



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Génie Industriel

Thème

**Modélisation et Commande des Systèmes à
Évènements Discrets : Application à une ligne
de Production de semoule.**

Présenté et soutenu publiquement par :

MESSABIH ali

RAHMANI benamar adel

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. Aziz ADJLOUA	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Président
Mr. Abderrahim BENFEKIR	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadreur
Mr. Taha BENARBIA	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Examineur

octobre 2021

Dédicaces

**JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :
À MES CHERS PARENTS QUI ONT CONTRIBUÉS À MA RÉUSSITE ET
M'ONT ENCOURAGÉ
À MA CHÈRE FEMME MADAME MESSABIH IMENE
QUI M'A TOUJOURS ENCOURAGÉ
A MON AMI BOUAMRENE BELEBNA ALLAH YARAHMAH**

**À MON BINÔME ADEL
ET À TOUS CEUX QUI ONT JOUÉ UN RÔLE DANS MON SOUTIEN AU
COURS DE MES ÉTUDES, TANT MATÉRIELLEMENT QUE
MORALEMENT.**

ALI

Dédicaces

**JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :
À MES CHERS PARENTS QUI ONT CONTRIBUÉS À MA RÉUSSITE ET
M'ONT ENCOURAGÉ**

**AUX MES FRÈRES KHALIL, ISMAIL
À MON BINOME ALI**

**ET À TOUS CEUX QUI ONT JOUÉ UN RÔLE DANS MON SOUTIEN
AU COURS DE MES ÉTUDES, TANT MATÉRIELLEMENT QUE
MORALEMENT.**

ADEL

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Remerciements

AVANT TOUT, JE REMERCIE DIEU
DE M'AVOIR AIDÉ À ACCOMPLIR CE MODESTE TRAVAIL.
J'EXPRIME MES PROFONDES GRATITUDES À MES PARENTS POUR
LEURS ENCOURAGEMENTS, LEUR SOUTIEN ET POUR LES
SACRIFICES QU'ILS ONT ENDURÉS.
JE VOUDRAIS TÉMOIGNER MA RECONNAISSANCE SINCÈRE À MON
ENCADREUR DR : BENFEKIR POUR SES CONSEILS ET SES
ENCOURAGEMENTS
TOUT AU LONG DE CE PROJET,

JE REMERCIE LES EXAMINATEURS POUR AVOIR ACCEPTÉ
D'EXAMINER CE TRAVAIL ET POUR LEURS PARTICIPATIONS AU
JURY

ENFIN, JE NE SAURAI TERMINER CES REMERCIEMENTS SANS Y
ASSOCIER TOUTE MES RECONNAISSANCES À TOUS MES AMIS ET
COLLÈGUES POUR LE SOUTIEN MORAL ET MATÉRIEL.

Résumé :

Nombreux procédés industriels sont des systèmes dynamiques hybrides (SH) par nature, ce qui signifie que leur comportement résulte de l'évolution et de l'interaction de variables continue et de variables discrètes. Ces systèmes sont classiquement constitués de processus continus interagissant avec (ou régis par) des processus discrets. Les objectifs que l'on peut assigner à l'étude des système dynamique hybride cohérente à apporter une solution en termes de modèle, de méthode de performance et en particulier les fonctions de commande et de surveillance. Nous nous intéressons dans ce travail à la modélisation et à l'analyse des systèmes hybrides à dominante événementielle. L'approche de modélisation est basée sur l'utilisation des réseaux de Petri hybrides (RdPH). La méthode est illustrée sur un exemple industriel : une unité de production de semoule.

Mots-clés : Système automatique, Système dynamique hybride, Systèmes Continus, Systèmes à événements discrets, Modélisation.

SOMMAIRE

Table des matières

Introduction générale..... 10

CHAPITRE 1 : LES SYSTÈMES DYNAMIQUES HYBRIDES

1.1 Introduction : 13

1.2 Systèmes Dynamiques Hybrides : 13

 1.2.1 Systèmes Continus : 13

 1.2.2 Systèmes à événements discrets : 14

 1.2.3 Systèmes Dynamiques Hybrides : 15

1.3 Structure Générique D'un Système Dynamique Hybride : 16

 1.3.1 La Partie Discrète : 16

 1.3.2 La Partie Continue: 16

 1.3.3 L'interface : 16

1.4 Exemples de systèmes dynamiques hybrides : 17

 1.4.1 Systèmes comportant des éléments discrets et continus : 17

 1.4.2 Systèmes continus comportant des discontinuités : 19

 1.4.3 Systèmes Continus Supervisés Par un Contrôleur à événements Discrets : 19

 1.4.4 Systèmes Continus Pour Lesquels Des Dynamiques Discrètes Sont Introduites Par Abstraction : 22

 1.4.5 Systèmes Discrets Pour Lesquels Des Dynamiques Continues Sont Introduites Par Abstraction : 23

1.5 Conclusion : 25

CHAPITRE 2: MODÉLISATION DES SYSTÈMES DYNAMIQUES HYBRIDES

2.1 Introduction : 27

2.2 Structure générique des SDH : 27

 2.2.1 Méthode de fonctionnement 27

 a. Approche discret : 27

 b. Approche continu : 30

 2.2.2 Spécification de fonctionnement : 31

 a. Spécification discrète : 31

 b. Spécification continue : 31

2.3 Conception ou élaboration des SDH : 33

 2.3.1 Approche événementielle : 33

 2.3.2 Approche continue : 33

 2.3.3 Approche mixte : 34

2.4 Les outils de modélisation : 34

SOMMAIRE

2.4.1	Réseaux de Pétri :	34
a.	Réseau de Pétri hybride :	35
b.	Réseau de Petri hybride élémentaire :	36
2.4.2	Automates Hybrides :	38
2.5	Conclusion :	39
CHAPITRE 3: MODÉLISATION DE L'UNITÉ DE PRODUCTION DE SEMOULE PAR RDPH		
3.1	Introduction :	41
3.2	Outil De Modélisation :	42
3.3	Réseau de pétri hybride :	43
3.4	EXEMPLE : LA SEMOULERIE :	46
3.4.1	Description du fonctionnement de la partie mouture :	46
a.	Les brosses SR :	46
b.	Le tarare TR :	46
c.	Les appareils à cylindres RM :	46
d.	Les plansichters SF :	46
e.	Les sasseurs SD :	47
f.	Le détacheur DS :	47
g.	Le vibreur AV :	47
3.4.2	L'enchaînement des différentes étapes de moteur :	47
3.4.3	Modélisation de l'unité de production de semoule :	49
3.5	La Simulation :	50
3.6	Conclusion :	52
Conclusion générale		53
Références Bibliographiques.....		54

Table des figures :

Chapitre1 :

Figure 1.1 : a- Système physique (continu/discret). b- Automate correspondant.	5
Figure 1.2 : Structure du système dynamique hybride.	7
Figure 1.3 : Circuit électrique intrinsèquement hybride.	8
Figure 1.4 : Evolution du courant dans la self.	8
Figure 1.5 : Evolution continue et discrète du SDH.	10
Figure 1.6 : Balle en rebondissement.	11
Figure 1.7 : Circuit électrique intrinsèquement hybride.	11
Figure 1.8 : Evolution du courant dans la self.	12
Figure 1.9 : Système hydraulique.	13
Figure 1.10: Exemple de vanne pneumatique.	13
Figure 1.11 : Architecture générique d'un système de production.	14

Chapitre2 :

Figure 2.1: Exemple d'une structure physique.	19
Figure 2.2: Partie d'un automate hybride.	22
Figure 2.3 : Modèle de thermostat avec spécification de fonctionnement.	23
Figure 2.4 : Exemple de Réseau de Pétri élémentaire.	25
Figure 2.5 : : Exemple de Réseau Hybride élémentaire.	27
Figure 2.6 : Automate hybride.	28

Chapitre3 :

Figure 3.1: (a) Réseaux de Petri hybride (b) Graphe d'évolution RdPH.	35
Figure 3.2 : Schéma synoptique de la semoulerie.	38
Figure 3.3 : Modèle RdPH du fonctionnement de la semoulerie.	38
Figure 3.4 : Modèle de la transformation du produit.	39
Figure 3.5 : les resultats de la simulation du RDPH de la semoulerie.	40

Liste des abréviations

CMC	Compositional Model-Checking
C-Transition	Transition continu
C-place	Place continu
D-place	Place discrète
D-Transition	Transition discrète
F.E.M	Force électromotrice
GCEA	Graphe des classes d'états accessibles
HSML	Hybrid Systems Modeling Language
HSCAP	Hybrid Sequential Causal Assignment Procedure)
HYBRSIM	Hybrid Bond Graph Simulator)
HYSDEL	Hybrid System Description Language)
HYTECH	HYbrid TECHnology
IB-STATE	Invariant Behavior state
PHAVER	Polyhedral Hybrid Automaton Verifier
RdP	Réseau de Petri
RdPH	Réseau de Petri hybride
RdPC	Réseau de Petri continu
RdPCC	Réseau de Petri continu à vitesses constantes
RdPD	Réseaux de Petri différentielles
RdP-EAD	Réseaux de Petri avec équations algébriques différentielles
RFH	Réseaux à flux hybrides
RdPM	Réseau de Petri mixte
RdP –TE	Réseaux de Petri temporel étendu
RdPV	Réseau de Petri continu à vitesses variables.

