », le principe de réalisation de schéma interne du calculateur (Figure IV.4) est basé sur le comportement discret des électrovannes et des pompes:

- Le signal est un échelon d'amplitude égale à **1** si l'électrovanne  $V_i$  est **ouverte** ou la pompe  $P_i$  est **en marche**,
- Le signal est un échelon d'amplitude égale à **0** si l'électrovanne  $V_i$  est **fermée** ou la pompe  $P_i$  est **en arrêt**,
- Le signal est carré d'amplitude égale à **1** si l'électrovanne **s'ouvre**, et la pompe **sa marche** dans le temps.

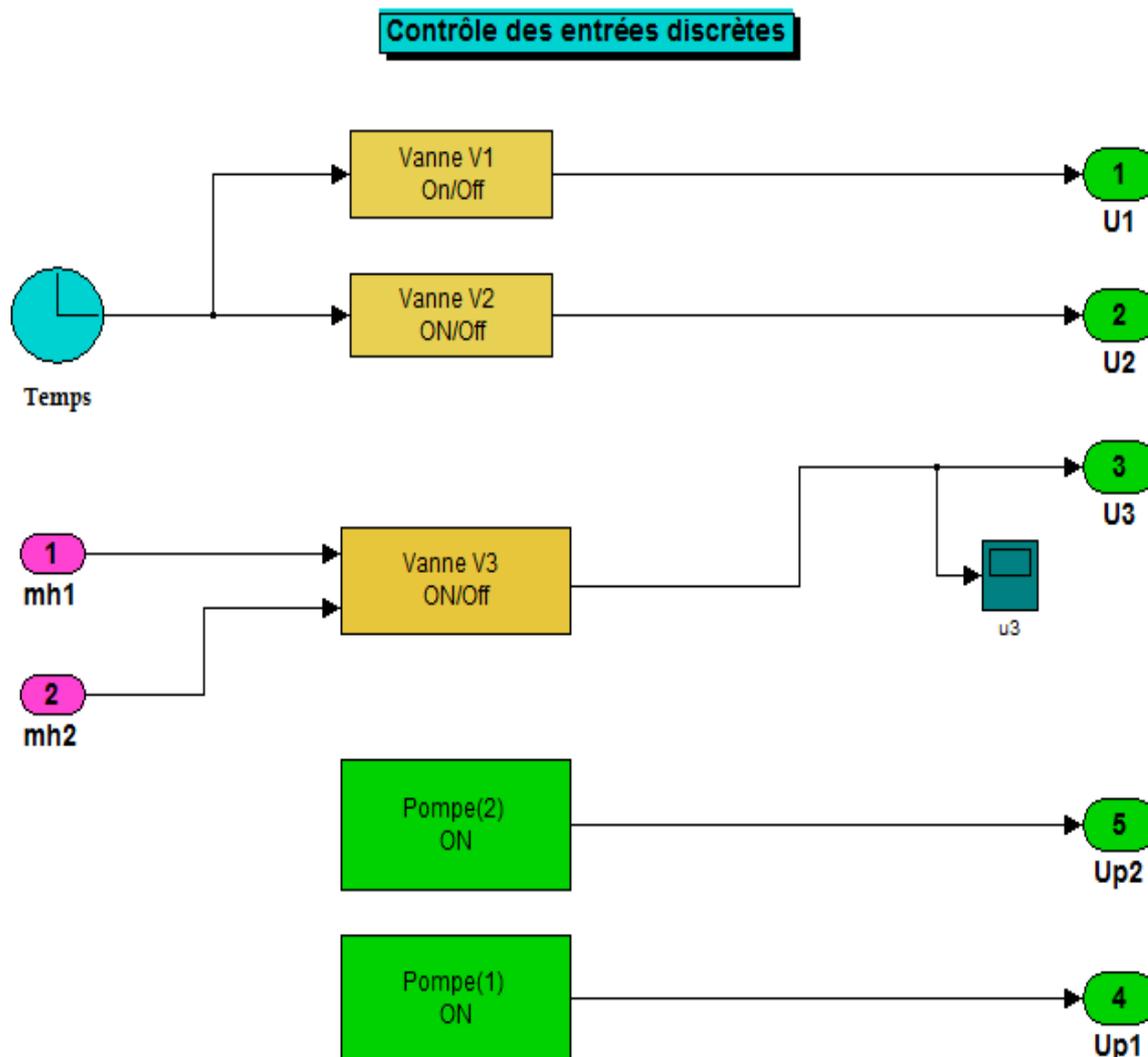
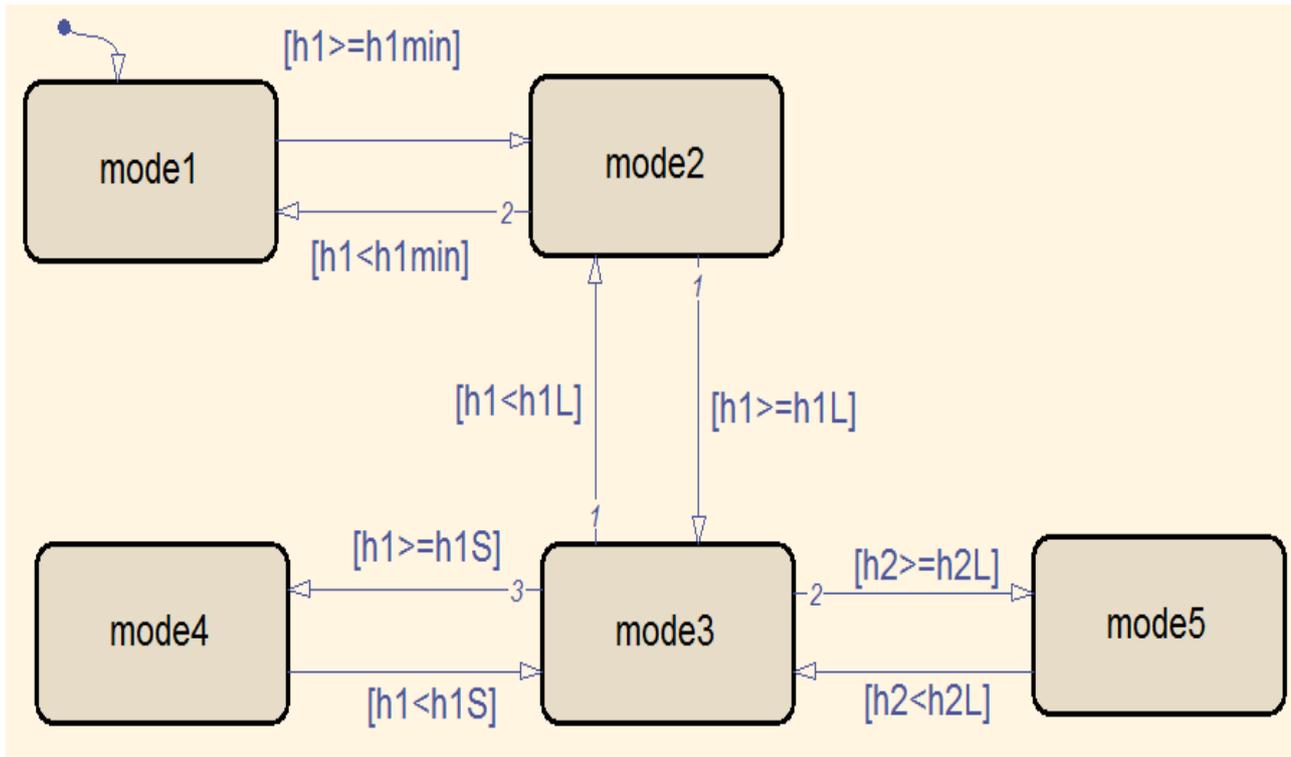


