

**Centre des Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur**

Fès, le 19/11/2020

N° d'ordre : 66/2020

**THÈSE DE DOCTORAT**

Présentée par

**Mme : BENATIA Omaima**

Spécialité : **Génie électrique**

Sujet de thèse :

**DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE DIAGNOSTIC DES SYSTEMES  
INDUSTRIELS HYBRIDES**

**Thèse présentée et soutenue le 19/11/2020 devant le jury composé de :**

Nom Prénom	Titre	Établissement	
Mohammed CHERKANI HASSANI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Ahmed MOUHSEN	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Settat	Rapporteur
Aziz SOULHI	PES	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Rabat	Rapporteur
Hassan QJIDAA	PES	Faculté des Sciences Dhar Elmahraz de Fès	Rapporteur
Abdelmounaïm ABDALI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech	Examineur
Abderrahim CHAMAT	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examineur
Fouad BELMAJDOUB	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Techniques Industrielles

Établissement : Faculté des Sciences et Techniques – Fès.



## **Remerciements**

Je tiens à exprimer ma reconnaissance profonde à mon directeur de thèse Monsieur BELMAJDOUB Fouad, professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès. Cette thèse n'aurait jamais vu le jour sans sa disponibilité, ses critiques constructives, ses connaissances scientifiques et son expérience.

Je souhaite remercier mes professeurs Monsieur El HAMMOUMI Mohammed, directeur de notre laboratoire « Techniques Industrielles », et Monsieur GADI Fouad, chef de département Génie industriel à la FST de Fès, pour l'ensemble des aides administratifs, des conseils précieux et des ressources matérielles qu'ont mis à notre disposition et sans lesquelles aucune thèse ne peut aboutir à sa fin.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de sacrifier de leurs précieux temps pour évaluer cette modeste thèse. J'adresse mes remerciements à :

- Professeur Mohammed CHERKANI HASSANI ;
- Professeur Abdelmounaïm ABDALI ;
- Professeur Abderrahim CHAMAT ;
- Professeur Ahmed MOUHSEN ;
- Professeur Hassan QJIDAA ;
- Professeur Aziz SOULHI.

Je termine enfin par ceux que je ne saurai et que je ne pourrai jamais remercier par des mots, je pense à mes parents, mon mari, ma fille, mes frères et mes sœurs et ma belle-famille. Vos encouragements et votre soutien ne m'ont jamais fait défaut, je vous dédie ce travail et j'espère être toujours à la hauteur de vos aspirations.

## Résumé

Le développement des systèmes récents présente une complexité croissante des comportements. Cela implique deux problèmes : Premièrement, il devient de plus en plus difficile d'ignorer le fait que la plupart des systèmes sont hybrides et font intervenir l'aspect continu et l'aspect discret. Deuxièmement, les systèmes sont exposés à des défaillances. L'entretien et la réparation sont devenus une partie importante du coût total du produit final. Des techniques de diagnostic et de pronostic efficaces doivent être adoptées pour détecter, isoler et anticiper les fautes.

L'objectif de notre travail de recherche est le développement d'une méthode de diagnostic des systèmes industriels hybrides. Notre méthode, basée sur les réseaux de Petri hybrides, est inspirée de deux méthodes de la littérature : une qui est basée sur les réseaux de Petri discrets et l'autre basée sur les réseaux de Petri continus. Notre approche est proposée sous forme d'un algorithme qui traite les différentes étapes pour diagnostiquer un système industriel hybride à flux continu, dont la partie discrète contrôle la partie continue. Nous considérons que l'ensemble des classes de fautes est partitionné en deux sous-ensembles : La classe des fautes continues et la classe des fautes discrètes. Les transitions de fautes qui appartiennent à la même classe de fautes sont des transitions qui représentent le même comportement physique défectueux. Ainsi, nous considérons dans notre travail que les classes de fautes discrètes ne contiennent que des transitions discrètes et que les classes de fautes continues ne contiennent que des transitions continues.

**Mots clés :** Systèmes industriels hybrides, Réseaux de Petri hybrides, Diagnostic, Classes de fautes, Fautes discrètes, Fautes continues.

## **Abstract**

The development of recent systems presents an increasing complexity of behavior. This involves two problems: First, it is becoming increasingly difficult to ignore the fact that most systems are hybrid which involve continuous and discrete aspects. Second, systems are exposed to failures. Maintenance and diagnosis have become an important part of the total cost of the final product. Effective diagnostic and prognostic techniques must be adopted to detect, isolate and anticipate faults.