Introduction générale

L'automatique traite différemment les problèmes de type continu et ceux de type discret. Chacun de ces domaines a créé un ensemble de théories et de méthodes et développé des solutions performantes pour régler les problèmes homogènes qui se posent, mais sans toujours intégrer les solutions et les apports de l'autre domaine.

En effet, les procédés industriels sont complexes. Pour les piloter d'une manière automatique, on utilise les systèmes de contrôle et commande des automates exécutant des programmes séquentiels couplés à des boucles de régulation, mono-variables et parfois multi-variables qui peuvent comporter différents modes de fonctionnement. L'évolution dynamique du système de commande est à la fois continue et événementielle. Le procédé peut lui aussi présenter ce double aspect. C'est le cas des productions batch, dans lesquelles la matière est caractérisée par des variables continues et est traitée étape par étape.

Les systèmes dynamiques hybrides (*SDH*) sont des systèmes pour lesquels les dynamiques discrètes et continues interagissent. Cette interaction détermine le comportement du système. Un système se caractérise par la nature de ses variables d'états, qui peuvent être continues ou discrètes. Le premier type est défini sur l'ensemble des réels \mathbb{R} , alors que le second prend ses valeurs dans un ensemble dénombrable (entier, booléens,...). On rencontre dans la littérature des systèmes hybrides de nature très diverse : systèmes intrinsèquement hybrides, systèmes continus avec commandes discrètes... etc. L'étude de ces systèmes a retenu l'attention de la communauté automatique, ainsi que celle de la communauté informatique. Les objectifs que l'on peut assigner à l'étude des *SDH* consistent à apporter une solution en termes de modèle, de méthode, de performance et de qualité globale à des problèmes mal traités par les approches homogènes. Parmi ceux-ci on peut citer les problèmes générés par des discontinuités du fonctionnement des machines-outils, la modélisation des phénomènes transitoires rapides par une commutation des modèles. Pour apporter une solution à ces problèmes, la recherche sur les *SDH* est concentrée autour de trois axes : la modélisation, l'analyse et la commande.

Le rapport donc est organisé en trois chapitres, comme suit :

Dans le **premier chapitre**, nous introduisons les notions fondamentales relatives aux systèmes dynamiques hybrides. Leur définition ainsi leurs différentes classes et phénomènes hybrides trouvé en littérature sont présentés. Nous passons en revue les principaux formalismes de modélisation des systèmes hybrides.

Le **deuxième chapitre** est constitué d'une étude bibliographique sur les systèmes dynamiques hybrides. L'objectif est de positionner notre travail par rapport aux approches existant dans la littérature.

Le **troisième chapitre** est dédié à la modélisation de l'unité de semoule par un Réseau de Pétri hybride.

Nous achevons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives de continuation de ce travail.

Chapitre 1

Les systèmes dynamiques hybrides

1.1 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.

1.2 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.

1.2.1 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 : $SC = (T, X, X_0, U, \Phi)$ [1]:

- $T \in \mathcal{R}$ 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,
- Φ le vecteur champ déduit par l'équation différentielle de la forme

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

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

1.2.2 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.

Définition 2.

Formellement, un système à événement discret est composé d'un 5-tuple :

$$SED = (T, Q, Q_0, U, \Phi) [1]$$

- $T \in \mathcal{N}$ 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 : Considérons un bac qui peut être rempli et vidé (figure (1.1.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 :

$$\dot{h} = d_1 - d_2 \cdot a \quad (1.1)$$

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 (1.1 .b)).

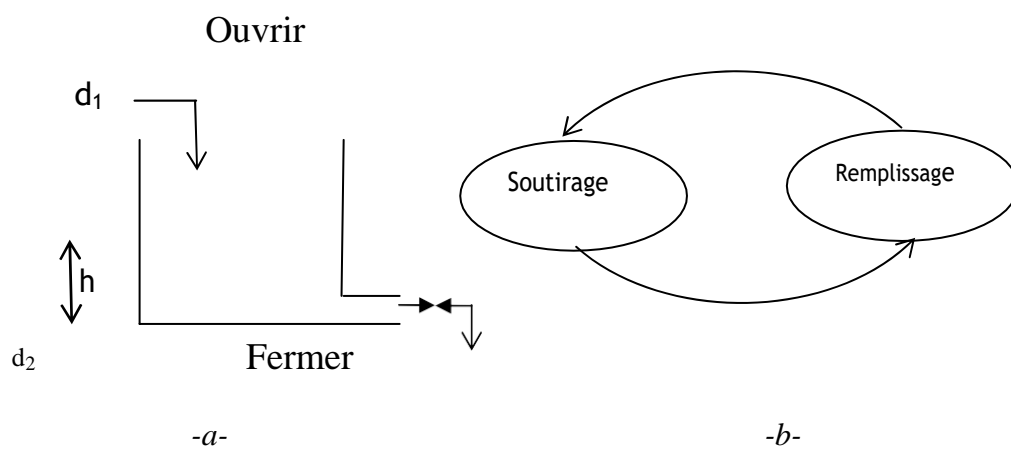


Figure 1.1. a- Système physique (continu/discret). b- Automate correspondant.

1.2.3 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 :

$SDH = (T, (x, q), (x_0, q_0), U_c \cup U_d, \Phi)$ [1]:

- $T \in \mathcal{R}$ 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.

1.3 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 (1.10)) [2].

1.3.1 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 [3], les réseaux de Petri [4] et les Statecharts [5].

1.3.2 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 :

$$Y(t) = \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), z(t)) \\ h(t) = (x(t), z(t)) \end{cases} \quad (1.2)$$

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.

1.3.3 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.

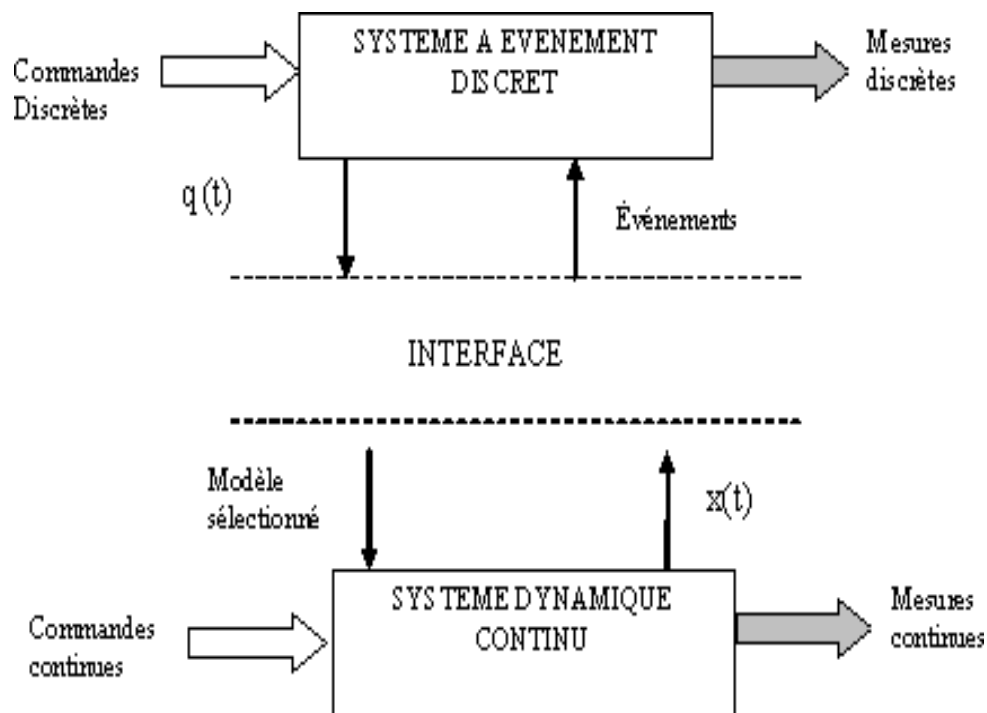


Figure 1.2. Structure du système dynamique hybride.

