

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Automatique et Informatique Industrielle
Spécialité : Commande et Diagnostic
des Systèmes Industriels



**Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Modélisation d'un système dynamique hybride par stateflow

Présenté par : BOUKHAMA Asma

Sous la direction de : BOUSSERAGE Laila

Mai 2014



Remerciement

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire

Madame Leila Bouceraj . Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi,

« Vous avez tout sacrifié pour votre fil n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Je remercie en particulier Bilale Tolbi pour l'aide et le temps qu'il ma consacré.

Je remercie mes collègues de classe pour leur encouragement.

Je remercie très spécialement mes enseignants ou cours de mon master qui ont donné tout ce qu'ils peuvent pour nous

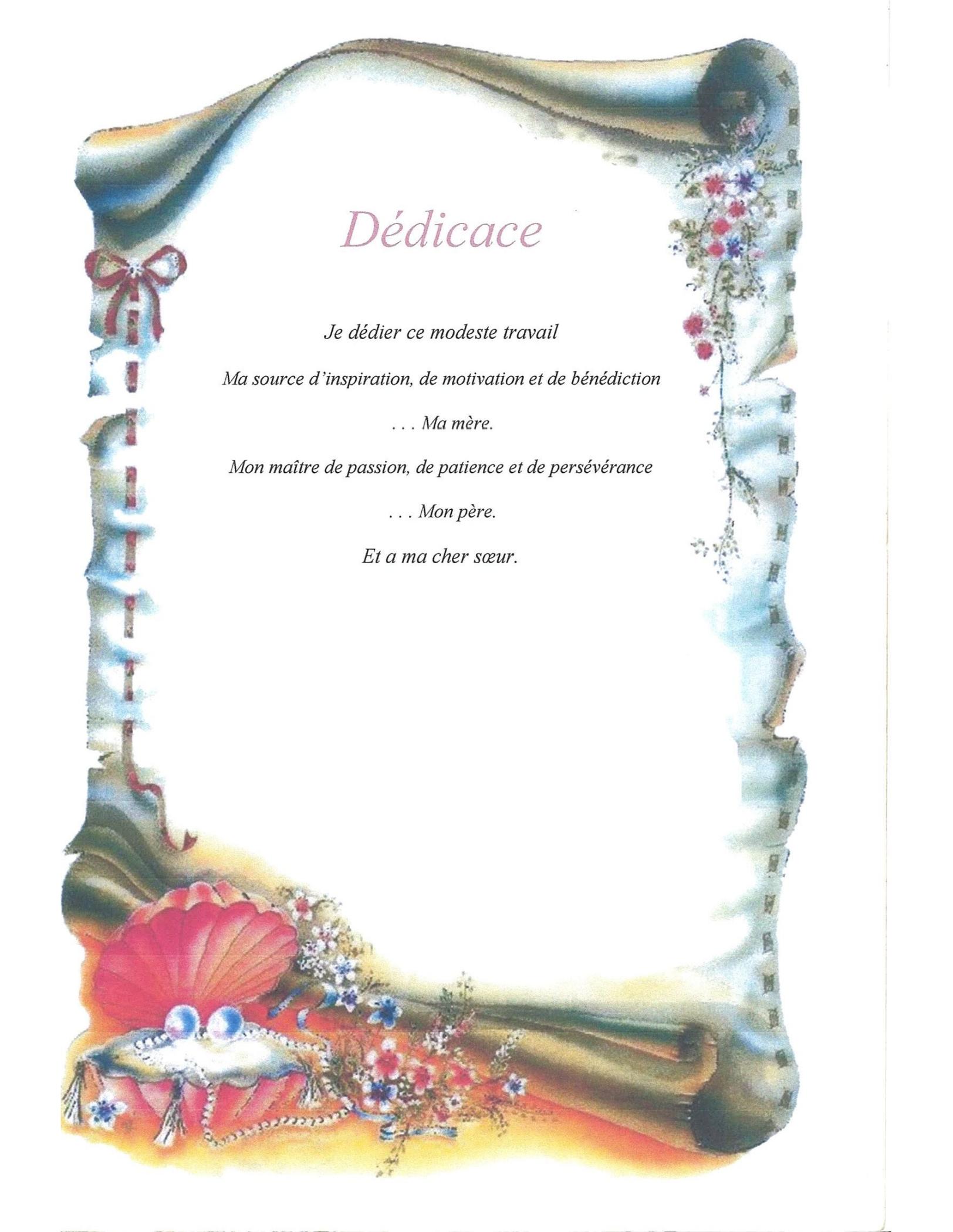
Je tiens à remercier, toute ma famille leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

Enfin, je remercie tous mes Ami(e)s que j'aime .

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

14/3088

ASMA



Dédicace

Je dédier ce modeste travail

Ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction

. . . Ma mère.

Mon maître de passion, de patience et de persévérance

. . . Mon père.

Et à ma cher sœur.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
chapitre 1 : Etude des systèmes dynamique hybride.....	3
1.1. Bref historique.....	4
1.2. Introduction.....	6
1.3. Notions de systèmes hybrides.....	6
1.3.1. Définition des systèmes dynamiques hybrides (SDH).....	6
1.3.2. Principales classe de phénomènes hybrides.....	7
1.4. Exemples illustratifs.....	9
1.5. Conclusion.....	12
chapitre 2 : modélisation des systèmes des dynamiques hybride.....	13
1.6. Introduction.....	14
1.7. Une structure des SDH.....	14
1.7.1. Le procédé.....	15
a) Aspects continues.....	15
b) Aspects discrètes.....	16
1.7.2. Les Changements de dynamique continue dus à la structure du système.....	16
1.7.3. Les changements de dynamique continue générés par des entrées discrètes.....	17
1.7.4. Les spécifications de fonctionnement.....	18
1.8. La modélisation des systèmes hybrides.....	18
1.8.1. Approches de modélisation.....	18
a) L'approche continue.....	18
b) L'approche événementielle.....	19
c) L'approche mixte.....	19
1.9. Les Outils de modélisation.....	19
1.9.1. Les statecharts hybrides.....	20
1.9.2. Réseaux de Pétri Mixtes.....	20
1.9.3. Les réseaux de Pétri prédicats-transitions différentiels.....	21
1.9.4. Réseaux de Pétri Hybrides.....	21
1.9.5. Les automates hybrides.....	21

Conclusion.....	23
Chapitre 03 : Modélisation d'un système hybride " Système à deux réservoirs " ...	24
3.1 Introduction	25
3.2 Définition d'un mode.....	25
3.3 Simulation d'un système hybride par stateflow.....	26
3.4 Cas d'étude.....	29
3.4.1 Présentation.....	29
3.4.2 Modélisation.....	30
a) Aspects discrets	30
b) Aspects continus.....	30
c) Expressions des débits.....	31
3.5 Simulation du modèle hybride.....	32
a. (Simulation du système physique (bloc continu)).....	32
b. Les équations des réservoirs.....	32
c. Les équations des électrovannes.....	32
Conclusion	40
Conclusion générale	41
Bibliographique	

Liste des Figure

Chapitre I :Etude des systèmes dynamique hybride	
Figure 01 : Commutation autonome.....	8
Figure 02 :Système hybride à commutation contrôlée.	9
Figure 03 :Modèle du thermostat.	10
Figure 04 : Trajectoire de la température..	12
Chapitre II : modélisation des systèmes des dynamiques hybride	
Figure 01 :l'inter réaction entre le discret et le continu.....	14
Figure 02 : Exemple d'une structure physique particulière.....	16
Figure 03 : Automate hybride.....	22
Chapitre III : Modélisation d'un système hybride ‘‘ Système à deux réservoirs ‘‘	
Figure 01 : Bloc stateflow.....	27
Figure 02 : Simulation de l'interrupteur.....	29
Figure 03 : Système de régulation des deux réservoirs.....	29
Figure 04 : le schéma interne du bloc physique du système.....	33
Figure 05 : Le schéma bloc de calculateur.....	34
Figure 06 : Schéma interne de l'automate hybride.....	35
Figure 07 : Schéma de simulation du système.....	36
Figure 08 : Evolution du volume dans R1et R2 et R3.....	36
Figure 09 : Evolution des modes.....	37
Figure 10 : 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)	38
Figure 11 : les modes(V_1 bloqué en ouverture et V_2 en bon fonctionnement, V_3 en bon fonctionnement)	38
Figure 12 : évolution du volume dans les réservoirs R1, R2 et R3 cas de débordement.....	39
Figure 13 : les modes pour le cas de débordement.....	39

Introduction générale

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

C'est le cas par exemple des productions du type batch (par lots) dans les quelles la matière est caractérisée par des variables continues (comme le volume, la concentration, la pression ...) et est traitée étape par étape (évènement discret).

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. On peut trouver plusieurs types de systèmes hybrides : systèmes intrinsèquement hybrides, systèmes continus avec commandes discrètes, systèmes à évènements discrets évoluant d'une manière continue, ou systèmes continus évoluant avec des commutations discrètes. La plupart des systèmes hybrides présents dans l'industrie sont intégrés dans des systèmes industriels commandés.