Figure IV.4. Le schéma bloc de calculateur.

**⚡ bloc Automate (bloc d'événements discrets)**

Dans cette partie, nous réalisons l'automate hybride décrivant le fonctionnement du système étudié. Le modèle est donné par cinq modes représentant les comportements normaux sous les hypothèses choisies précédemment.

Le schéma interne de l'automate hybride est représenté par la figure ci-dessous :



**Figure IV.5.** Schéma interne de l'automate hybride

- ✚ Les modes 1, 2 représentent les modes de fonctionnement normal (remplissage vidange de réservoir).
- ✚ Mode 3 représente le mode d'utilisation de l'électrovanne de secours pour la vidange des réservoirs 1 ou 2 (Partagé entre les deux réservoirs).
- ✚ Mode 4 représente le Mode de débordement du réservoir 1.
- ✚ Le mode 5 représente le Mode d'utilisation de l'électrovanne V3 pour la vidange du réservoir 2

Le modèle hybride global comportant les deux blocs (aspect continu/aspect discret), modélisant le système physique et représenté par la figure suivante (Figure IV.5):

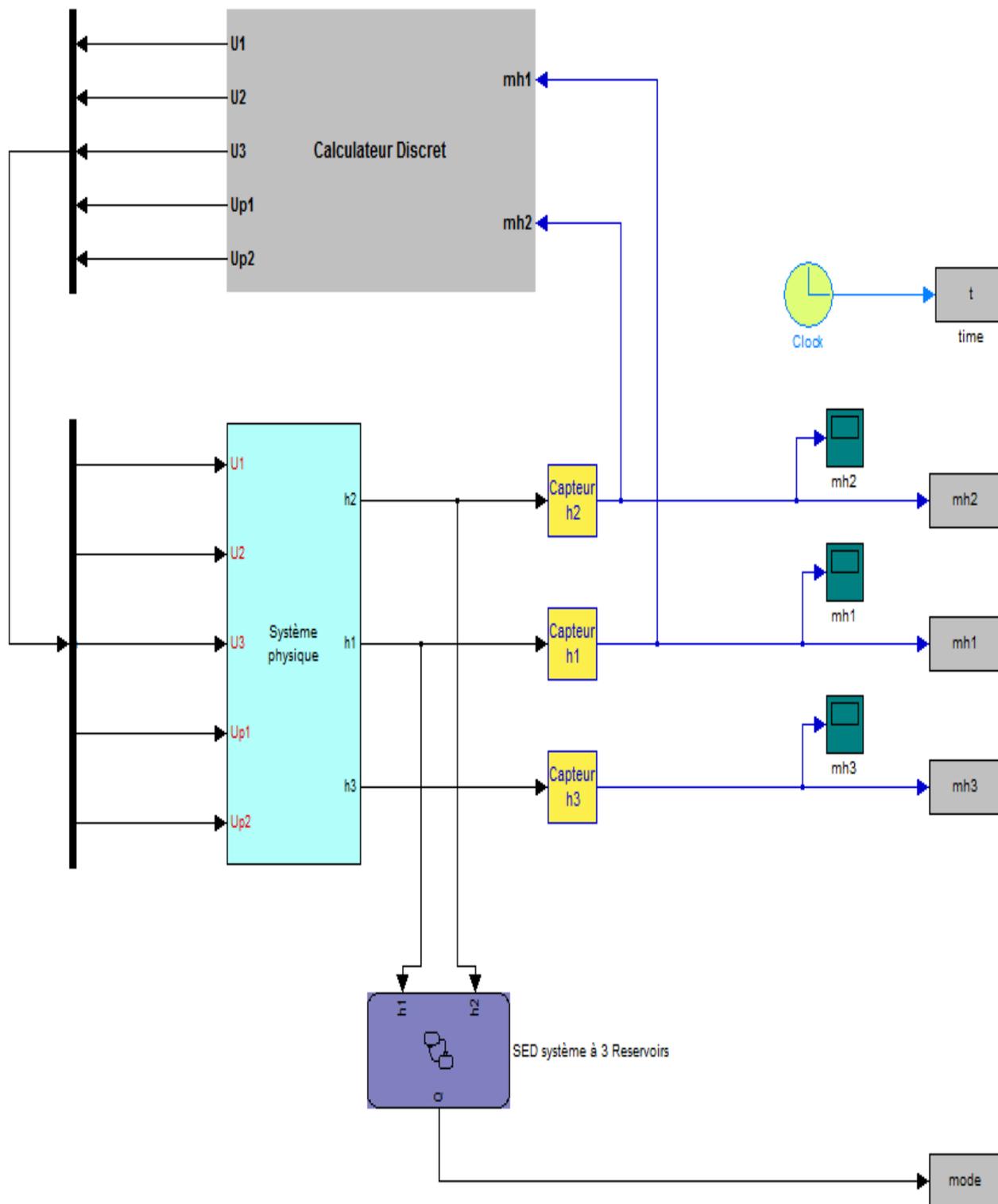
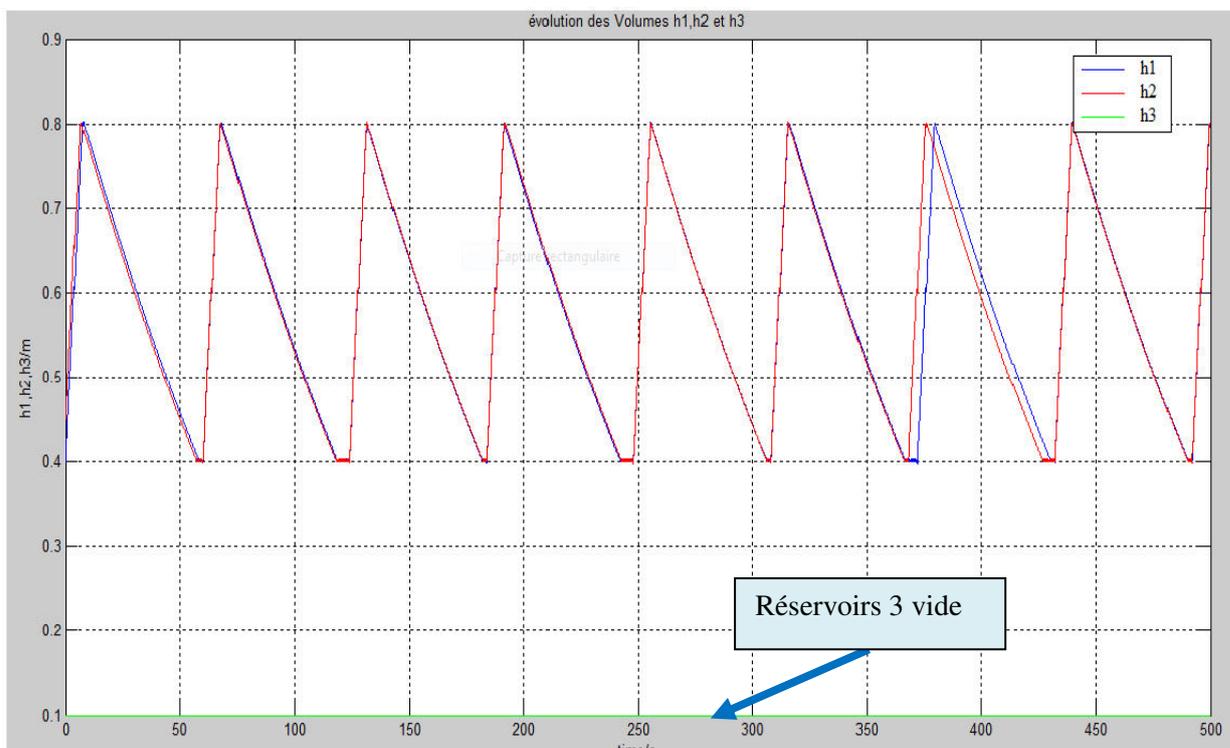