1.4 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.

1.4.1 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 : Circuit électrique

Le système illustré par la figure (1.4) est composé d'une source de courant, d'une diode D , d'une résistance R_I , d'un interrupteur Sw , et d'une self L [6]. Quand l'interrupteur est fermé, le courant I_L traversant la self génère un flux magnétique ϕ_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 ϕ_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 4.4). 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 entrecoupée 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 ϕ_0 à 0.

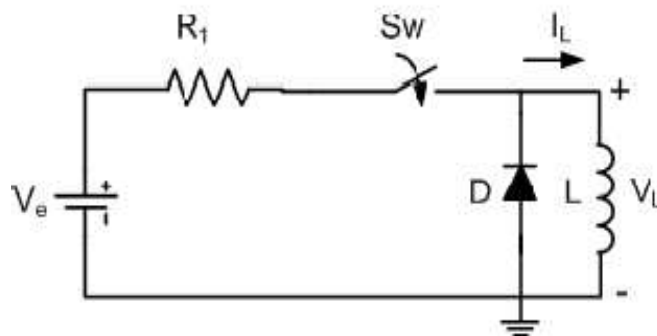


Figure 1.3. Circuit électrique intrinsèquement hybride.

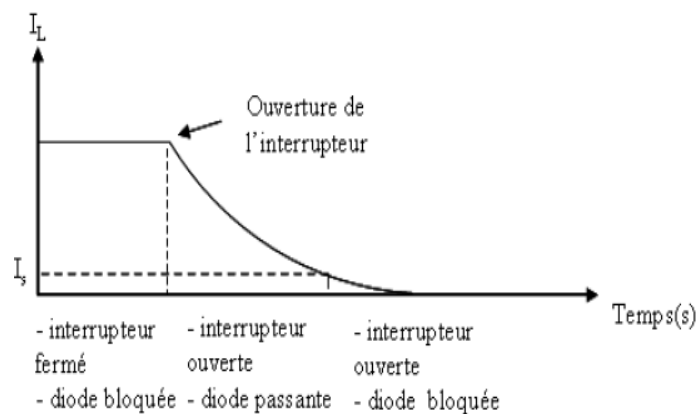


Figure 1.4. Evolution du courant dans la self.

1.4.2 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 [8]. Dans les deux cas, la vitesse change brutalement et subit donc un saut.

Exemple : Balle en rebondissement

Considérons l'exemple d'une balle en chute libre qui rebondit sur le sol de façon élastique (figure 1.3). 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

1.4.3 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 [7].

Exemple : Système thermique.

Considérons l'exemple d'un thermostat utilisé pour maintenir la température dans une pièce [2]. Le système est composé d'un élément chauffant et d'un capteur de température. Les seuils inférieurs et supérieurs du thermostat sont fixés à des valeurs θ_{min} et θ_{max} avec $(\theta_{min} < \theta_{max})$. La nature hybride du système est imposée par la commande discrète et l'évolution continue de la température. Il s'agit d'une commande Tout-Ou-Rien (TOR). Le système de chauffage est en marche tant que la température dans la pièce est inférieure au seuil θ_{min} . Le chauffage est arrêté lorsque le capteur détecte le seuil supérieur θ_{max} et il reste en arrêt jusqu'au moment où la température descend en-dessous du θ_{min} . Les états discrets du système correspondent aux états "Marche" et "Arrêt" du système de chauffage. L'évolution discrète correspond aux transitions de l'état "Marche" à l'état "Arrêt" et inversement (voir figure 1.2.b).

La température de la pièce est une variable dont l'évolution est continue. Sous certaines hypothèses classiques, le modèle décrivant l'évolution de la température dans l'enceinte thermique est donné par les équations d'état suivantes :

$$\dot{\theta} = \begin{cases} -k(\alpha - \theta) & \text{Si le chauffage est en marche} \\ -k\theta & \text{Si le chauffage est en arrêt} \end{cases} \quad (1.3)$$

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 1.2 (a).

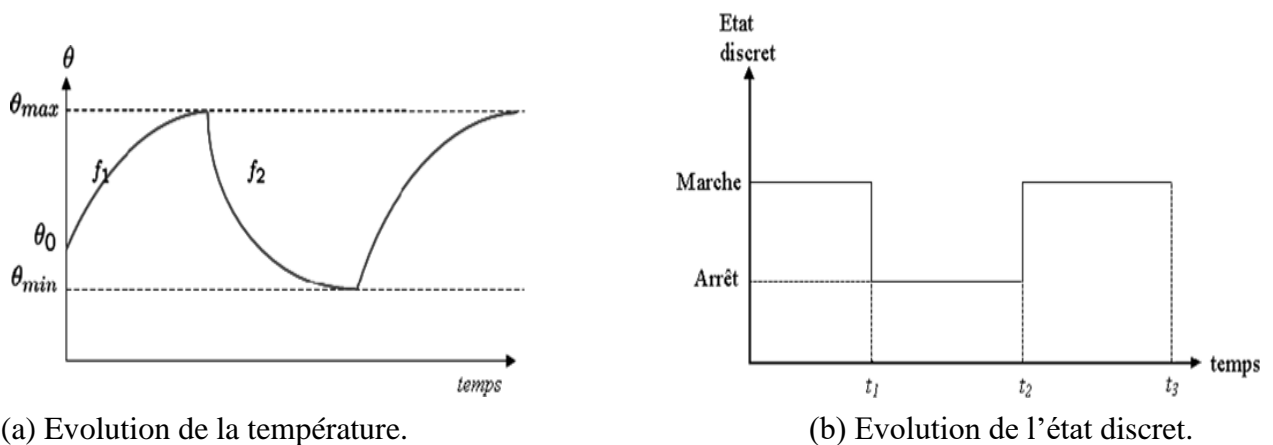


Figure 1.5. Evolution continue et discrète du SDH.

La 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.

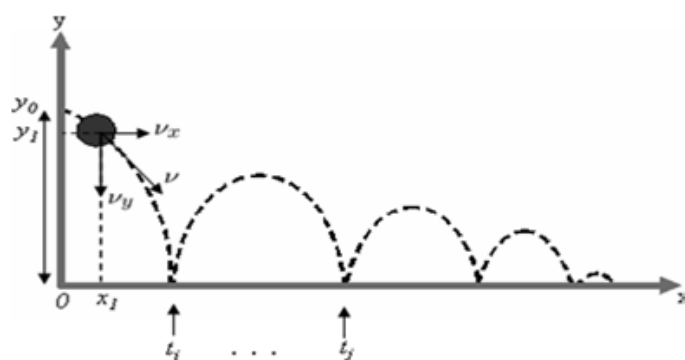


Figure 1.6 : Balle en rebondissement

Ce changement d'état discret de l'interrupteur crée une discontinuité du flux qui passe de ϕ_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 (1.5). L'évolution du système met en évidence une dynamique continue entrecoupée 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 ϕ_0 à 0.

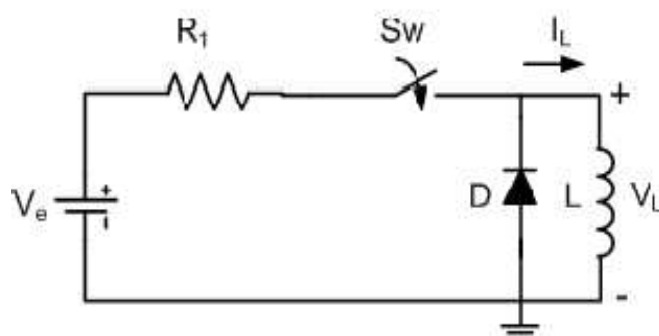


Figure 1.7. Circuit électrique intrinsèquement hybride.