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

Les diagrammes de cas d'utilisation (Use Case Diagrammes) permettent de définir les interactions entre l'utilisateur et le système commandé [8]. Les diagrammes d'activités permettent de décrire l'organisation des activités sous forme d'objets, tout en prenant en compte les comportements conditionnels et parallèles [9]. Les diagrammes de collaboration et de séquences permettent de ressortir les interactions entre différents objets et processus.

Nous constatons aussi que les fonctionnalités des machines à état (en Automatique) peuvent être représentées par les diagrammes d'activités (Activity Diagrams) ou les diagrammes

Introduction générale

d'états transitions (StateCharts). Tous ces aspects du travail sont décrits en détail dans [10] [11]. Dans le présent article qui

Sachant que nous ne disposons pas souvent d'un modèle de comportement réel, un travail de simulation s'impose. Au cours de ces vingt dernières années, les outils informatiques pour la modélisation et la simulation des procédés se sont développés conjointement avec les outils et techniques informatiques. La technologie des ordinateurs a considérablement évolué et les langages ont progressé, passant d'une approche procédurale à une approche orientée objet.

Dans les années 90, les simulateurs dynamiques se sont améliorés en termes de structure et de L'objectif de ce mémoire est la modélisation des systèmes dynamiques hybrides par les automates hybrides

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.

Dans le troisième chapitre : Comprend des définitions de Tools box « state flow » avec un exemple simulé.

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



Chapitre 1

1.1. Bref historique

1.2. Introduction

1.3. Notions de Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)

1.3.1. Définition des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)

1.4 Principales classes de phénomènes hybrides

1.4.1 SDH à Commutation autonome "Switching"

1.4.2 SDH à Commutation contrôlée

1.5. Exemples illustratifs

1.6. Conclusion

Chapitre 1

1.1. Bref historique

L'histoire et le développement de la théorie de la commande et des systèmes de commande à contre-réaction sont maintenant brièvement retracés. [Arzelier, 04].

- **300 avant J.C.**: La première mise en œuvre de système de commande à contre-réaction est l'œuvre des grecs dans l'antiquité avec des régulations de niveau par flotteur afin de mesurer précisément le temps. Comme la pendule à eau ou clepsydre de Ktesibios et d'héron, une régulation à flotteur du niveau d'huile, comme la régulation de Philon de Byzance (Voir annexe 1)

- **800 -1200**: les ingénieurs Arabes commencent la régulateurs à flotteur pour des horloges à eau et autres applications, comme Al-Jazari, les trois frères Musa et Ibn al-Saati. (Voir annexe 1)

- **1600 -1900**: la révolution industrielle débute réellement avec l'avènement des procédés de commande à contre-réaction. En effet, l'invention de nouveaux mécanismes (moulins à grains avancés, fours, machine à vapeur) nécessitent des systèmes de commande perfectionnés allant au-delà de la régulation manuelle. (Voir annexe 1)

- **1800 -1935** : cette période préclassique de la théorie de la commande fut celle pendant laquelle les principales contributions furent d'ordre mathématique. On peut parler de mathématisation de la théorie de régulation.

- Introduction des équations différentielles pour l'étude des systèmes à contre-réaction et mise en évidence du problème de la stabilité des systèmes bouclés (Lagrange), (Hamilton), (Poncelet), (Airy-1840), (Hermite-1854), (Maxwell-1868), (Routh-1877), (Vyshnegradsky-1877), (Hurwitz-1895), (Lyapunov-1892).

- Développement de l'analyse des systèmes dans le domaine fréquentiel (Minorsky-1922), (Black-1927), (Nyquist-1932), (Håzen-1934).

- **1940-1960**: la deuxième guerre mondiale a joué le rôle de stimulant intellectuel primordial pour le développement de la commande des systèmes et a donné naissance à la période dite classique.

1. 2.Introduction :

Traditionnellement, l'automatique traite différemment les problèmes de type continu et ceux de type séquentiel (discret). Ainsi on distingue classiquement deux spécialités : l'automatique des systèmes continus et celle des systèmes à évènements discrets.

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

On peut trouver plusieurs types de systèmes hybrides : systèmes intrinsèquement hybrides, systèmes continus avec commandes discrètes, systèmes à évènements discrets évoluant d'une manière continue, ou systèmes continus évoluant avec des commutations discrètes. La plupart des systèmes hybrides présents dans l'industrie sont intégrés dans des systèmes industriels commandés.

Ce chapitre comporte une présentation des systèmes dynamiques hybrides (SDH)

1.3 .Notions de Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)

Les systèmes dans lesquels interagissent des composantes continues et discrètes sont appelés **Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)**.

1.3.1. Définition des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)

On peut mettre sous ce titre plusieurs définitions d'après la littérature trouvée. Mais avant de proposer ces définitions, on va citer quelques notions préliminaires nécessaires pour mettre l'image claire.

Définition 1.1 :

Une variable est dite *continue* si elle peut prendre ses valeurs dans un ensemble continu de valeurs (donc non dénombrable) et ses variations ne présentent pas de discontinuités.

Définition 1.2 :

Une variable est dite *discrète* si elle peut prendre ses valeurs dans un ensemble dénombrable de valeurs.

Les variables $V1 \in \{0,1\}$, $V2 \in \{-4, 1, 3\}$, $N \in \{B, M, H\}$, $P \in \{\text{Arrêté, Démarré, Repos}\}$, sont des variables d'état discrètes.

Après ces définitions importantes et nécessaires, nous avons accueilli plusieurs définitions des SDH rencontrées dans la littérature.

✚ *Définition 1.3 :*

a) Les SDH sont des systèmes dans lesquels les dynamiques discrètes et continues interagissent et où leur interaction détermine le comportement qualitatif et quantitatif de ses systèmes.

b) Les SDH sont des systèmes dynamiques faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes ou des modèles de type dynamique continue et événementielle.

Ces systèmes sont classiquement constitués de processus continus interagissant avec ou supervisé par des processus discrets. Ils résultent également de l'organisation hiérarchique des systèmes de contrôle/commande complexes.

c) Les SDH sont des systèmes dont le comportement dynamique est défini par des entités ou des processus de nature différente.

d) Un SDH consiste en un système discret avec un environnement continu. On suppose que l'évolution d'un SDH est une séquence de pas continus alternée par des pas discrets. Dans chaque pas l'état du système hybride évolue d'une façon continue selon des lois dynamiques (équations différentielles par exemple) jusqu'à l'occurrence d'une transition discrète. Les transitions sont des états instantanées servent à séparer les évolutions d'état continues.

✚ *Définition 1.4 :*

Un système **discret** est tel que toutes ses variables d'état sont discrètes.

Un système **continu** est tel que toutes ses variables d'état sont continues.

Un système **hybride** comprend au moins : une variable d'état discrète et une variable d'état continue.

1.4. Principales classes de phénomènes hybrides :

La nature hybride d'un système peut être inhérente aux phénomènes physiques qui le régissent. Un certains nombres de phénomènes physiques considérés comme hybrides ont été regroupés en deux catégories principales traduisant leur influence sur les modèles mathématiques utilisés pour décrire les différentes classes des systèmes. Rappelons brièvement que l'évolution d'un système continu est définie par un ensemble d'équations différentielles de la forme :

$$\dot{x} = f(x, t), \text{ où } f(x, t) \quad (1.1)$$

est appelé champ de vecteurs d'état, \dot{x} l'état du système, et t le temps.

1.4.1 SDH à Commutation autonome "Switching" :

✚ Une *commutation autonome* caractérise un phénomène où le champ de vecteur $f(x, t)$ change de façon discontinue lorsque l'état x atteint certains seuils comme schématisé dans la figure II.1.a pour une seule variable d'état.

✚ Le *saut autonome "Jump"* est un phénomène similaire rencontré dans les systèmes mécaniques, il s'agit d'un saut discontinu de l'état continu x lorsqu'il atteint une région donnée de l'espace d'état, c'est-à-dire que l'état passe de façon discontinue de sa valeur courante à une autre. Comme le montre schématiquement la figure II.1.b pour une variable d'état.

Un exemple de ce phénomène est donné par la collision de deux corps où la vitesse change brutalement et subit un saut.

Un exemple de la commutation autonome est l'exemple classique de la table de billard. (Voir la section suivante).