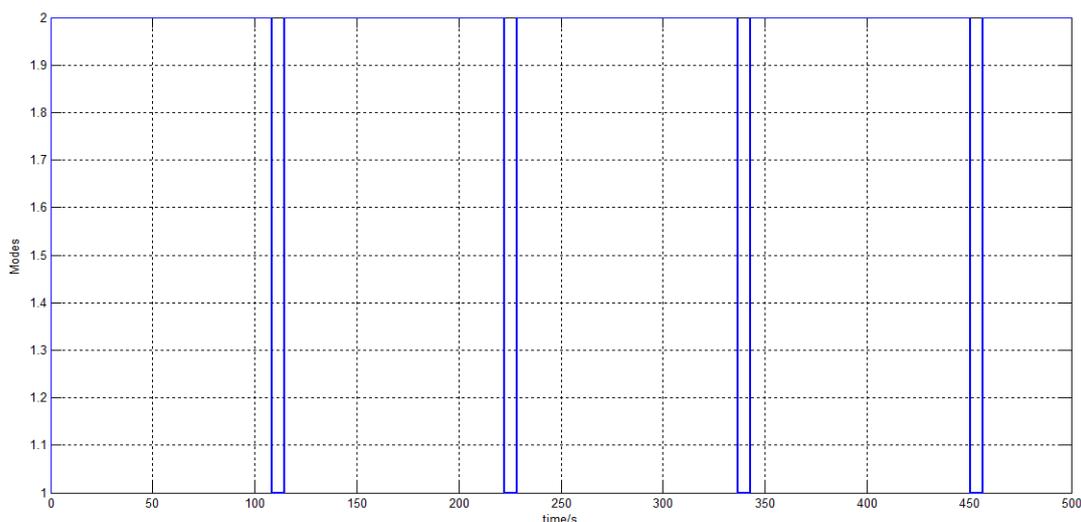
Figure IV.6 : Schéma de simulation du cas d'étude.

Après l'exécution sur le logiciel Matlab/Simulink/Stateflow on trouve les résultats suivants :

- ✓ La figure ci-dessous représente l'évolution des niveaux  $h_1$  et  $h_2$  en mode de fonctionnement normal voir figure VI.7.



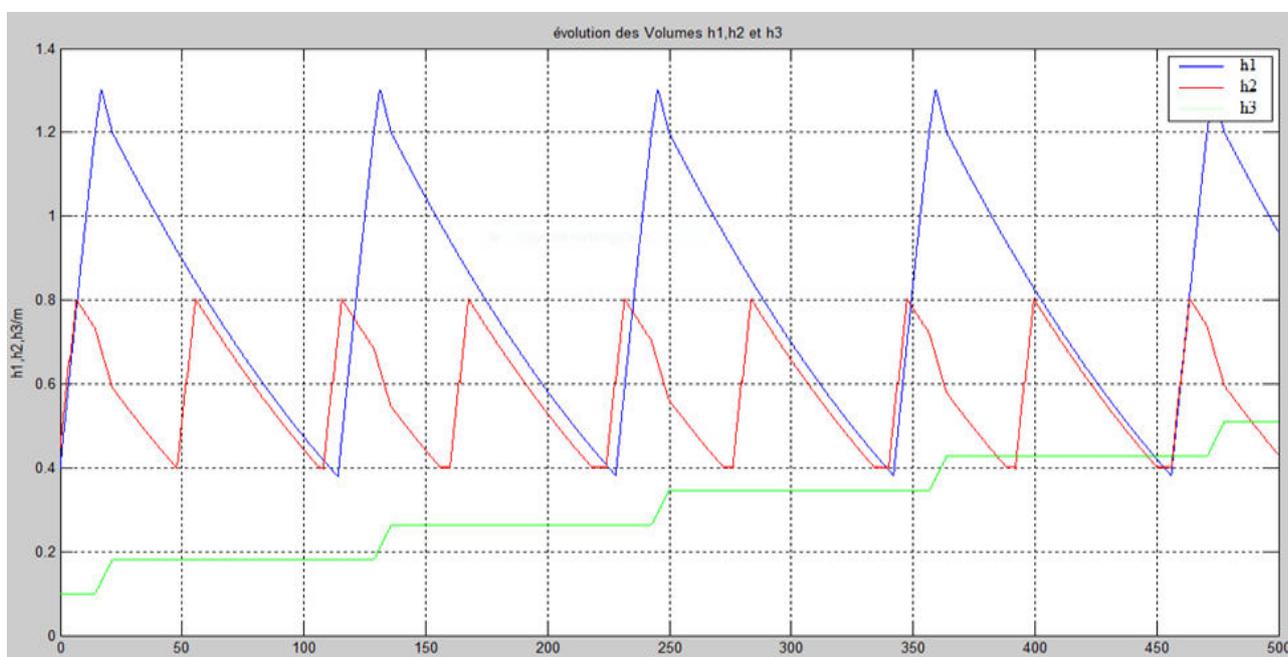
**Figure IV.7** Evolution du volume dans R1 et R2 et R3.