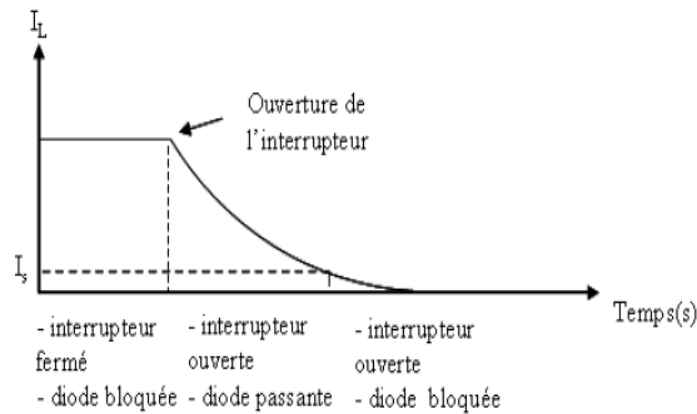


Figure 1.8. Evolution du courant dans la self.

1.4.4 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 [2].

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 : 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 (figure7) 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 [9].

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 réglé (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 ϕ_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 ϕ_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.

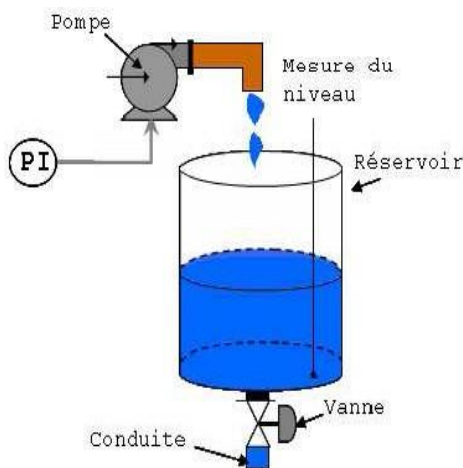


Figure 1.9. Système hydraulique.

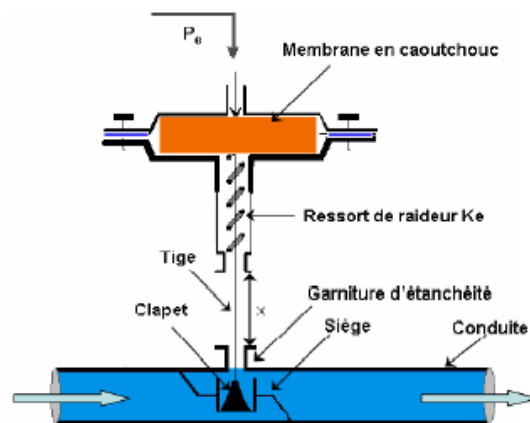


Figure 1.10. Exemple de vanne pneumatique

1.4.5 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 [10].

Exemple : Système de production

Le système illustré par la figure 8 est composé d'un ensemble de ressources ou stocks (S_1, S_2, S_2, \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_2, \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 :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (1.4)$$

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, *machine1* en marche ou en arrêt, etc.

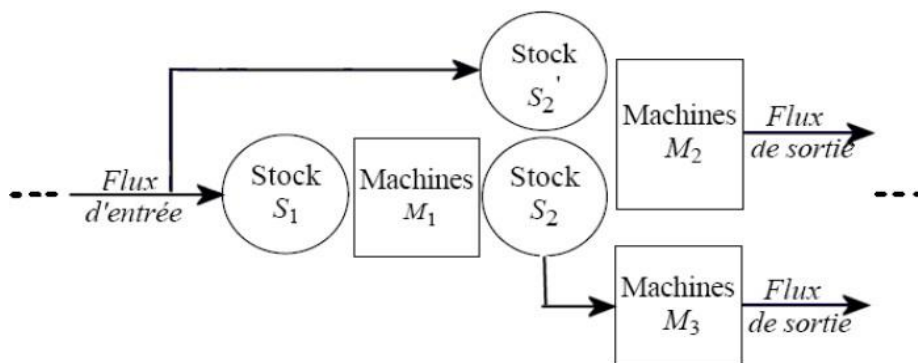


Figure 1.11. Architecture générique d'un système de production.

1.5 Conclusion :

Ce chapitre a 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.

Chapitre 2

Modélisation des Systèmes Dynamiques Hybrides

2.1 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.

2.2 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.

2.2.1 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 [11, 12, 13] :

- approche discret.
- approche continu.

a. Approche discret :

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

D'une manière générale, l'évolution discrète d'un système dynamique hybride est déterminée par l'occurrence des événements d'origine externes ou internes dont la nature peut être contrôlable ou non. L'occurrence des événements 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 [14].

a.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.

a.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.

a.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 (2.1).

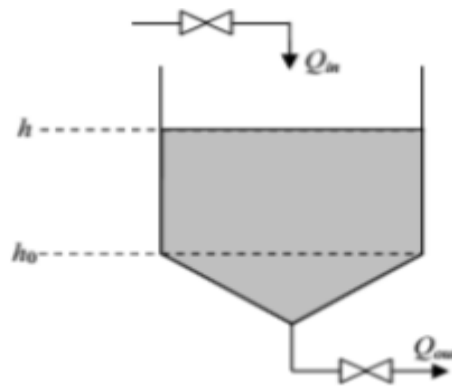


Figure 2.1 : Exemple d'une structure physique

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 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 :

$$S\dot{h}(t) = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

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 décrite par :

$$S \left(\frac{h(t)}{h_0} \right)^2 \dot{h}(t) = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.2)$$

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.

b. 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 :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (2.3)$$

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

Le modèle présenté par la relation (2.3) est assez général et l'analyse de ses propriétés doit être réalisée en temps continu.

2.2.2 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.

a. 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.

b. Spécification continue :

Les spécifications continues correspondent à des restrictions imposées sur les valeurs des variables d'état continues 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 :

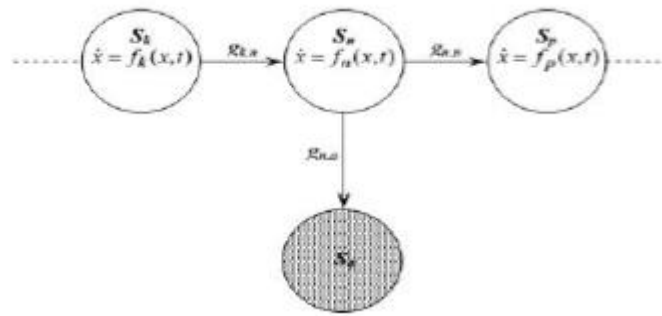


Figure 2.2: Partie d'un automate hybride

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 $g_{n,p}$.

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 (2.3).

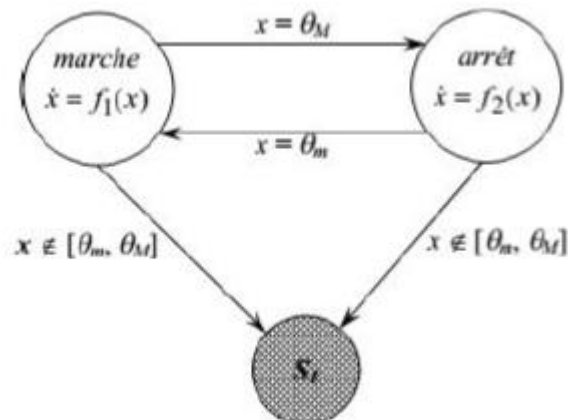


Figure 2.3 : Modèle de thermostat avec spécification de fonctionnement.

2.3 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.

2.3.1 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.

2.3.2 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 événements 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 commandait et d'observabilité...) pourront être étudiées selon les théories classiques.

2.3.3 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 événementiels, 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 événementiel, 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 événementiel 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 événementiel 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 [11] représentant le modèle formel fondamental de cette approche, les state harts hybrides pour apporter des solutions aux problèmes posés par la spécification des modèles, en particulier de la structuration hiérarchisée [15], et enfin les différents extensions des réseaux de Pétri [16], [17], [19].