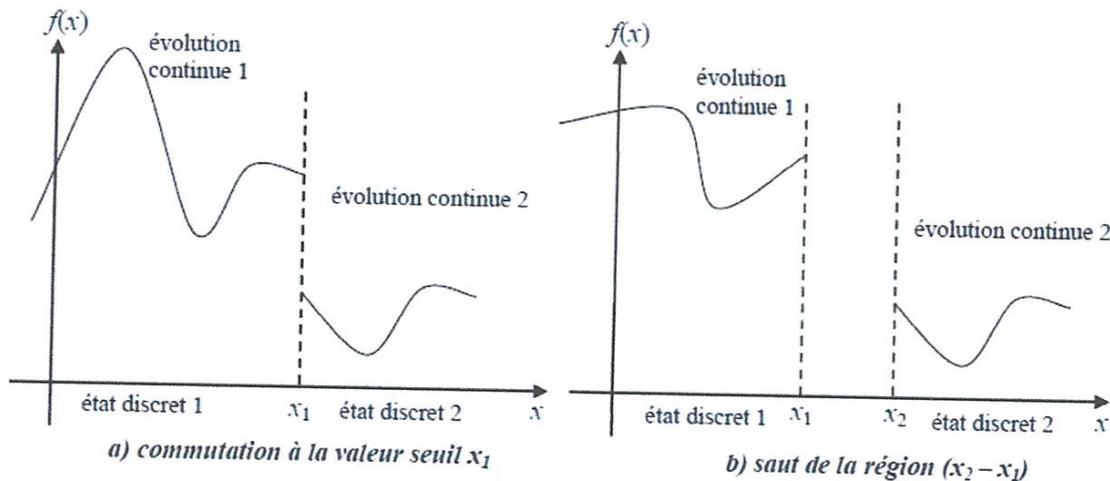


Figure 1.1 : Commutation autonome.

1.4.2 SDH à Commutation contrôlée :

Une *commutation contrôlée* traduit un phénomène où le champ de vecteur $f(x, t)$ change de façon discontinue et instantanée en réponse à une entrée de commande.

Le phénomène de commutation contrôlée est illustré à travers l'exemple de l'embrayage mécanique. Il s'agit d'un système composé de deux masses en rotation. Les masses sont couplées par un embrayage mécanique idéal. Chaque masse i , dont l'inertie est J_i , est entraînée par un couple Q_i à une vitesse de rotation ω_i . Quand les masses sont couplées, les valeurs des vitesses de rotation sont identiques. Ces vitesses sont indépendantes quand les masses sont découplées (vu par la suite).

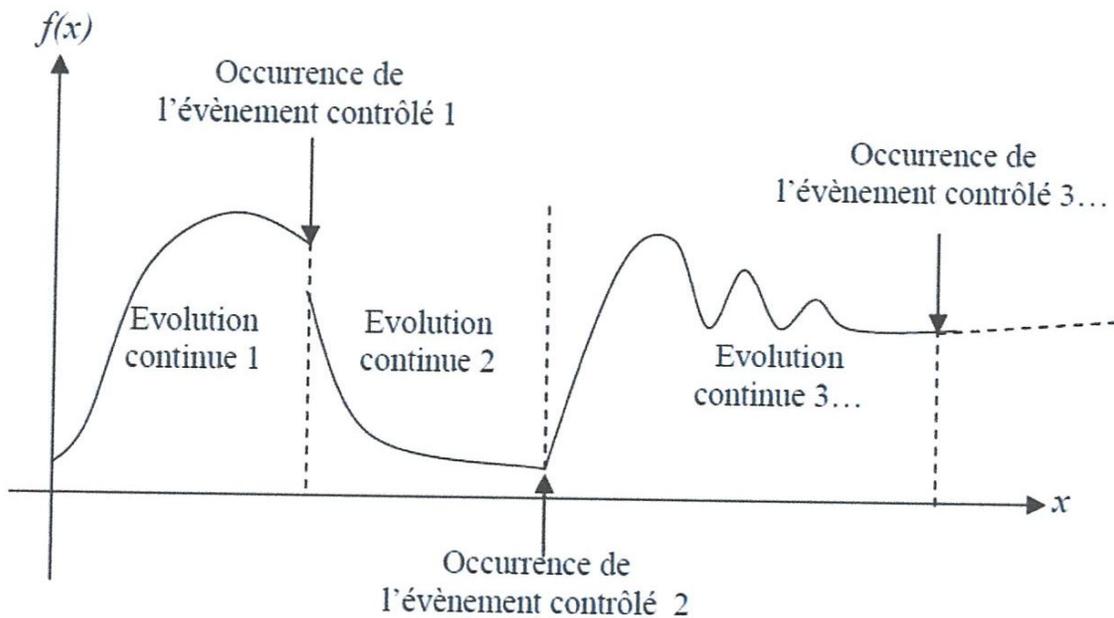


Figure 1.2. Système hybride à commutation contrôlée.

1.5. Exemples illustratifs:

🌸 Le thermostat :

Considérons l'exemple classique d'un thermostat utilisé pour maintenir la température dans une chambre.

Le système étudié est composé par un système de chauffage et un capteur de température. Les

seuils inférieur et supérieur du thermostat sont fixés à des valeurs θ_m et θ_M

respectivement tel que : θ_m

Le système de chauffage est en *marche* tant que la température dans la chambre est inférieure au seuil θ_M . Le chauffage est arrêté lorsque le capteur détecte le seuil supérieur θ_M et il reste en *arrêt* jusqu'au moment où la température chute au dessous du seuil inférieur θ_m .

La température de la chambre et le thermostat peuvent être vus comme un système dynamique hybride (SDH) dont l'*évolution continue* est définie par la variation de la température x dans la chambre et l'*évolution discrète* par le passage de l'*état marche* du système de chauffage à l'*état arrêt*.

Considérons que l'évolution de la température dans la chambre peut être modélisée par les équations différentielles suivantes :

$$x = \begin{cases} f1(\dot{x}) = -x + a \\ f2(x) = -x \end{cases} \quad (1.2)$$

Où $\alpha \in \mathbb{R}^+$ est une constante réelle positive.

D'une manière graphique le système considéré peut être représenté par un graphe orienté présenté dans la figure 1.3, les sommets du graphe correspondent aux dynamiques continues des états discrets du système. Notamment, la dynamique $f1$ est associé au sommet modélisant l'état en *marche* du système de chauffage, et $f2$ au sommet modélisant l'état d'*arrêt*. Le passage d'un état vers l'autre est modélisé par des arcs étiquetés. (Cette représentation graphique est un automate hybride qu'en verra vu dans le chapitre suivant).

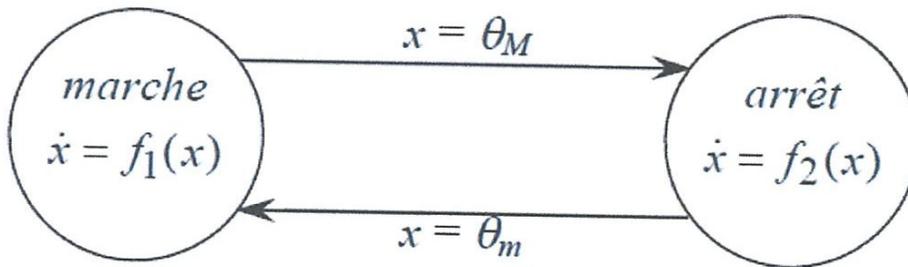


Figure 1.3. Modèle du thermostat.

Le problème de l'analyse consiste à vérifier que la température dans la chambre reste toujours dans l'intervalle désiré, notamment : $\theta_m \leq x \leq \theta_M$.

Pour cet exemple simple, les solutions analytiques des équations différentielles peuvent être facilement trouvées. Ainsi, pour une valeur initiale de la température $x_0 = x(0) = \theta_0$.

Les solutions analytiques trouvées sont :

$$x(t) = \theta_0 e^{-t} + \alpha(1 - e^{-t}) \quad (1.3)$$

Pour la dynamique correspondant à l'état de marche du système de chauffage, et

$$x(t) = \theta_0 e^{-t} \quad \text{pour l'autre état.}$$

Initialement, supposons que le système est dans l'état en *marche* et la valeur initiale de la

$$\text{température vérifie la relation } \theta_0 \in [\theta_m, \theta_M]$$

Dans cet état, l'évolution de la température respectera l'expression :

$$x(t) = \theta_0 e^{-t} + \alpha(1 - e^{-t}) \quad (1.4)$$

L'évolution croissante fait que, au bout de t_1 unité de temps, le seuil θ_M est atteint. Alors, le système de chauffage passera dans l'état *arrêt*. Suite au changement d'état du système, la dynamique de la température change et la nouvelle évolution est donnée par :

$$x(t) = \theta_0 e^{-(t+t_1)} \quad (1.5)$$

Dans cet état, la température aura une évolution décroissante jusqu'au moment où le seuil inférieur θ_m est atteint. A cet instant, le chauffage sera remis en *marche* et le système reviendra dans l'état initial.