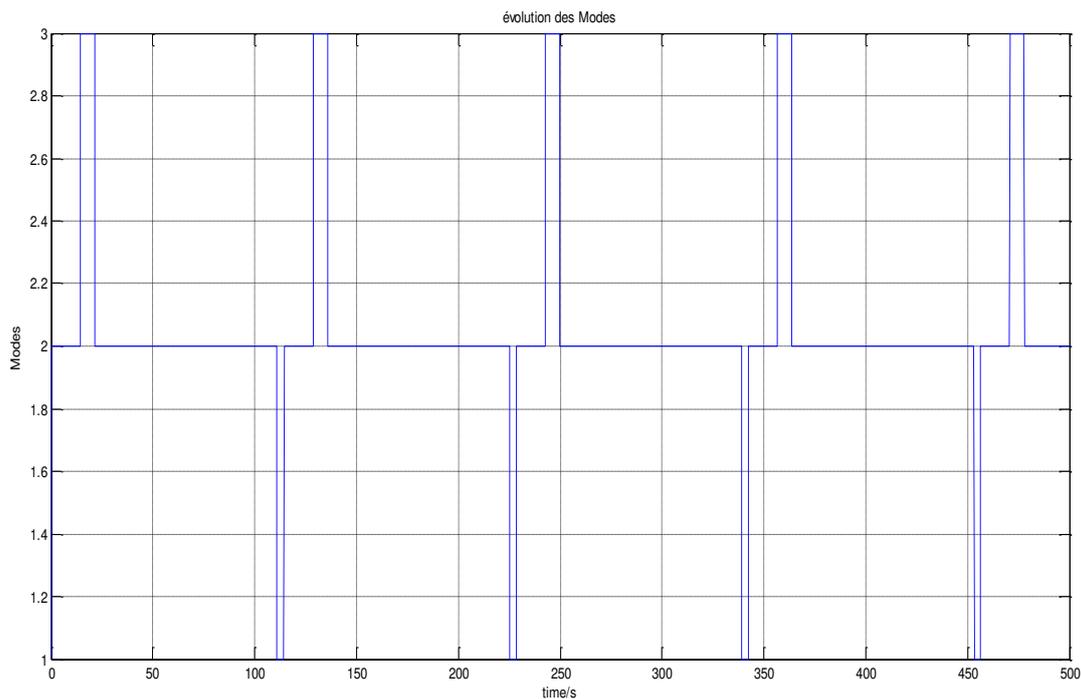
**Figure VI.8** Évolution des modes, cas de fonctionnement normal.

La figure (Figure VI.8) représente l'évolution des modes, donc les résultats de la Figure VI.6 et VI.7 représente l'évolution du volume (remplissage, vidange) dans les deux réservoirs 1 et 2 (R 1, 2), ce qui prouve que les deux électrovannes 1 et 2 et en bon fonctionnement, en remarque bien que le volume dans le réservoir 3 est vide puisque les deux électrovannes 1, 2 et en bon état.

✚ Si l'électrovanne V1 est bloqué on ouverture et l'électrovanne V2est on bon fonctionnement, l'électrovanne 3 de secours (V3) et en bon état, on observe sur la figure ci-dessous que l'évolution de volume dans le troisième réservoir R3croit en fonction du temps cela justifier que l'électrovanne3 est utilisé pour faire la vidange du réservoir 1 (voir Figure VI.9) :



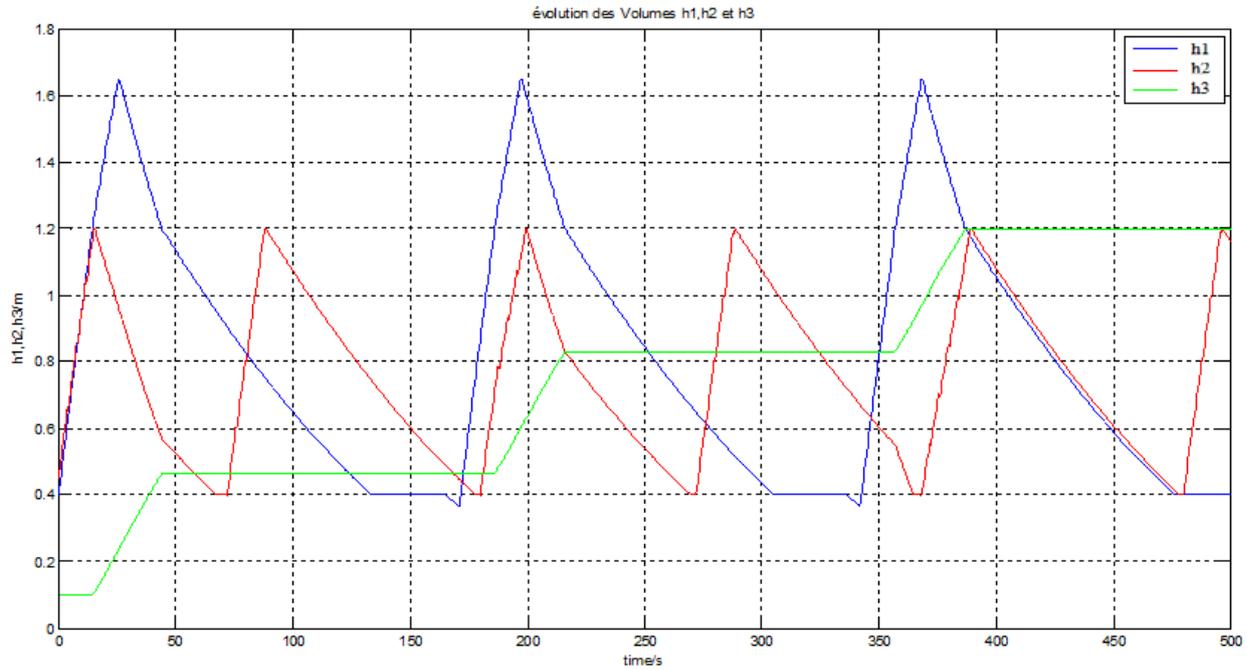
**Figure IV.9** Evolution du volume dans les réservoirs 1, 2 et 3 (V<sub>1</sub> bloqué en ouverture et V<sub>2</sub> en bon fonctionnement, V<sub>3</sub> en bon fonctionnement).