2.4 Les outils de modélisation :

2.4.1 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 [20].

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

a. Réseau de Pétri hybride :

Définition :

Un RdP hybride (Hybrid Petri Nets (PNH)) est une structure $PNH = (P, T, b, E, Pré, Post, \Sigma, Tempo, V, M0)$ tel que :

➤ $P = \{P1, P2, \dots, Pn\}$ est un ensemble de n places, $P = PC \cup PD$ avec :

$PC = \{P1, P2, \dots, PnC\}$ est l'ensemble fini de places continues (ou C-places) ;

$PD = \{PnC+1, \dots, Pn\}$ est l'ensemble fini de places discrètes (ou D-places) ;

➤ $T = \{T1, T2, \dots, Tm\}$ est un ensemble de m transitions, $T = TC \cup TD$ avec :

✚ $TC = \{T1, T2, \dots, TmC'\}$ est l'ensemble fini de transitions continues (ou Ctransitions);

✚ $TD = \{TmC+1, \dots, Tm\}$ est l'ensemble fini de transitions continues (ou Ctransitions);

✚ $b: PUT \rightarrow \{D, C\}$ est une application qui désigne les noeuds discrets, $h(x) = D$, et les noeuds

continus, $h(x) = C$;

➤ E est un ensemble fini d'événements ;

➤ $1\Sigma : TD \rightarrow E$ 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 :

$\forall (Pi, Tj) \in PD \times PC : Pré(Pi, Tj) = Post(Pi, Tj)$;

- $Tempo : \rightarrow \mathbb{Q}^+$ est une application qui associe à chaque D-transition la durée de sa temporisation.
- $V: TC \rightarrow R^+$ est une application qui associe à chaque C-transition sa vitesse maximale de franchissement.
- 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) [21], [22], [23].

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 :

$$W = \begin{pmatrix} W_C & W_{cD} \\ 0 & W_D \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

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 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 .

b. Réseau de Petri hybride élémentaire :

Définition :

(Rdp hybrides élémentaire) (Réseau de Petri en anglais : Petri Net (RdP : PN)) Un élémentaire est un couple (PNH, I) tel que :

➤ **PNH** est un RdP dont les applications Pré et Post satisfont la condition suivante :

$$\forall (P_i, T_j) \in (PD \times TC) \cup (PD \times TC), \text{ alors } Pré(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$$

➤ $I: (P_i, T_j) \rightarrow \mathbb{R}$, 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 [22].

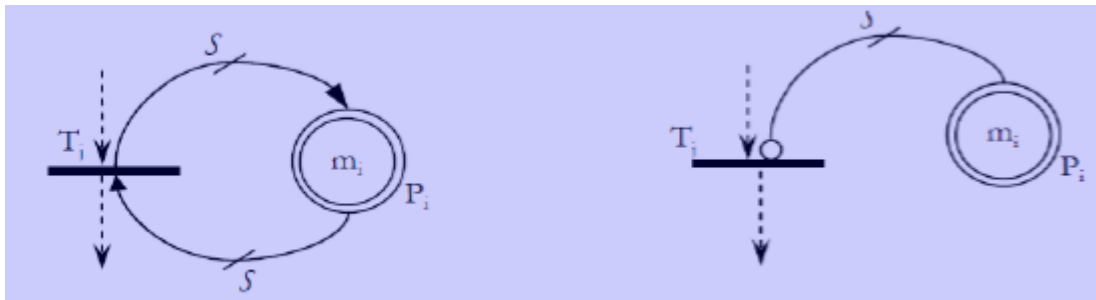


Figure a. validation de T_j si $m_i \geq S$. Figure b. validation de T_j si $m_i < S$

Figure 2.4 : 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.

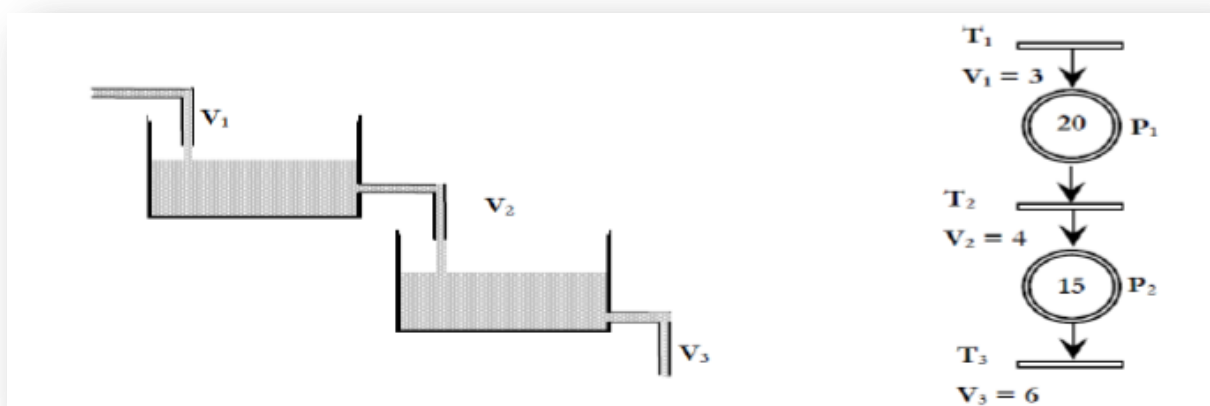


Figure a. système hydraulique

Figure b. RdPCC modèle

Figure 2.5 : 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.

2.4.2 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 apparait 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 [18], [19].

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 :

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

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

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

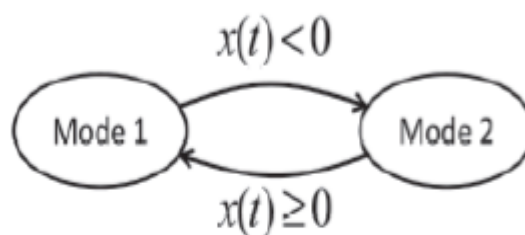


Figure 2.6 : Automate hybride

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 (t) associé à chaque mode.

2.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on traite les différents formalismes des systèmes dynamiques hybrides (SDHS), ainsi que les principale approche de modélisation de ce type de système, pour notre cas d'application nous nous somme intéressé à l'approche de modélisation par un Réseau de Pétri hybride, c'est le but de chapitre suivant.

Chapitre 3

*Modélisation de l'unité de
production de semoule par un
Réseau de Pétri hybride*

3.1 Introduction :

Les systèmes dynamiques sont généralement continus ou discrets ou les deux à la fois. Les Systèmes dynamiques continus (SDC) ont des variables qui ont un comportement continu dans le temps (Tension, courant, vitesse, couple...). Ils sont souvent modélisés par des équations différentielles ou Des équations d'états ou des fonctions de transferts. Les systèmes basés sur les principes de la Physique sont des systèmes dynamiques continus. Pour les systèmes dynamiques discrets (SDD), L'espace des variables des sorties est un ensemble discret de valeur booléenne (états ouverture / Fermeture d'un interrupteur, nombre d'interrupteurs ouverts/fermés simultanés dans un Convertisseur statique, nombre d'impulsions pour la commande des interrupteurs). Les modèles Classiques utilisés pour les (SDD) sont : les réseaux de Pétri, les automates, les réseaux de fichiers D'attentes et le Grafset.

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

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

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

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

La modélisation : cherche à formaliser des modèles précis qui peuvent décrire le comportement riche et complexe des SDH. Ce domaine a reçu l'attention des chercheurs et plusieurs formalismes ont été proposés afin d'établir un modèle homogène permettant la

conciliation entre les parties discrètes et continues. [30], les approches de modélisation des systèmes dynamiques hybrides sont classées en trois classes principales à savoir :

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

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

3.2 Outil De Modélisation :

Le couplage d'un modèle en RdP avec une représentation d'activité continue a été étudiée par plusieurs auteurs.[28] ont modifié la théorie de base en ajoutant de nouvelles places et de nouvelles Transitions représentées à l'évolution linéaire ou exponentielle d'une variable continue. L'objectif Initial du RdP continu était de diminuer la taille des modèles classiques lorsque le nombre de jeton Devenait trop important et de raisonner en termes de flux. [29] ont étendu cette approche à des Systèmes caractérisés par des phénomènes d'accumulation de pièces et régit par des lois de Comportement des lieux dont les transitions sont contrôlées par le calcul d'une équation d'état. ans Les travaux de Le Bail, Alla et avid [24], [25], [26] et [27], ils ont développé à partir des RdP continus les RdP hybrides. Ces réseaux contiennent des places et des transitions discrètes (représentées Graphiquement avec un contour simple) et continue (représentées avec un contour double). Ainsi, la Partie continue permet de modéliser les flux continus et la partie discrète les fonctionnements Logiques (vanne ouverte/fermée). Au niveau de l'interface continue/discret et afin de garantir que le Marquage des lieux discrets reste entier, tout arc connectant une place discrète et une transition Continue doit avoir son arc réciproque.