The objective of our research work is the development of a diagnosis method for hybrid industrial systems. Our method, based on hybrid Petri nets, is inspired by two methods from the literature: one is based on discrete Petri nets and the other based on continuous Petri nets. Our approach is proposed in the form of an algorithm which treats the different steps to diagnose a manufacturing hybrid system whose discrete part controls the continuous part. We consider that the set of fault classes is partitioned into two subsets: The class of continuous faults and the class of discrete faults. Fault transitions that belong to the same fault class are transitions that represent the same defective physical behavior. Thus, we consider in our work that the classes of discrete faults contain only discrete transitions and that the classes of continuous faults contain only continuous transitions.

**Keywords :** Industrial hybrid systems, hybrid Petri nets, Diagnosis, faults classes, discrete faults, continuous faults.

## Table de matières

<b>Liste des figures</b>	<b>11</b>
<b>Liste des notations</b>	<b>14</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>17</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>18</b>
<b><i>PARTIE A : Systèmes hybrides</i></b>	<b>21</b>
<b>Introduction</b>	<b>22</b>
<b>Chapitre 1 : Systèmes dynamiques</b>	<b>23</b>
1. Systèmes continus et systèmes à événements discrets	23
1.1 . Systèmes continus	23
1.2 . Systèmes à événements discrets	24
2. Quelques propriétés des systèmes dynamiques	26
2.1 . Déterministe/Non-déterministe	26
2.2 . Linéaire/ Non linéaire	26
2.3 . Structure de prise de décision : Centralisée/ Décentralisée	26
3. Analyse de la tendance de la recherche scientifique des systèmes	27
3.1 . Problématique et méthodologie	27
3.2 . Interprétation des résultats	28
<b>Chapitre 2 : Systèmes dynamiques hybrides</b>	<b>32</b>
1. Introduction	32
2. Classes des systèmes dynamiques hybrides	33
2.1. Systèmes hybrides par la commande	33
2.2. Systèmes continus comportant des discontinuités	34

2.3. Systèmes comportant des éléments continus et discrets _____	35
2.4. Systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction _____	37
2.5. Systèmes discrets pour lesquels des dynamiques continues sont introduites par abstraction _____	39
2.6. Systèmes complexes composés de sous-systèmes continus et discrets _____	40
3. La classe des systèmes hybrides considérée _____	41
<b>Conclusion</b> _____	<b>44</b>
<b><i>PARTIE B : Diagnostic des systèmes dynamiques</i></b> _____	<b>45</b>
<b>Introduction</b> _____	<b>46</b>
<b>Chapitre 1 : Méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques</b> _____	<b>47</b>
1. Terminologies _____	47
a. Faute _____	47
b. Défaut _____	47
c. Dégradation _____	47
d. Défaillance _____	47
e. Panne _____	48
f. Symptôme, observation, mesure _____	48
g. Mode de fonctionnement _____	49
h. Surveillance _____	49
i. Diagnostic _____	49
2. Méthodes de diagnostic des systèmes _____	50
2.1. Introduction _____	50
2.2. Méthodes à base de modèle _____	51

a. Méthodes quantitatives :	51
➤ Espace de parité	52
➤ Observateurs	52
➤ Estimation paramétrique	52
b. Méthodes qualitatives :	52
➤ Graphes causaux	53
➤ Automates à états finis	53
➤ Réseaux de Petri	54
➤ Bond graphs	54
2.3. Méthodes sans modèle	55
➤ Reconnaissance des formes	55
➤ Systèmes experts	56
➤ Réseaux de neurones	56
<b>Chapitre 2 : Etat de l'art sur le diagnostic des systèmes hybrides</b>	<b>57</b>
1. Etat de l'art sur le diagnostic des systèmes continus et le diagnostic des SED	57
1.1. Systèmes continus	57
1.2. Systèmes à événements discrets	57
2. Etat de l'art sur le diagnostic des systèmes hybrides	58
<b><i>PARTIE C : Méthode proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides</i></b>	<b>64</b>
<b>Introduction</b>	<b>65</b>
<b>Chapitre 1 : Réseaux de Petri</b>	<b>66</b>
1. Extensions des réseaux de Petri	66