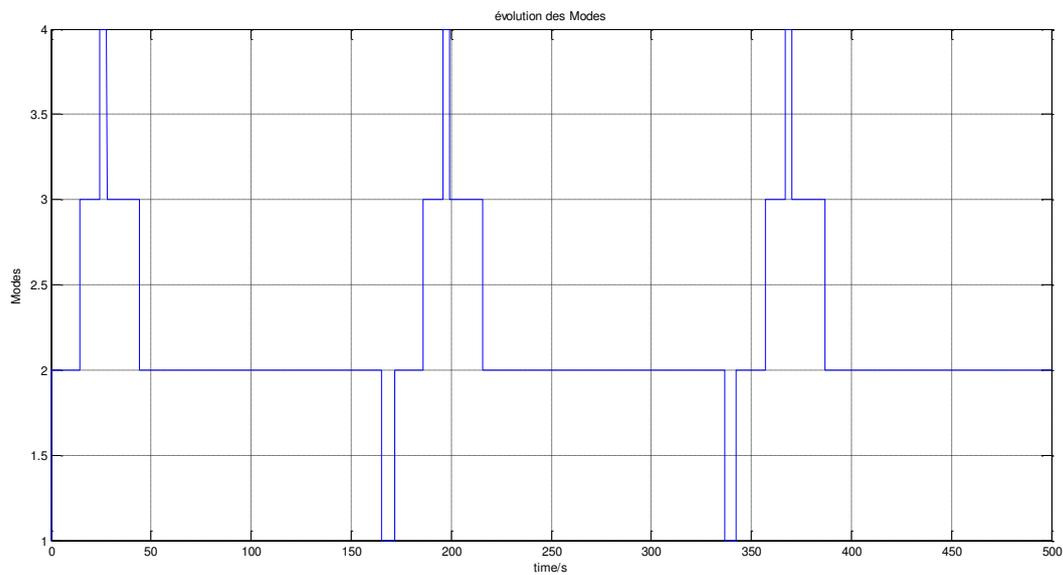
**Figure IV.10** les modes ( $V_1$  bloqué en ouverture et  $V_2$  en bon fonctionnement,  $V_3$  bon fonctionnement).

D'après les figure VI.9 et VI.10 on remarque bien que l'électrovanne de secours (partagé entre les deux réservoirs), est entrain de vidange le réservoir 1. Puisque l'électrovanne 1 est bloqué en ouverture tandis que l'électrovanne 2 et en bon fonctionnement.

- ✚ Lors de la défaillance de l'électrovanne 1, le volume dans le réservoir 1 (R1) continue de croître est devient  $V > V_{1s}$ , on remarque sur les figures(Figure IV.10, Figure IV.11), le débordement du réservoir 1 puisque l'électrovanne de secours  $V_3$  occupé pour la vidange de réservoir 2.



**Figure IV.11.** Evolution du volume dans les réservoirs ( $V_1$  bloqué en ouverture et  $V_2$  bloqué en ouverture en l'électrovanne 3 occupé pour la vidange de réservoir 2).



**Figure IV.12.** Les modes ( $V_1$  et  $V_2$  bloqué en ouverture et  $V_3$  occupé pour la vidange de réservoir 2,  $V_3$  en bon fonctionnement).

**IV.7. Conclusion**

Nous avons choisi une modélisation par automate hybride des systèmes dynamiques hybrides dans cette partie de chapitre, de manière à conduire l'étude de la sûreté de fonctionnement, dont le but d'une étude qualitative et quantitative efficace de ce type de système, en s'appuyant sur la connaissance du modèle de simulation complet du système étudié. La modélisation par automate hybride est réalisée, par l'outil graphique Stateflow, qui fonctionne en symbiose avec Simulink dans le logiciel Matlab. Ce dernier permet de simuler et visualiser le comportement réel et dynamique du système étudié. Les aspects étudiés seront l'observation des paramètres du système, le défaut des composants, ainsi que la simplification du modèle de l'automate.

Cette modélisation par automate hybride que l'on a simplifiée selon les hypothèses choisies, permet de se rapprocher le comportement réel du système, et de d'écrire bien les modes de défaillance du système complet. Ce qui nous permettons d'analyser les modes de fonctionnement normale et les modes de défaillances et d'analyser l'évolution de l'état continue et discret du système réel et d'augmenté sa fiabilité.

### *Conclusion générale*

Ce travail est dédié à la modélisation et la surveillance des systèmes dynamiques hybrides. Ces systèmes sont composés essentiellement d'un mélange de deux composantes : une composante continue et une composante événementielle interagissent entre eux, où leur interaction détermine le comportement qualitatif et quantitatif de système.