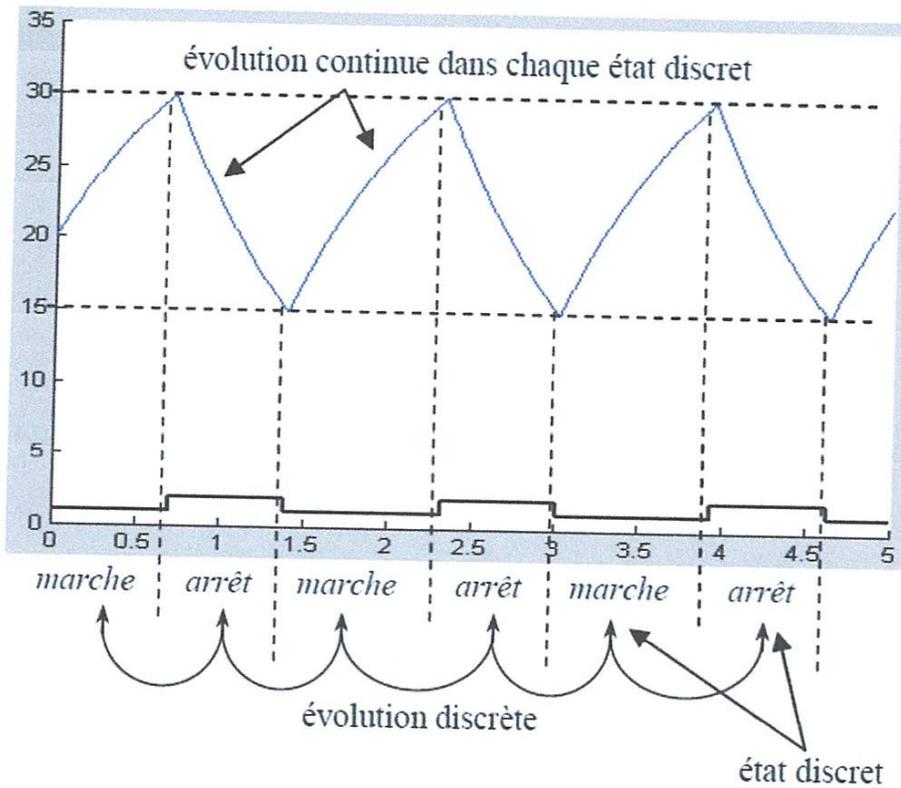


Figure 1.4 Trajectoire de la température.

D'après l'allure de la température (figure 1.4), on constate clairement que ce système représente un *système dynamique hybride*, il comporte deux types d'évolution, une évolution continue et une évolution discrète (changement d'état discret) interagissant entre eux.

1.6. Conclusion :

Les systèmes dynamiques hybrides sont des systèmes qui combinent une partie discrète et une partie continue. Récemment, ces systèmes ont reçu beaucoup d'attention et plusieurs formalismes ont été proposés afin d'établir un modèle permettant la modélisation de l'interaction entre les parties discrètes et continues.

Dans ce chapitre, nous avons vu plusieurs définitions des systèmes dynamiques hybrides (SDH) avec un exemple illustratif.

2.1. Introduction :

Comme énoncé dans l'introduction de ce chapitre, les différentes approches pour modéliser les SDH se classent en trois grandes parties. Les deux premières (issues des extensions des modèles des systèmes à dynamique continue et à événements discrets) ont été brièvement abordées dans les parties précédentes. Il convient maintenant d'aborder la troisième partie à savoir les approches mixtes.

2.2. Une structure des SDH :

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

Ci-dessous, ces deux composantes seront traitées séparément dans le but de faire apparaître les spécificités d'un système dynamique hybride.

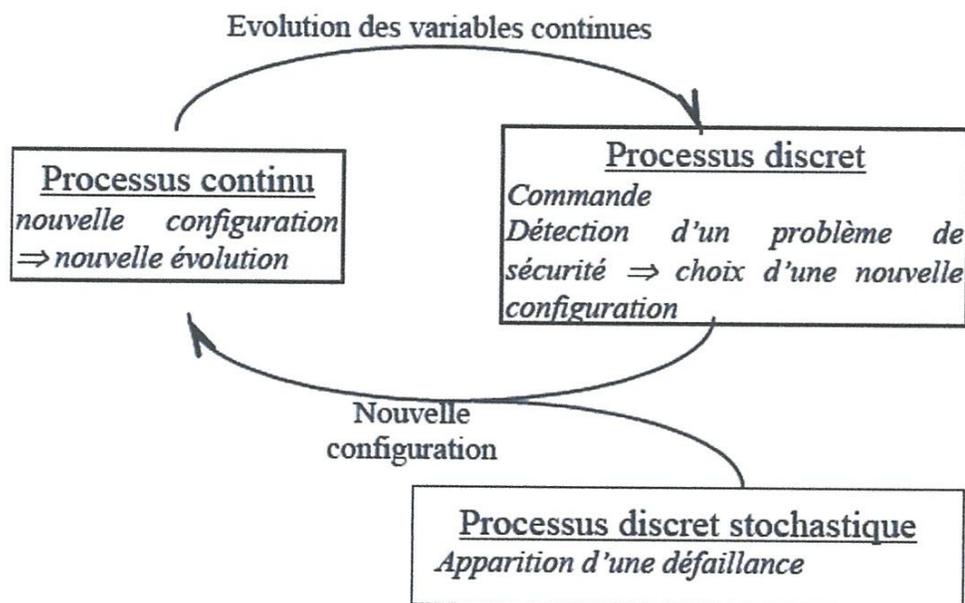


Figure 2.1 : l'inter réaction entre le discret et le continu

2.2.1. Le procédé :

Les systèmes dynamiques hybrides sont des systèmes dont le comportement dynamique est défini par l'interaction entre ses dynamiques continues et discrètes. Par conséquent, le procédé lui aussi possédera les deux aspects : l'aspect continu et l'aspect discret.

a) Aspects continus :

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 :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (2.1)$$

Où $u(t)$ représente le vecteur d'entrées et $x(t)$ est le vecteur des variables d'état. D'autres types de modèles peuvent être obtenus dans des situations particulières. Par exemple, si la modélisation est basée sur des modèles des sous-systèmes du système initial, les équations résultantes sont souvent de type algèbro-différentielles.

Le modèle présenté par la relation 2.1 est assez général et l'analyse de ses propriétés doit être réalisée en temps continu. Pourtant, dans les applications de commande des procédés que l'on peut rencontrer dans la nature, des modèles plus simples peuvent être pertinents, tout dépend de la manière dont on génère l'entrée de commande. Par exemple, c'est le cas des systèmes où l'entrée de commande est contrainte d'être linéaire par morceaux. Ainsi, la dynamique continue sera décrite par un ensemble d'équations différentielles simples (ou aux différences) au lieu des représentations, souvent non linéaires, complexes.

Par exemple, dans le cas des procédés batch il est naturel de spécifier des procédures globales contenant un nombre de phases du procédé. Chacune de ces phases détermine une évolution simple des variables observées. Dans ce contexte, les modèles décrivant le comportement du procédé seront de type :

$$\dot{x}(t) = r_k \quad t_k \leq t < t_{k+1} \quad (2.2)$$

Où r_k donne la variation de la variable x dans une phase du procédé et t_k donne les instants aux quels les commutations entre les phases du système ont lieu.

b) Aspects discrets :

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

Dans les systèmes hybrides ces changements peuvent être déterminés soit par une structure particulière du procédé physique, soit par des entrées/sorties discrètes générées par différentes composantes du système.

2.2.2. Les Changements de dynamique continue dus à la structure du système :

Dans le cas des systèmes réels, les variables d'état \dot{x} (Relation 2.1) 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 2.1 :

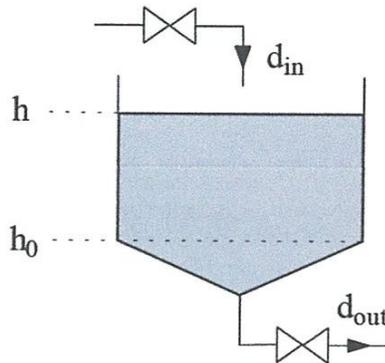


Fig. 2.1 – Exemple d'une structure physique particulière.

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 :

$$S\dot{h}(t) = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.3)$$

Où :

Q_{in} et Q_{out} représentent les débits d'entrée et de sortie respectivement.

h et 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 décrit

$$S \left(\frac{h(t)}{h_0} \right)^2 \dot{h}(t) = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.4)$$

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 le 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.

2.2.3. Changements de dynamique continue générés par des entrées discrètes :

Les éléments fréquemment utilisés dans les systèmes réels qui peuvent introduire des discontinuités dans leur fonctionnement sont les actionneurs discrets (par exemple, les vannes avec leurs états correspondants : ouvert ou fermé). En général, ce sont des éléments auxquels sont associées des fonctions de contrôle du système (par exemple, 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.

Dans les cas précédents, les événements ont été introduits pour modéliser les changements de la dynamique continue du système. Ici, les événements sont utilisés pour modéliser 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.

2.2.4. Les spécifications de fonctionnement :

En général, 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 faites.

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 et les spécifications correspondant à la partie discrète du système.

2.3. La Modélisation des systèmes hybrides:

La modélisation : il s'agit d'avoir recours à une approche système structurant les différents objets en tenant compte du sens physique et de la causalité de leurs interactions.