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

3.3 Réseau de pétri hybride :

Dans le but de fournir un modèle basé sur les réseaux de Pétri permettant la modélisation Homogène des systèmes physiques réunissant à la fois une partie continue est une partie discrète, Les réseaux de Pétri hybrides ont été définis, [31], [28]. Un modèle autonome de réseaux de Pétri hybride a été défini, mais la notion d'autonomie est insuffisante pour toujours des systèmes, car la variable intervient dans le fonctionnement de ces systèmes. Il était donc nécessaire d'ajouter cette variable au modèle autonome. Ainsi les RdP hybrides temporisés ont été définis. On considère uniquement le RdP hybride dont les temporisations sont associées aux transitions.

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

$$h(P_i) = D \text{ et } h(P_i) = C,$$

alors nous avons aussi :

$$\text{Pré}(P_i, T_j) = \text{Post}(P_i, T_j).$$

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

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

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

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

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

$$W = \begin{bmatrix} W^D & 0 \\ W^{CD} & W^C \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

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

$$M(t) = \begin{bmatrix} M^D(t) \\ M^C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^D(0) \\ M^C(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W & 0 \\ W^{CD} & W^C \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} \sigma(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} 0 \\ v(u) \end{bmatrix} du \right) \quad (3.2)$$

$M^D(t)$ et $M^C(t)$ sont, respectivement, le marquage discret et le marquage continu à l'instant t . $M^D(0)$ et $M^C(0)$ sont, (1) (2) Respectivement, le marquage initial des D - places et des C-places.

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

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

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

$$M_n(P_i) \geq Pré(P_i, T_j) \quad (3.3)$$

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

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

- 1) Pour chaque D-place P_i de T_j , (3.3)
- 2) Pour chaque C-place de T_j , $M_n(P_i)$ positif, ou P_i est alimentée.

Une C-transition qui est validée peut être fortement validée, soit faiblement validée. Elle est fortement validée si chaque C- place de T_j est telle que $M_n(P_i)$ positif, sinon elle est faiblement validée.

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

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

Définition4 : L'IB-état d'un RdPH correspond à un intervalle de tel que :

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

Graphe d'évolution :

L'état d'un réseau de Petri discret temporisé est défini par le marquage des lieux et les durées résiduelles associées aux marques réservées [27]. L'état d'un RdPCC est défini par son marquage qui implique un vecteur de vitesse de franchissement instantané (de manière univoque s'il n'y a pas de conflit effectif).

Le graphe d'évolution d'un RdPCC est représenté par des nœuds correspondant à une vectrice vitesse instantanée constante.

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

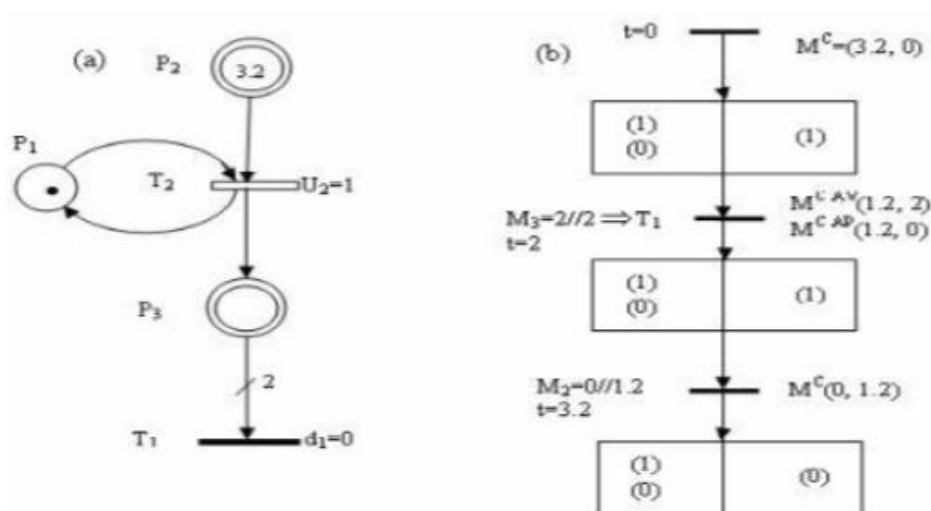


Figure 3.1 : (a) Réseaux de Petri hybride b) Graphe d'évolution RdPH.

3.4 EXEMPLE : LA SEMOULERIE :

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

1. Le pré nettoyage.
2. Le nettoyage.
3. La mouture.
4. L ensachage des produits finis.

3.4.1 Description du fonctionnement de la partie mouture :

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

a. Les brosses SR :

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

b. Le tarare TR :

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

c. Les appareils à cylindres RM :

Le nombre de ces appareils dépend de la productivité de chaque semoulerie. Ils se différencient au Niveau des caractéristiques des cylindres, c'est-à-dire l'inclinaison et la profondeur des cannelures sur leurs surfaces latérales, et la vitesse de rotation des cylindres qui est obtenue par L'alimentation d'un moteur pour chaque deux cylindres. Chaque appareil RM constitue de : deux Cylindres, un bac et un distributeur.

d. Les plansichters SF :

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

e. Les sasseurs SD :

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

f. Le détacheur DS :

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

g. Le vibreur AV :

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

3.4.2 L'enchaînement des différentes étapes de moteur :

Après la figure (3.2), le blé nettoyé passe tout d'abord à la brosse, où il sera débarrassé de son Enveloppe extérieure à l'aide de sa vis tournante à une très grande vitesse, plus l'effet du passage à travers le grillage du cylindre creux, au tarare où se fait une séparation de l'amande des enveloppes par l'effet de vibration et de l'air qui y circule. L'amande vêtus est prête à être broyée et le blé passe au broyage qui se fait au niveau du premier étage, où on trouve les appareils à cylindres, divisés selon les caractéristiques des cannelures en broyeurs et convertisseurs : les broyeurs effectuent le broyage des grosses particules du blé tandis que les convertisseurs font la mouture à ces dernières étapes c'est à dire quand les particules de blé deviennent de plus en plus petites. A la sortie de chaque broyeurs, le produit sortant est collecté et l'étage des tuyaux à transport pneumatique au quatrième étage se trouve des cyclones reliés à où se trouve des écluses au niveau se faisant la séparation de l'air du produit, l'air passe ensuite par un filtre avant d'être envoyé l'extérieur.

Chaque écluse est reliée à une porte bien déterminée des plansichters à l'étage qui vient juste après (troisième étage) ; à ce niveau du produit subira une séparation selon l'ouverture des mailles des différents tamis superposés. Le refus de chaque série de tamis est canalisé à un sasseur bien déterminé et le produit passant à travers tous ces tamis, soit environ 12% du produit entrant, est récupéré par une vis sous forme de farine conçue par la SSSF (semoule sassée super fine). La farine passera par le détacheur puis à l'ensachage. La partie de produit

3.4.3 Modélisation de l'unité de production de semoule :

La figure (3. 3), représente le modèle RDPH de fonctionnement d'une semoulerie.