Nous avons choisi une modélisation par automate hybride de cas d'application qui est un système dynamique hybride, de manière à conduire l'étude de la sûreté de fonctionnement, dont le but d'une étude qualitative et quantitative efficace de ce type de système, en s'appuyant sur la connaissance du modèle de simulation complet du système étudié. La modélisation par automate hybride est réalisée, par l'outil graphique Stateflow, qui fonctionne en symbiose avec Simulink dans le logiciel Matlab. Ce dernier permet de simuler et visualiser le comportement réel et dynamique du système étudié. Les aspects étudiés seront l'observation des paramètres du système, le défaut des composants, ainsi que la simplification du modèle de l'automate.

Cette modélisation par automate hybride que l'on a simplifiée selon les hypothèses choisies, permet de se rapprocher le comportement réel du système, et de d'écrire bien les modes de défaillance du système complet. Ce qui nous permettons d'analyser les modes de fonctionnement normale et les modes de défaillances et d'analyser l'évolution de l'état continue et discret du système réel et d'augmenté sa fiabilité.

A partir de notre travail, on conclut que les automates hybrides utilisés pour la modélisation des systèmes dynamique hybride et utilisé aussi pour la surveillance et la détection de défaut par l'aspect discret et continue qui est le caractère important des automates hybrides.

## Références bibliographiques

- [1] HAKIKI Rafika « Etude et Analyse des Systèmes Dynamiques Hybrides : Approche par les Réseaux de Petri Hybrides et Automates Hybrides Linéaires ». Le diplôme de magistère, université Oran.
- [2] M. S. Branicky, V. S. Borkar, and S. K. Mitter. A unified framework for hybrid control. In IEEE Conference Decision and Control, pages 4228–4234, December 1994.
- [3] M. S. Branicky. Studies in hybrid systems: Modeling, Analysis, and control. Phd thesis, Massachusetts Institute of Tech., 1995.
- [4] P. Mosterman and G. Biswas. Modeling and simulation semantics for hybrid dynamic physical systems. In technical report DLR IB 515-98-26, Institute for Robotics and System Dynamics, DLR Oberpfaffenhofen. 1998.
- [5] T.EL Mezyani .méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides. Thèse de doctorat, spécialité : automatique et informatique industrielle, préparé au laboratoire d'automatique Génie informatique et Signal UMR CNRS 8146 de l'université des sciences et technologies de Lille, 2005.
- [6] S. Hashtrud . Fault Diagnosis in discrete-event and hybrid systems. Thesis, Toronto University, Canada, Septembre 1999.
- [7] M. Kurovsky. Etude des Systèmes Dynamiques Hybrides par représentation d'état discrète et automate hybride. Thèse de doctorat, l'INPG, France, 2002.
- [8] D. Harel, A. Pnueli, J. P. Schmidt, and R. Sherman. On the formal semantics of statecharts. In Proc. First IEEE Symp. Logic in Comp. Sci., pp: 54–64, 1986.
- [9] A. Van Der Schaft and H. Schumacher . An Introduction to hybrid Dynamical Systems, lecture Notes in control and Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin (Allemagne), Londres(Angleterre), 251:175Pp, 2000.
- [10] S. Guana., M. Nakamura, T. Shikanaib and Takeo Okazakia. Hybrid Petri nets modeling for farm work flow. Computers and electronics in agriculture 62 pp:149–158, 2008.
- [11] Z. Juarez, B. Denis and J. J. Lesage. Réseaux d'automates hybrides à synchronisations typées pour la modélisation des SDH, Conférence Internationale d'Automatique Francophone, CIFA 2008, Bucarest : Roumanie, 2008.
- [12] H. Guéguen, M.A. Lefebvre, O. Nasri and J. Zaytoon. Safety verification and reachability analysis for hybrid systems. Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

- [13] T.Gu,A and bahri.A survey of Petri net applications in batch process, *Computers in Industry*Volume 47, Issue 1, pp: 99-111 , January 2002.
- [14] A.D.Febbraro and N. Sacco. On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets. *Control Eng. Pract.* 12, pp: 1225–1239. 2004.
- [15] M.Ghaeli,P.A Bahri and P.L.Lee. Timed arc hybrid Petri nets based scheduling of mixed batch/continuous plants. In: *Proceedings of the 17th IMACS World Congress, Paris, France, 2005.*
- [16] F. Kaakai, S. Hayat and A.E. Moudni. A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transitstations. *Simulat. Model. Pract. Theory* 15,pp: 935–969.2007
- [17] P.Gawthrop and B.Geraint. Bond Graph Modeling. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 27, 2007.
- [18] F. Kaakai, S. Hayat and A.E. Moudni. A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transitstations. *Simulat. Model. Pract. Theory* 15,pp: 935–969.2007
- [19] J. Buisson. Analysis of switching devices with bond-graphs. *Journal of the Franklin Institute* Vol 330, N° 6, pp. 1165-1175, 1993.
- [20] J. Buisson, H. Cormerais and P.Y. Richard.. Analysis of the bond graph model of hybrid physical systems with ideal switches. *Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 216, pp. 47-72, 2002.
- [21] R.David and H.Alla. On Hybrid Petri Nets.*Discrete Event Dynamic Systems: Theory and applications*, Vol.11, Numbers ½, pp.9-40, 2001.
- [22] R. David and H. Alla. *Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets*. Springer, 2005.
- [23] H. Alla and R. David.*Continuous and Hybrid Nets*. *Journal of Circuits, Systems and Computers*,Volume 8, No.1, p. 159-188, 1998.
- [24] J. Zaytoon and J. L. Ferrier. *Rappels sur les systèmes à événements discrets dans les systèmes dynamiques hybrides*, Edition Hermès– France. 2001.
- [25] R. Alur, C. Courcoubetis, N. Halbwachs, T.A. Henzinger, P. H. Ho, X.Nicolin, A. Olivero, J. Sifakis and S. Yovine. *The Algorithmic Analysis of Hybrid Systems*, *Theoretical computer science*, Vol. 138, pp.3-34, 1995.
- [26] E.A.Lee, S. Neuendorffer, and M. J. Wirthlin. Actor-oriented design of embedded hardware and software systems. *Journal of Circuits, Systems, and Computers* 231–260, 2003
- [27] B. Potocnik, A. Bemporad, F.D. Torrisi, G. Music, and B. Zupancic. Hysdel modeling and simulation of hybrid dynamical systems. In *Proceedings of MATHMOD Conference*, pages 5–7, February 2003.