2.3. 1. Approches de modélisation :

De façon générale, un système hybride sera modélisé par un ensemble de systèmes à dynamique continue interagissant avec un ou plusieurs systèmes à événements discrets. Il y a en général trois classes principales des approches de modélisation des systèmes dynamiques hybrides (SDH) : l'approche continue, l'approche événementielle et l'approche mixte [6].

a) L'approche continue :

Elle s'agit 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 événements discrets.

b) L'approche évènementielle :

Contrairement à l'approche continue, cette approche est purement discrète, elle consiste à 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 évènementielle 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.

c) L'approche mixte :

Dans les sections précédentes, des approches d'intégration des aspects hybrides dans des modèles continus ou évènementiels. Cependant, dans la structure de ces modèles l'interaction entre la partie continue et évènementielle n'est pas représentée explicitement.

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 [7] 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 [8], et enfin les différents extensions des réseaux de Pétri [9], [10].

2.4. Les Outils de modélisation :

Nous avons soulevé, dans le paragraphe précédent, les limites des méthodes classiques de sûreté de fonctionnement. Nous avons également souligné la nécessité d'utiliser

des méthodes plus adaptées à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques hybrides tels les modèles états transitions. Ces modèles englobent les graphes d'états (graphes de Markov et automates) et les approches basées sur le formalisme des réseaux de Petri.

Nous présentons ici un ensemble de méthodes de modélisation que nous avons classées selon deux points de vue : les méthodes qui permettent de décrire les aspects dysfonctionnels (les défaillances et les réparations) et le comportement du système en présence de dysfonctionnements, et les méthodes qui permettent la description comportementale des systèmes dynamiques hybrides. La séparation entre ces deux aspects (le comportemental et le dysfonctionnel) est, selon nous, le plus grand handicap qui se dresse contre l'efficacité des méthodes SdF classiques concernant les problèmes relevant de la fiabilité dynamique. En effet, ces deux aspects doivent être intégrés au sein d'un même modèle de fiabilité respectant leur interaction mutuelle.

La modélisation des Systèmes Dynamiques Hybrides peut être effectuée à l'aide de divers formalismes, parmi lesquels nous pouvons citer :

2.4.1. Les statecharts hybrides :

Les statecharts hybrides, qui constituent une extension des statecharts, associent un ensemble d'équations différentielles aux états. Cette représentation renforce la puissance du modèle liée à la structuration des modèles : en effet, l'utilisation de la hiérarchie des états permet de structurer la partie événementielle et l'association d'équations aux états permet de structurer les relations entre les grandeurs continues.

2.4.2. Réseaux de Pétri Mixtes :

L'approche basée sur les réseaux de Pétri mixtes (RdPM) [17] consiste à interpréter les RdP par des équations différentielles.

Un RdP mixte est constitué [1], d'un ensemble de RdP interprétés [21] synchronisés par des événements internes. Dans cette représentation, la place peut être interprétée soit comme une activité (un système algebro-différentiel lui est alors associé et le nombre de jetons qu'elle peut accepter est limité à un, afin de garantir la cohérence du modèle), soit comme une condition logique, une ressource disponible ou l'état d'un stock (aucune équation ne lui est attribuée et le nombre de jetons est illimité) Cette approche a notamment été utilisée dans le cadre de l'ordonnancement. Un cas industriel est traité dans [19] et présente un outil d'aide à l'ordonnancement d'ateliers batchs à production continue. De même, [20] utilise les RdP mixtes pour modéliser une unité de stockage de gaz. Cependant, notons que l'inconvénient

2.5 Conclusion:

Le domaine des systèmes hybride est un domaine large et ouvert de par sa nature, il s'imprègne des résultats issus de l'automatique des systèmes continus et de celle des problèmes liés à la complexité des systèmes à commander, l'applications de la théorie des SDH aux outils et moyens de conduite opérationnels disponible dans le monde industriel permettra d'améliorer la sûreté, les performances et les technique de développement de systèmes réels.

Les approches qu'ont été développées pour la modélisation se distinguent par l'importance qu'elles accordent à la dynamique continue ou événementielle des SDH, et par les domaines d'application visés, cependant, le choix d'un cadre global de développement des SDH implique un compromis entre deux critères conflictuels qui sont : la puissance de modélisation et la puissance de décision.

Aussi, la technique majeure de validation des modèles hybrides complexes reste, à l'heure actuelle, la simulation. En effet, plusieurs méthodes/outils de simulation ont été développés et appliqués dans des laboratoires de recherche, mais également en milieu industriel.



Chapitre 3

3.1 Introduction

3.2. Définition d'un mode

3.3 Simulation d'un système hybride par stateflow

3.4. Cas d'étude

3.4.1. Présentation

3.4.2. Modélisation

a. Aspects discrets

b. Aspects continus

c. Expressions des débits

3.5. Simulation du modèle hybride

a. Simulation du système physique (bloc continu)

b. Les équations des réservoirs

c. Les équations des électrovannes

3.6. Conclusion

3.1 Introduction

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 ».

3.2. 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 3.1:

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 3.2:

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.

✚ Définition 3.3 :

L'état hybride du système hybride à un instant est défini par le couple (mode q , état continu x) = $(q_i, x_i(t))$.

3.3 Simulation d'un système hybride par stateflow

Les ensembles industriels sont bien souvent des systèmes hybrides dans lesquels un automate supervise et coordonne le fonctionnement d'un plusieurs ensembles continus ou éventuellement échantillonnés.

📖 Généralité sur stateflow

Stateflow est destiné à la représentation des systèmes discrets et à la simulation de leur fonctionnement, il communique parfaitement avec simulink dont il renforce la capacité de prise en compte des séquences logiques que les blocs conditionnels avaient commencé à introduire. D'ailleurs, le bloc stateflow n'est autre qu'un bloc de simulink masqué.

Etat de fonctionnement normal :

$$\begin{cases} \frac{dh1}{dt} = \frac{1}{s} (Qp1 - Qs1) \\ \frac{dh2}{dt} = \frac{1}{s} (Qp2 - Qs2) \\ \frac{dh3}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Lors de la défaillance des électrovannes V_1, V_2 des réservoirs 1 ou 2 et l'utilisation de l'EV de secours V_3 pour la vidange des deux réservoirs les équations sont :

L'électrovanne de secours ne peut être utilisée que par un seul réservoir a la fois donc les équations est exprimé de la manière suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dh1}{dt} = \frac{1}{s} (Qp1 - Qs1 - Q31) \\ \frac{dh2}{dt} = \frac{1}{s} (Qp2 - Qs2 - Q32) \\ \frac{dh3}{dt} = \frac{1}{s} (Q3) \end{cases} \quad (3.3)$$

Nous considérons les débits d'entré 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 EV_1, EV_2, EV_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 :

$$\begin{cases} Q1(t) = A\sqrt{2g \cdot h1(t)} \\ Q2(t) = A\sqrt{2g \cdot h2(t)} \\ Q3(t) = A\sqrt{2g \cdot h3(t)} \end{cases} \quad (3.4)$$

- Les équations des débits deviennent :

$$\begin{cases} Q1(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h1} \\ Q2(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h2} \\ Q3(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h3} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.5. Simulation du modèle hybride:

La simulation du cas d'étude est faite dans la plate forme (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 pompe 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 :

$$Q_{p_i} = Q_p \cdot U_p \quad (i=1,2) \quad (3.6)$$

b. Les équations des réservoirs :

Les deux réservoirs sont identiques et sont décrit par les équations (3.1)

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 ($i=1, 2, 3$)

$$\begin{cases} Q1(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h1} \cdot U1 \\ Q2(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h2} \cdot U2 \\ Q3(t) = A\sqrt{2g} \cdot \sqrt{h3} \cdot U3 \end{cases} \quad (3.7)$$

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:

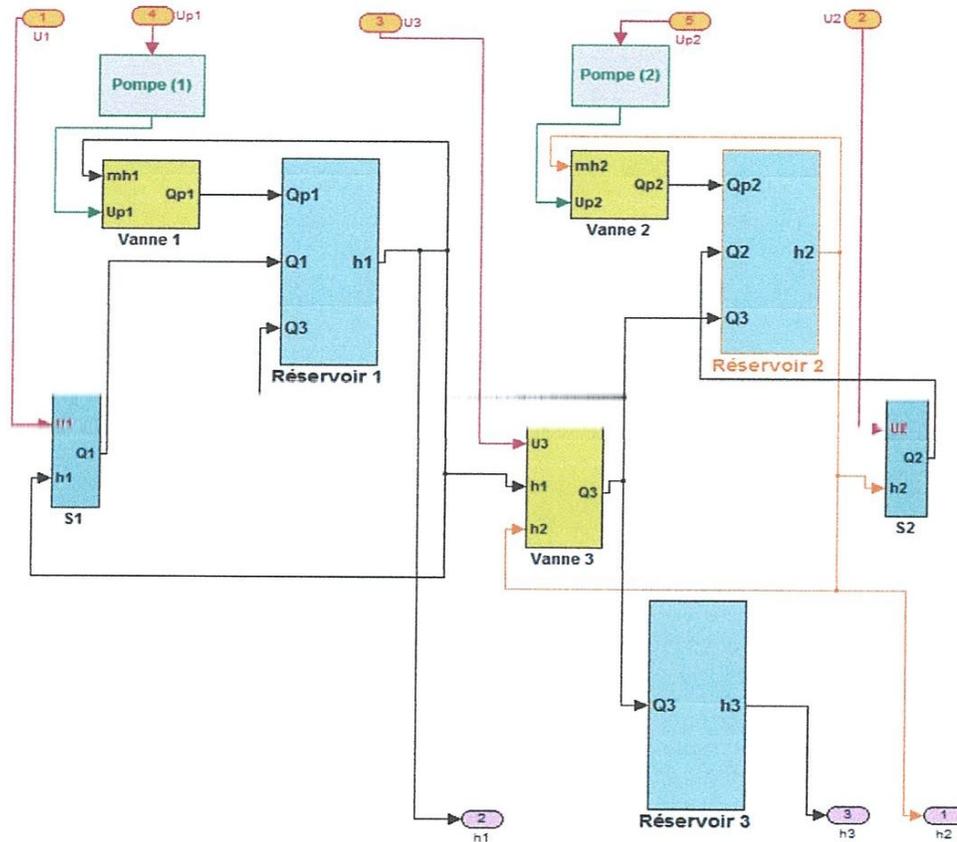


Figure 3.4: le schéma interne du bloc physique du système.

✚ 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 (Fig.3.3) est basé sur le comportement discret des électrovannes et des pompes:

- Le signal u_i 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 u_i 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 u_i est carré d'amplitude égale à 1 si l'électrovanne ou s'**ouvre**, se **ferme** et sa **marche** ou s'**arrête** respectivement dans le temps.

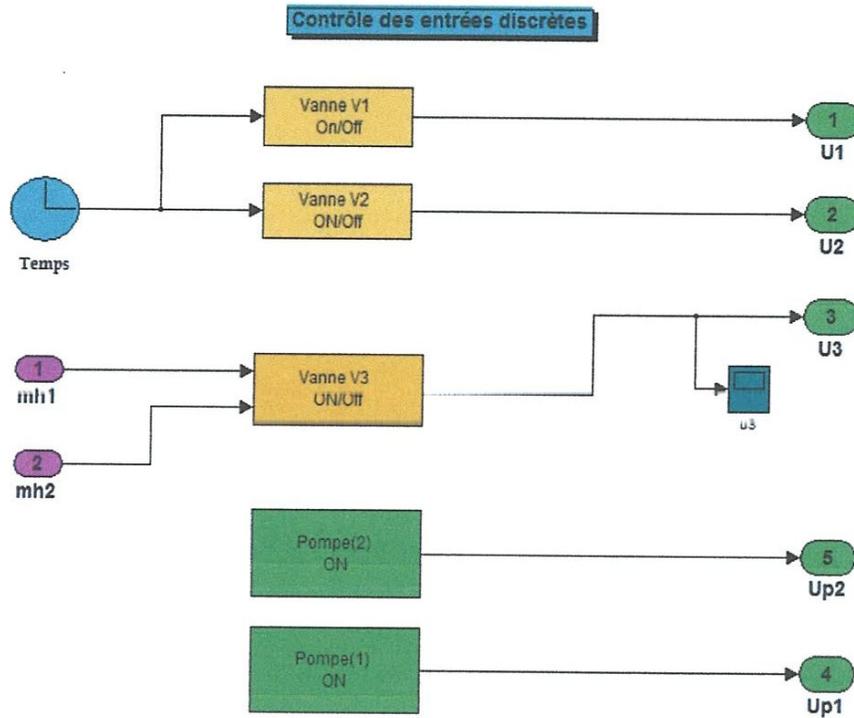


Figure 3.5. Le schéma bloc de calculateur.

✚ 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.

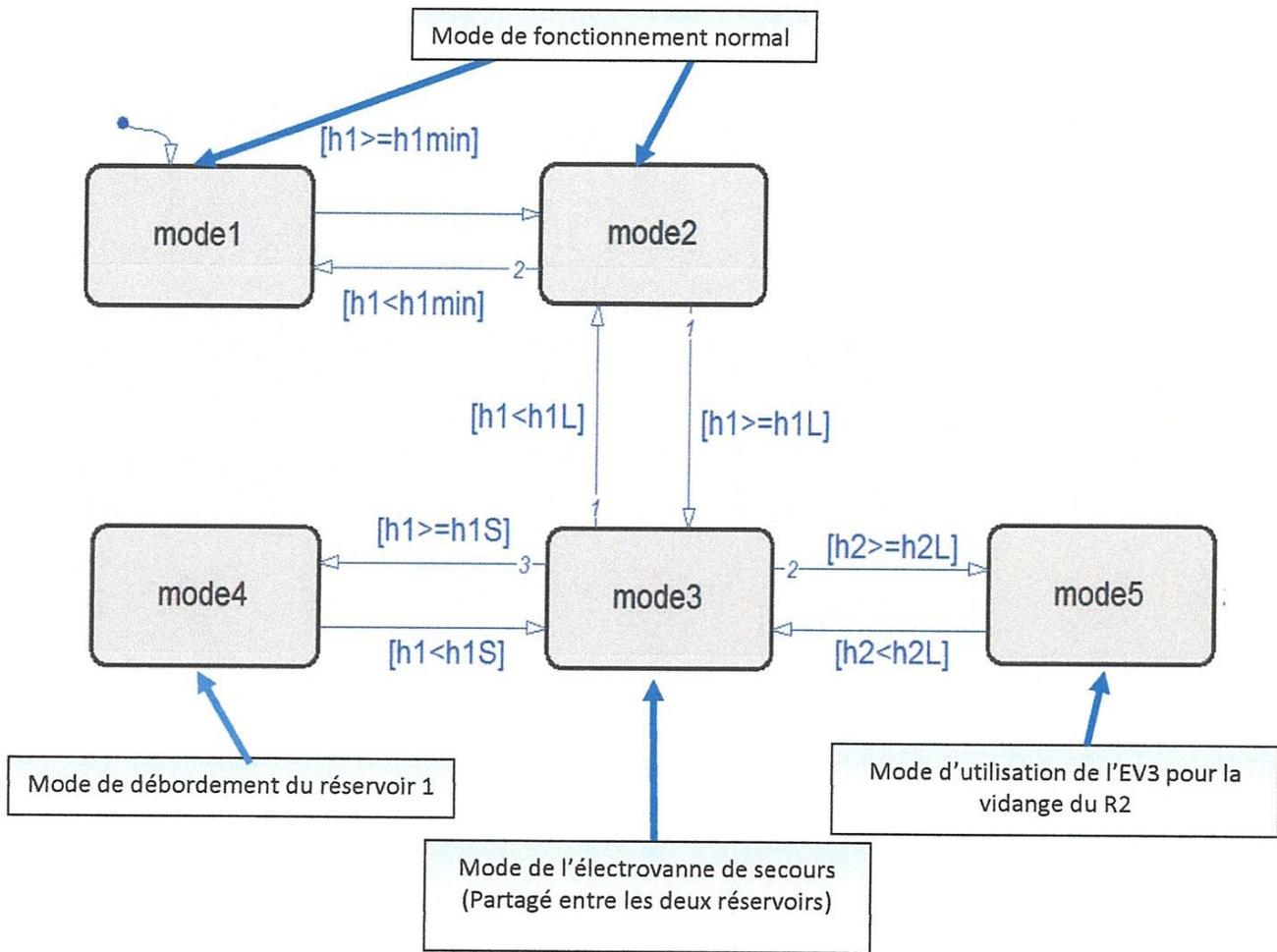


Fig3.6. Schéma interne de l'automate hybride

Le modèle hybride global comportant les deux blocs (aspect continu/aspect discret), modélisant le système physique et représenté par la figure suivante (Fig 3.7):

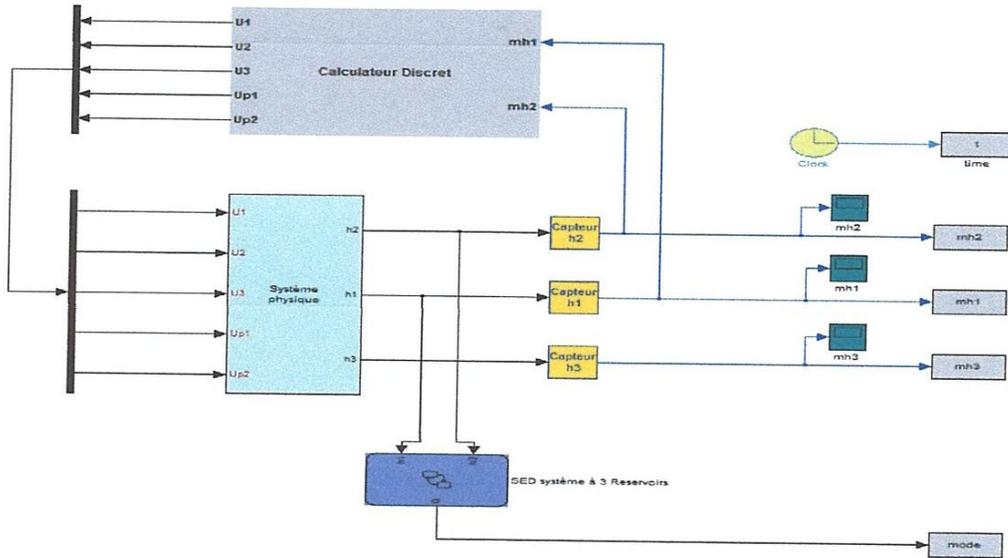


Figure 3.7 : Schéma de simulation du système.