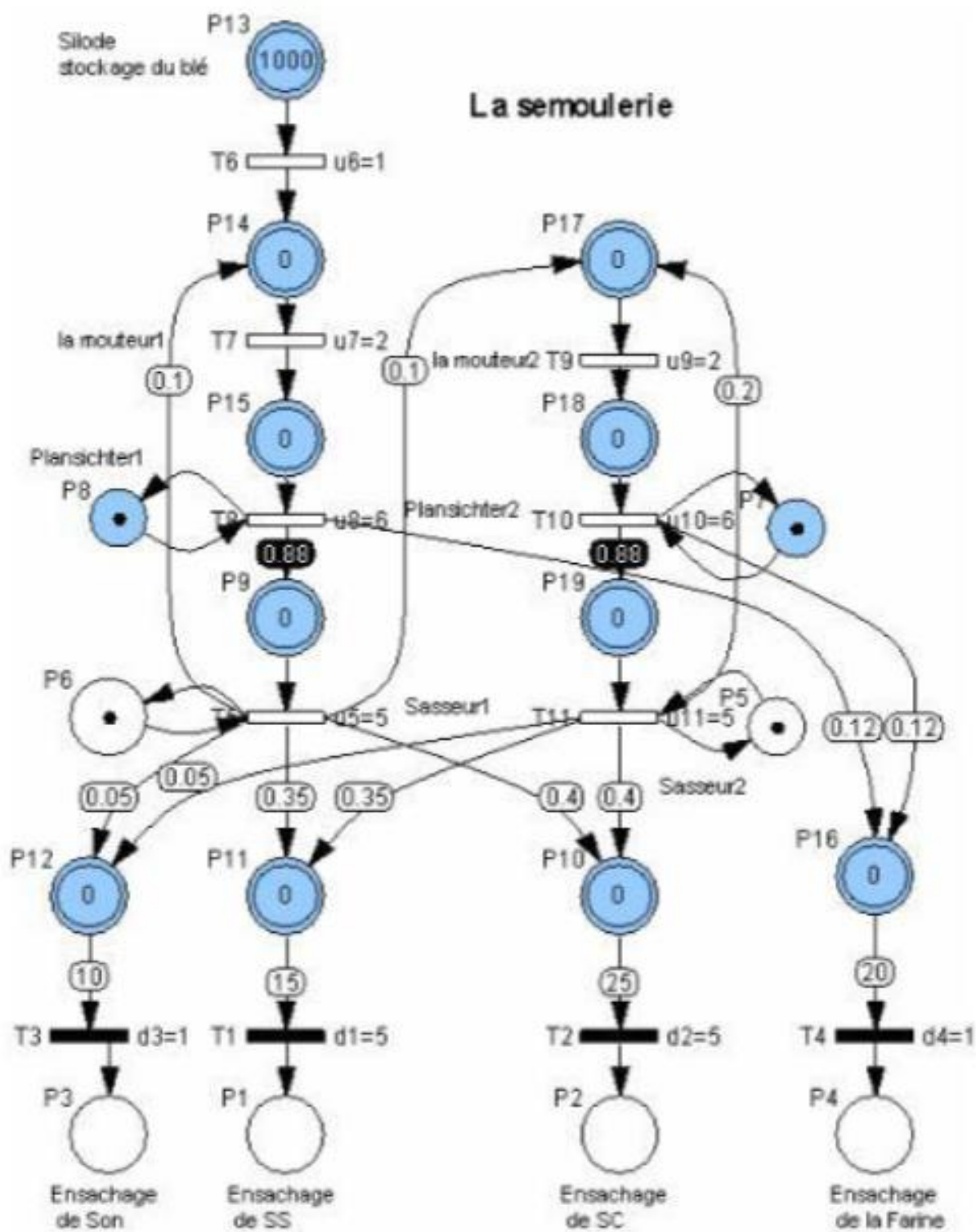


Figure 3. 3. Modèle RDPH du fonctionnement de la semoulerie.

La place P 13 représente le silo de stockage du Blé ce dernier va se transformer en quatre types de produits : la farine, le semoule courant, le semoule supérieur et le son selon un pourcentage indiqué par les poids associés aux arcs entrant aux places P 1 , P 11, P 12, et P 16, qui donne respectivement courant la quantité de semoule, de semoule supérieur, du son et de la farine qui sera met dans des sacs contenant respectivement 25 kg, 15 kg, 10 kg, et 20kg, indiqué par les poids associés aux arcs entrants aux transitions suivantes T 1, T 2, T 3 et T4 qui représentent le système d'ensachage du produit. La transformation du Blé s'effectuée à travers la mouture, le plansichter, la sasseur, indiqués les transitions T 6, T 7, T 8, T9., T 10 et T 11. de la semoulerie, Cet élément peut être en service ou en arrêt ou bien en maintenance qui peut être représenté par le RdPH élémentaire pour les éléments de transformations du produit figure (3.4) :

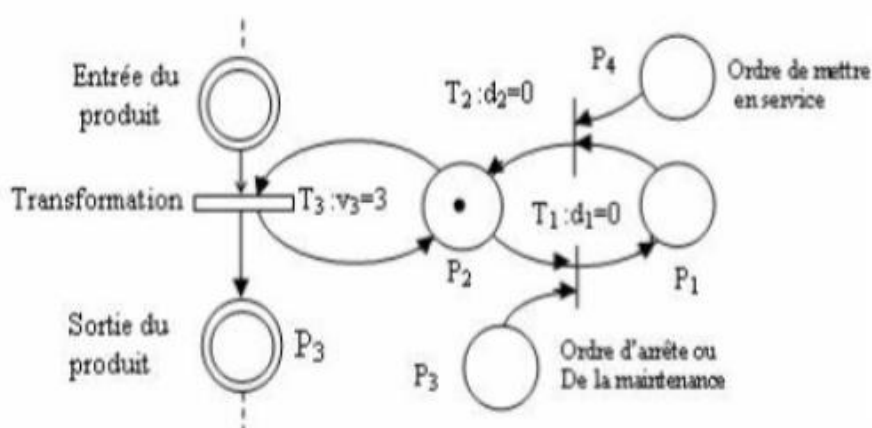


Figure3.4 : Modèle de la transformation du produit

3.5 La Simulation :

La simulation du RPH de l'unité de production de semoule a été réalisée sous le logiciel SYRPHICO (simulateur de Rdp Hybrides et Continus) .

Considérons une quantité par exemple de 1 Kg de Blé, elle sera transformée en quatre types de produit selon les pourcentages de transformations du blé indiqués précédemment comme suit :

- Une quantité de 145,63 Kg de la farine donne 7 sacs de la farine de poids 20 Kg et 5,63 Kg reste dans le Stock WG 304 comme montre la figure 3.5.b.
- Une quantité de 427,19 Kg de semoule courant donne 17 sacs de semoule courant de poids 25 Kg et 2 ,19. Kg reste dans le stock WG 302 comme montre la figure 3.5.b .
- Une quantité de 373,8 Kg de semoule supérieur donne 24 sacs de semoule supérieure de poids 15 Kg et 13,8 Kg reste dans le stock WG 301 comme montre la figure 3.5.c.

- Une quantité de 53,4Kg de semoule qui correspond à 5 sac de semoule de poids 10 Kg et 3,4 reste dans le stock WG 303 comme montre la figure3.5.d .