- [28] J.M. Flaus and L. Thévenon. Modular representation of complex hybrid systems: Application to the simulation of batch processes. *Simulation Practice and Theory(SIMPRA)*, 2000.
- [29] P. Mosterman. A modelling and simulation environment for hybrid bond graphs. *Proceedings of the IMECHE Part I, Journal of Systems and Control Engineering, Part I*, 216(1)pp:35–46, February 2002
- [30] M.Daigle, I.Roychoudhury, G.Biswas and X. Koutsoukos. Efficient simulation of component-based hybrid models represented as hybrid bond graphs. Technical Report ISIS- 06-712, Institute for Software Integrated Systems Vanderbilt University, Nashville, TN, USA 2006.
- [31] R. Alur, F Ivancic, and T. Dang. Progress on reachability analysis of hybrid systems using predicate abstraction. In O. Maler and A. Pnueli, editors, *Hybrid Systems: Computation and Control: 6th International Workshop, HSCC 2003, Prague, Czech Republic,LNCS 2623*, pages 4–19. Springer, April 2003
- [32] M. Kloetzer and C. Belta. Reachability analysis of multiaffine systems. In J Hespanha and A Tiwari, editors, *Hybrid Systems: Computation and Control: 9th International Workshop, HSCC2006, Santa Barbara, CA, USA, LNCS 3927*, pages 348–362. Springer, march 2006.
- [33] J. Lunze. Diagnosis of quantized systems based on a timed discrete-event model. In *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 30(3):322–335, May 2000.
- [34] N. Bergman and M. Larsson. Fault detection and isolation in the water tank world. In *Proc. First Conference on Computer Science and Systems Engineering, Linköping, Sweden, Mar 1998*. ECSEL.
- [35] H. Alla and R. David. A modeling and analysis tool for discrete events systems: Continuous Petri net, *Perform. Evaluation* 33 (3) (1998) 175, 1998.
- [36] P.Bonhomme. Réseaux de Petri P-Temporels : Contribution a la Commande Robuste. Thèse pour obtenir le grade de Docteur préparé à l’université de Savoie 12 juillet 2001.
- [37] R. David and H.Alla. Continuous Petri Nets. *Proceedings of the Eight European workshop on application and theory of Petri nets*, Pages 275-294, Zaragoza(Espagne), juin 1987.
- [38] A.BENHOCINE, Théorie des graphes et applications, Cours de post-graduation, Université de Sétif, 2001.
- [39] Antonio Ramòne, "Modélisation et analyse du comportement dynamique des systèmes hybrides : une approche basée sur le modèle d’automate hybride", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), France, 15 octobre 1999.
- [40] M.S. Branicky, "Studies in hybrid systems : Modeling, Analysis and Control", PhD thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science – MIT Cambridge, 1995.
- [41] P.Antsaklis and X. Koutsoukos, "On hybrid control of complex systems : a survey",

Symposium ADPM'98, Reims, France, 1998.

[42] Sait. Belkacem, "Modélisation, Simulation et Surveillance des Systèmes Dynamiques Hybrides utilisant les résidus de parité et réseaux de Pétri", UFAS, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2007.

[43] Narasimhan, V.S., G. Biswas, G. Karsai, T. Pasternak and F. Zhao, "Building observers to handle fault isolation and control problems in hybrid systems", Proc. IEEE Intl, Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Nashville, TN. pp. 2393–2398, 2000.

[44] Vincent Cocquempot, Toria El Meziani et Marcel Staroswiechi, "Fault Detection and Isolation for hybrid systems using Structural Parity Residuals", LAGIS : Laboratoire d'Automatique de Génie Informatique et Signal, université de sciences et technologies de Lille, France.

[45] khaoui sofiane, Modélisation et surveillance des systèmes dynamiques hybrides par automates hybrides, université Ferhat Abbas-setif,

[46] Nelly olivier-Maget, surveillance des systèmes dynamiques hybrides, université de TOULOUSE ,2007.