Après l'exécution on trouve les résultats suivants:

Les niveaux h_1 et h_2 simulés sont donnés par la figure (Figure.3.8):

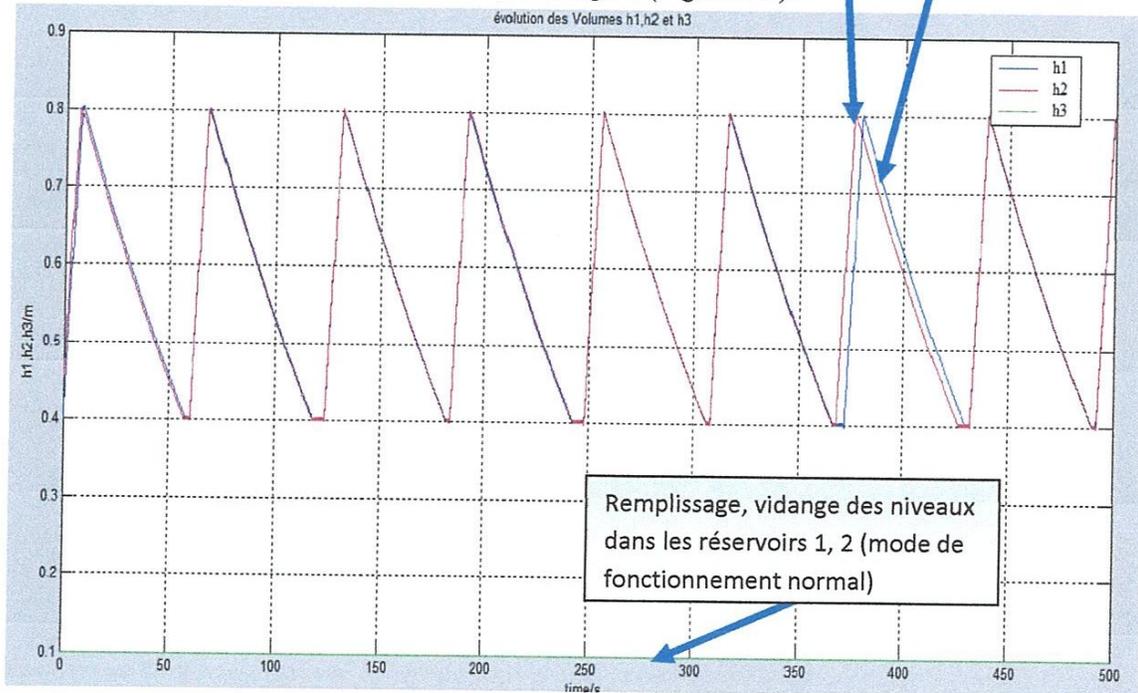


Figure 3.8. Evolution du volume dans R1 et R2 et R3.

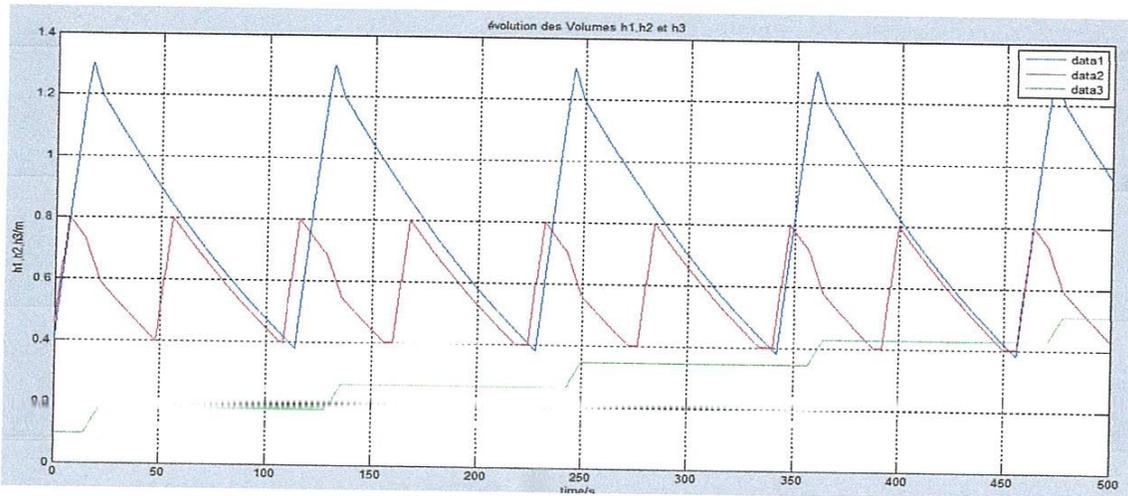


Fig 3.10: évolution du volume dans les réservoirs 1, 2 et 3 (V_1 bloqué en ouverture et V_2 en bon fonctionnement, V_3 en bon fonctionnement).

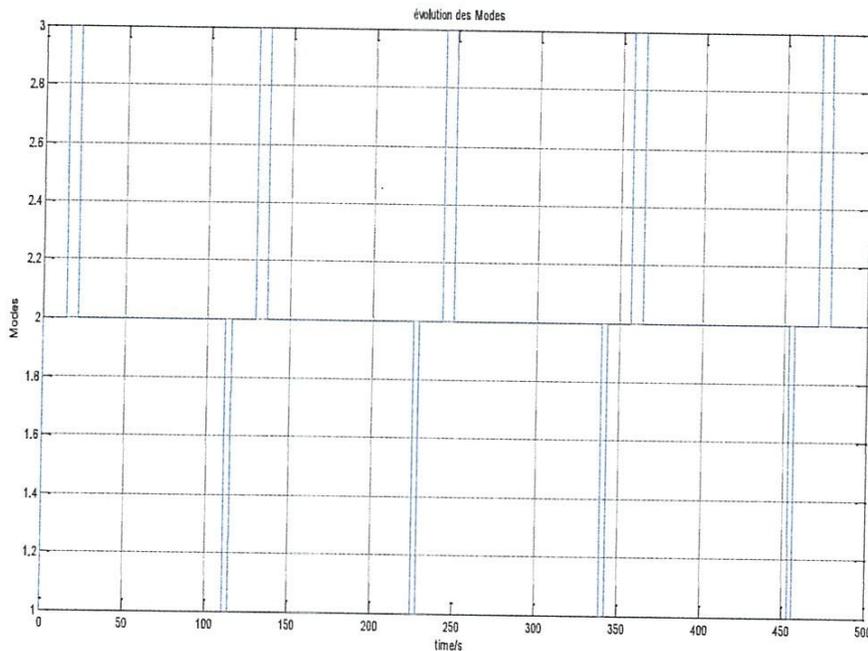


Fig 3.11: les modes (V_1 bloqué en ouverture et V_2 en bon fonctionnement, V_3 bon fonctionnement).

D'après les figure 3.10 et figure 3.11 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'EV₂ et en bon fonctionnement.