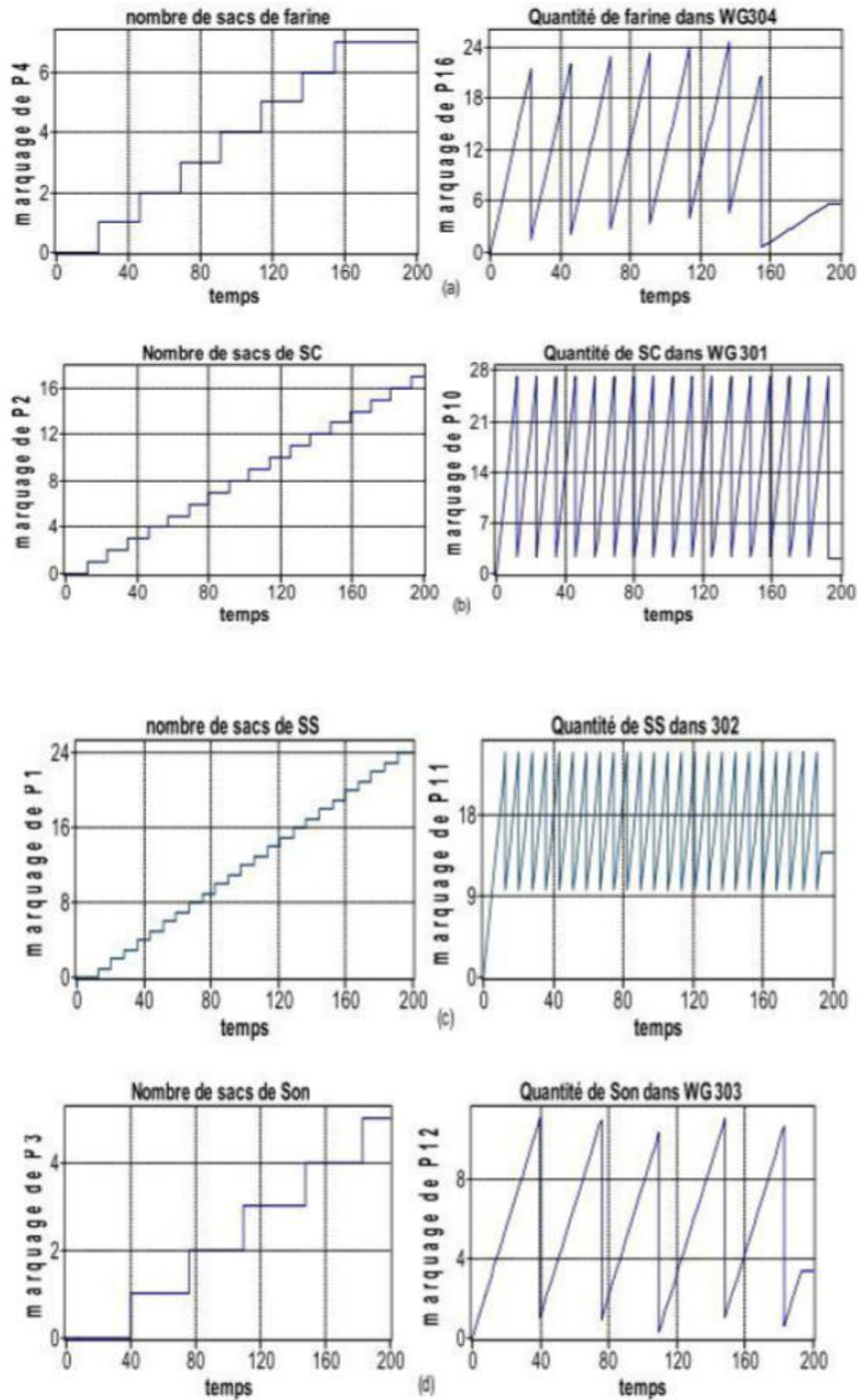


Figure 3.5 : les résultats de la simulation du RDPH de la semoulerie.

La figure (3.5) montre l'évolution des produits dans les stocks d'entrées et de sorties des bascules de chaque produit. Après les résultats on constate la durée de transformation du blé est de 2 unités de.

Et durant 5 unités de on peut obtenir : un sac de la farine de 2kg et 3 sacs de 25Kg de la semoule courante et deux sacs 1Kg de son et enfin 2 sacs de 15 Kg de la semoule supérieur. Nous pouvons remarquer qu'après un régime transitoire, nous obtenons un régime stationnaire: Pour le marquage de P 1, nous retrouvons une période de 3 unités de, pour le marquage de P 8, nous retrouvons une période de 1 unités de. Ces résultats sont obtenus pour un fonctionnement donné et seront utilisés dans l'approvisionnement de l'unité de production.

3.6 Conclusion :

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

Conclusion générale

De nombreux systèmes technologiques ont une nature hybride dans le sens où ils possèdent à la fois une dynamique discrète et une dynamique continue. Ces systèmes peuvent être de différents types, comme les procédés batch, les systèmes hydrauliques et les systèmes manufacturiers traitant une quantité importante de produits.

Pour cela nous avons considéré une classe particulière des systèmes hybrides à savoir la classe des systèmes hybrides positifs et linéaires par morceaux. Pour la modélisation et l'analyse de cette classe importante des SdH nous avons adopté la démarche suivante :

Tout d'abord nous avons introduit un nouveau modèle pour la représentation de cette classe appelé RdPH D-C élémentaire où la partie discrète est représentée par un RdP T-temporel et non par un RdP T-temporisé comme dans le cas des RdPH. Les RdP T-temporel introduisent un déterminisme quand aux dates d'occurrences des événements discrets. Notre modèle se distingue du RdPH développé par [32] dans le fait que le contrôle est généré par les deux parties, la partie événementielle commande le comportement de la partie continue, et cette dernière influence à son tour le comportement de la partie discrète.

Nous avons ensuite proposé un algorithme pour la traduction des RdPH D-C élémentaires en automates hybrides en s'inspirant des travaux de Sava [33]. Cette traduction vise à associer la puissance de modélisation des réseaux de Petri à la puissance d'analyse et de manipulation formelle des automates.

À partir d'un marquage initial discret du RdPH D-C élémentaire on détermine les sommets de l'automate hybride ainsi pour chaque sommet on définit son marquage discret et les dynamiques continues associées aux places continues, ainsi on peut déterminer les horloges actives, les transitions discrètes et continues franchissables.

Références

Bibliographique

Références Bibliographiques

- [1] P.Peter and H Philips. Modelling control and fault detection of discretely-observed systems. Thesis, Technische Universities Eindhoven, 2001
- [2] 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.
- [3] P. J. Ramadge and W. M.Wonham. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J.Control Optim.*, 25(1):206–230, 1987.
- [4] R.David and H. Alla. Du Grafcet aux Réseaux de Petri. Hermès, 1989.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. S. Branicky. *Studies in hybrid systems: Modling, Analysis, and control*. Phd thesis, Massachusetts Institute of Tech., 1995.
- [9] S. Hashtrud . *Fault Diagnosis in discrete-event and hybrid systems*. Thesis, Toronto University, Canada, Septembre 1999.
- [10] M. Kurovsky. *Etude des Systèmes Dynamiques Hybrides par représentation d'état discrète et automate hybride*. Thèse de doctorat, l'INPG, France, 2002.
- [11] 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.
- [12] A.D.Febbraro and N. Sacco. On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets. *Control Eng. Pract.* 12, pp: 1225–1239. 2004.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] R. David and H. Alla. *Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets*. Springer, 2005
- [16] H. Alla and R. David.*Continuous and Hybrid Nets*. *Journal of Circuits, Systems and Computers*,Volume 8, No.1, p. 159-188, 1998.
- [17] 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.
- [18] 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.
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
- [19]

- [20] H. Alla and R. David. A modeling and analysis tool for discrete events systems: Continuous Petri net, *Perform. Evaluation* 33 (3) (1998) 175, 1998
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] A.BENHOCINE, Théorie des graphes et applications, Cours de post-graduation, Université de Sétif, 2001.
- [24] H. ALLA. les réseaux de Petri : un outil particulièrement adapté à la modélisation des systèmes hybrides APM 9, Bruxelles, Novembre 1998.
- [25] J LE. BAIL, H. ALLA, R. AVI. Réseaux de Petri hybride TSI, vol 11, n 5/1992 pp 95 à 12.
- [26] E. EBOIS, H. ALLA. R. AVI. Les Réseaux de Petri à vitesse fonction du APPI, vol, 28, n 5, pp 25 à 3, juin 1998.
- [27] R. avid, H. Alla. u Grafcet aux Réseaux de Petri Edition Hermès Paris 1992, 2ième édition..
- [28] R. avid, H. Alla, iscrete. Filets Peti continus et hybrides Springer-Verlag Berlin 2.
- [29] R. avid, H. Alla. Réseaux de Petri pour la modélisation des systèmes ynamics-A *Survey Automatica*, Vol 3, N 2, pp175-22, 1995.
- [30] Chombart A. Commande dirigée de systèmes hybrides Thèse de docteur de l INPG, Grenoble1997.
- [31] J. LE. CAUTION. Sur les réseaux de Petri continus et hybrides Thèse du docteur de l INPG, Grenoble 1992.
- [32] L.Ghomari Modélisation structurelle Utilisonant les automates Hybride et Les réseaux de pétri hybride en vue de Synthèse De contrôleur des système dynamique Hybride. Mémoire de magistère, Université Abou BEkr belkaid, Tlmcen (Algerie) ,2005
- [33] A.T. Sava and H.Alla. A control Synthesis Approach for Time Discrete Event Systems. *Mathematics and Computers in simulation*, Vol. 70, issues 5-6, 24, pp . 250-265, Elsevier, ferbruary 2006.