Cas de la défaillance de EV_1 , et la défaillance de EV_2 , on trouve les résultats suivant:

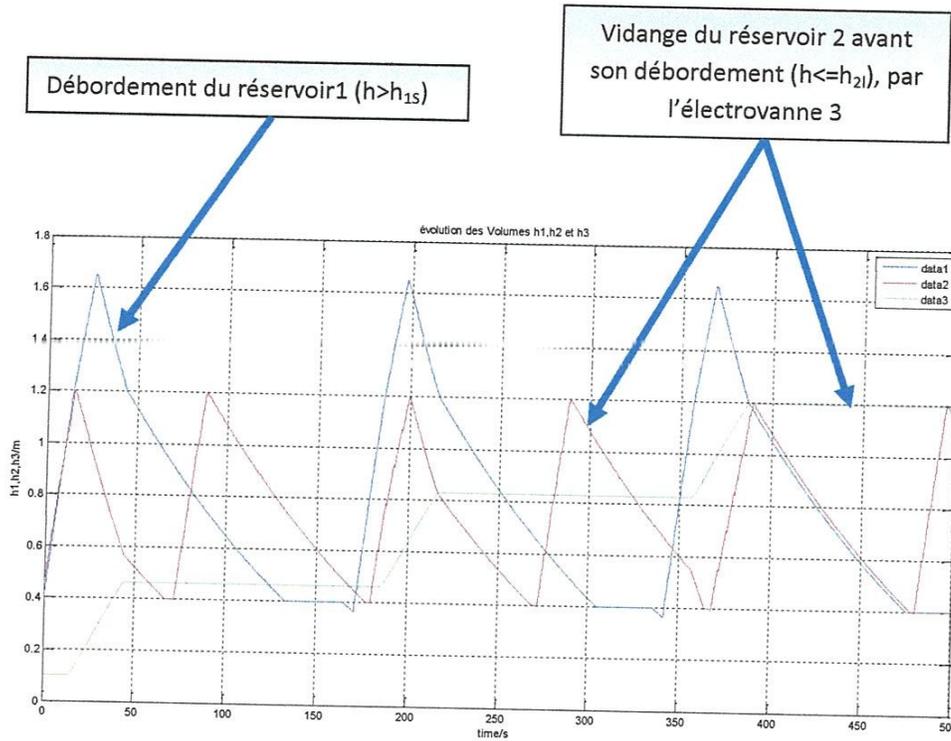


Fig 3.12: évolution du volume dans les réservoirs R1, R2, et R3 cas de débordement.

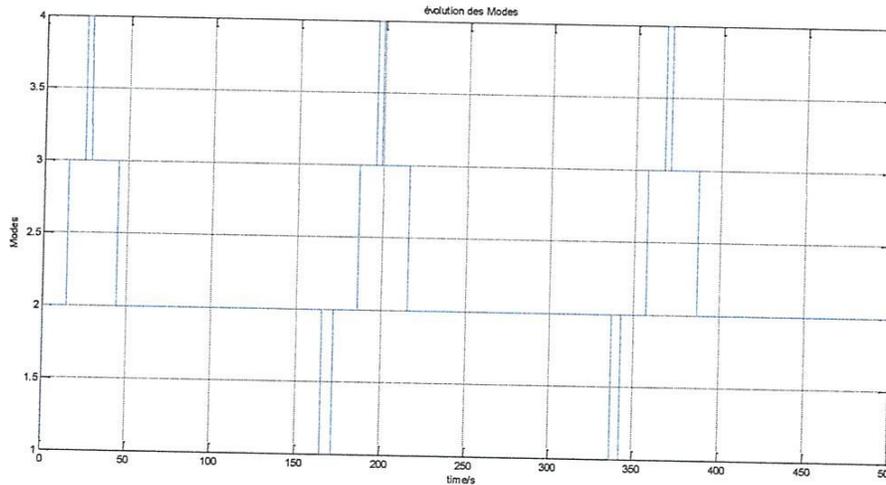


Fig. 3.13: les modes pour le cas de débordement.

D'après ces figure on remarque bien que l'électrovanne de secours est occupé a vidangé le réservoir 2 avant son débordement ($V \leq V_{12}$), mais le volume dans le réservoir 1 continue de croitre est atteint la valeur $V > V_{1s}$, qui est l'événement de débordement du réservoir 1, a cause de

Chapitre3 Modélisation d'un système hybride'' Système à deux réservoirs ''

la défaillance de l'électrovanne 1 et la défaillance de l'électrovanne 2 et l'occupation de l'électrovanne de secours pour la vidange du réservoir 2 (Fig 3.12, Fig 3.13).

3.6. Conclusion

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 des défaillances du système et d'analyser l'évolution de l'état continu et discret du système réel.

Donc les automates hybrides permettent de décrire le fonctionnement réel du système physique et d'analyser les modes de défaillance sur le même plan de modélisation (évolution continu et discret).



Conclusion générale

Ce travail est dédié à la modélisation des systèmes dynamiques hybrides, à savoir les types de modélisations. Dans un premier temps nous avons défini les systèmes dynamiques hybrides et une classe particulière des systèmes complexes qu'est la classe des systèmes dynamiques hybrides (SDH).

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.

Dans un second temps nous avons cité les deux principales classes des systèmes hybrides présentées dans: les SDH à commutation autonome "Switching", et les SDH à commutation contrôlée. Et pour éclaircir ces notions on a cité des exemples.

Dans le deuxième chapitre le travail se centre sur les modèles et les outils de simulation couramment rencontrés dans le domaine des systèmes dynamiques hybrides. Dans ce cadre, il était important, de répertorier les propriétés permettant de les caractériser. Les modèles se définissent en termes de modularité, de causalité, de représentation explicite rigoureuse des composantes continues et discrètes, de capacités à gérer la structure variable du système algèbro-différentiel global.

Les outils de simulation sont caractérisés par le caractère modulaire ou global de la simulation, nous avons complété l'étude des systèmes dynamiques hybrides (SDH), et plus précisément l'étude des automates hybrides comme un outil graphique de modélisation des SDH. On a vu que l'automate hybride est une extension de l'automate discret en associant une évolution continue à chaque état discret.

On conclut donc que les automates hybrides utilisés pour la modélisation des systèmes dynamiques hybrides et en même temps pour la surveillance et la détection de défaut par l'aspect discret et l'aspect continu qui est le caractère important des automates hybrides.

Nous avons donc poursuivi ce travail sur des cas plus significatifs et d'aborder certains aspects qui n'ont pas été traités.

Bibliographie

- [1] Zaytoon J., Systèmes Dynamiques Hybrides, Traité Systèmes automatisés, Information Commande et Communication, Hermes, Paris, 2001.
- [2] Quenec'hdu Y. et Zaytoon J., Sur la modélisation des systèmes hybrides, Systèmes Dynamiques Hybrides, Traité Systèmes automatisés, Information commande et communication, 87–92, Hermes, Paris, 2001.
- [3] Tanyi E. et Linkens D., A G2 based Hybrid Modeling and simulation strategy and its Application to a Rolling Mill, Control Engineering Practice, London, 1998.
- [4] Nkenlifack M., Modélisation objet et développement d'un atelier de simulation des automatismes industriels hybrides, Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique (Université de Yaoundé 1), Cameroun, 2004.
- [5] Monika Kurovsky , étude des systèmes dynamiques hybrides par Représentation d'état discrète et automate hybride, 'Electronique, 'Electrotechnique, Automatique, Télécommunication et Signal_ , Grenoble 2002
- [6] P.Antsaklis and X. Koutsoukos, "On hybrid control of complex systems : a survey", Symposium ADPM'98, Reims, France, 1998.

- [7] A.Alur, C. Courcoubetis, T.A. Henzinger, and P.H. Ho, "Hybrid automata : an algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems", In Hybrid Systems, LNCS, 736 : 209-229, 1993.

- [8] Y. Kesten and A. Pnueli, "Timed and hybrid statecharts and their textual representation", formal techniques in real-time and fault-tolerant systems, LNCS, 571 : 591-620, 1992.

- [9] J. Le Bail, H. Alla and R. David, "Hybrid Petri nets", In Proceedings of the European Control Conference, Grenoble, France, pages : 1472-1477, 1991.

- [10] 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.

- [11] 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.

Modélisation d'un système dynamique hybride par

- [12] Alur R., Dill D.L., A theory of timed automata, *Theoretical Computer Science*, 126 (2), pp 183-225, 1994
- [13] T.A. Henzinger. The theory of hybrid automata. *Proceedings of the 11th Annual Symposium on Logic in Computer Science, LNCS*, pages 278–292, 1996.
- [14] Champagnat R., Supervision des systemes discontinus : definition d'un modele hybride et pilotage en temps reel, These de Doctorat, LAAS Toulouse, France, 1998.
- [15] Albuquerque J., Gopal V., Staus G., Biegler L., Ydstie B., Interior point SQP strategies for large scale structured process optimization problems, *Computers and Chemical Engineering*, 23 , pp 543-554, 1999.
- [16] D. Arzelier Notes de cours version 5.2 " Représentation et analyse des systèmes Linéaires " LAAS-CNRS 07 Avenue du colonel Roche,2004
- [17] Sihem Kechida , " Synthèse des générateurs de résidus robustes pour la détection des défauts " thèse doctorat université badji mokhtar , Annaba soutenus publiquement en 2007.
- [18] Valentin-Roubinet C., Hybrid Systems modeling : mixed Petri nets, 3rd IMACS/IEEE conference CSCC99, pp 223-228, Athenes Grece, 1999.
- [19] Pages A., Pingaud H., An hybrid process model based on Petri nets applied to short term scheduling of batch-semi continuous plants, *Proceeding of the Workshop on analysis and design of event-driven operations in process systems (ADEDOPS)*, Imperial College, London, UK, 1995
- [20] Valentin-Roubinet C., Modelling of hybrid systems: DAE supervised by Petri nets, the example of a gas storage, *Automation of mixed Processes (ADPM98)*, pp 142-149, Reims France, 1998
- [21] Alur R., Dill D.L., A theory of timed automata, *Theoretical Computer Science*, 126 (2), pp 183-225, 1994.