2. Réseaux de Petri discrets	67
2.1. Définition formelle d'un RDP discret	67
2.2. Définition non formelle d'un RDP discret	69
3. Réseaux de Petri continus	71
3.1. Définition formelle d'un RDP continu	71
3.2. Définition non formelle d'un RDP continu	72
4. Réseaux de Petri hybrides	74
4.1. Définition formelle d'un RDP hybride	74
4.2. Définition non formelle d'un RDP hybride	75
5. Définitions liées aux réseaux de Petri	79
5.1. Premières définitions	79
a. Définition 1 : Ensemble de potentialité accessible	81
b. Définition 2 : Projections sur $T_o$ et $T_u$	82
c. Définition 3 : Ensemble des marquages cohérents avec $\omega$	82
d. Définition 4 : RDP induit par $T'$	83
5.2. Explications minimales et E-vecteurs	83
a. Définition 1 : Explications et E-vecteurs	83
b. Définition 2 : Explications minimales et E-vecteurs minimaux	83
5.3. Marquages de base et J-vecteurs :	84
a. Définition 1 : Justifications et J-vecteurs	84
b. Définition 2 : Marquage de base	84

c. Définition 3 : Ensemble de tous les marquages de base	85
6. Quelques propriétés des réseaux de Petri	85
<b>Chapitre 2 : Méthode proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides</b>	<b>89</b>
1. Problématique	89
2. Hypothèses	89
3. Etats du diagnostiqueur	90
3.1. Diagnostiqueur discret	90
3.2. Diagnostiqueur continu	91
4. Algorithme : Diagnostic des systèmes industriels hybrides basé sur les réseaux de Petri hybride	91
5. Exemple d'application : Ligne de production	94
<b>Conclusion</b>	<b>100</b>
<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>101</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>103</b>

## Liste des figures

Figure 1: Evolution d'une variable d'état dans un système continu.....	23
Figure 2: Exemple d'un système continu .....	24
Figure 3: Evolution d'une variable d'état dans un système à événement discret.....	25
Figure 4: Exemple d'un SED .....	26
Figure 5: Interprétation des courbes .....	28
Figure 6: Outils de modélisation en fonction des années de publication .....	29
Figure 7: Nombre d'articles selon l'architecture de prise de décision .....	29
Figure 8: Nombre d'articles selon le type du système.....	30
Figure 9: Variation des pourcentages des articles publiés dans les différents domaines en fonction des années.....	30
Figure 10: SDH (Interaction continu/discret).....	32
Figure 11: Evolutions continue et discrète du système de chauffage .....	34
Figure 12: Balle en rebondissement .....	35
Figure 13: Circuit électrique intrinsèquement hybride .....	36
Figure 14: Evolution du courant dans la self.....	37
Figure 15: Système hydraulique .....	38
Figure 16: Vanne pneumatique .....	38
Figure 17: Architecture générique d'un système de production.....	40
Figure 18: Procédés Batch .....	41

Figure 19: Système de bacs.....	42
Figure 20: Système manufacturier.....	43
Figure 21: Méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques .....	50
Figure 22: Graphe causal du moteur à courant continu .....	53
Figure 23: Exemple d'un automate à états finis .....	54
Figure 24: Exemples de Bond graph .....	55
Figure 25: Applications d'incidence .....	68
Figure 26: Représentation d'une place et d'une transition discrètes.....	69
Figure 27: Marquage d'une place discrète .....	69
Figure 28: Exemple d'une transition franchissable.....	69
Figure 29: Franchissement d'une transition discrète .....	70
Figure 30: Exemple d'un réseau de Petri non marqué .....	70
Figure 31: Représentation d'une place et d'une transition continues .....	72
Figure 32: Trajectoire de franchissement d'une transition continue .....	73
Figure 33: Système à réservoirs .....	73
Figure 34: RdPC du système à réservoirs.....	74
Figure 35: Franchissement d'une transition discrète dans un réseau de Petri Hybride.....	76
Figure 36: Synchronisation d'un modèle continu par un modèle discret.....	76
Figure 37: Exemple d'arcs inhibiteurs.....	77
Figure 38: Système à réservoirs .....	77

Figure 39: RdPH du système à réservoirs .....	78
Figure 40: Exemple d'un RdP discret .....	80
Figure 41: RdP en blocage.....	86
Figure 42: RdP en conflit.....	87
Figure 43: Transitions parallèles .....	88
Figure 44: Réseau de Petri hybride d'une ligne de fabrication.....	95

## Liste des notations

$M$  : Marquage d'un réseau de Petri

$M_0$  : Marquage initial d'un réseau de Petri

$T$  : Ensemble transitions d'un réseau de Petri

$P$  : Ensemble des places d'un réseau de Petri

$P^C$  : Ensemble des places continues d'un Réseau de Petri hybride

$P^D$  : Ensemble des places discrètes d'un Réseau de Petri hybride

$T^C$  : Ensemble des transitions continues d'un Réseau de Petri hybride

$T^D$  : Ensemble des transitions discrètes d'un Réseau de Petri hybride

$C$  : Matrice d'incidence d'un réseau de Petri

$Pre$  : Matrice Pre-incidence

$Post$  : Matrice Post-incidence

$\sigma$  : Séquence de transitions dans un réseau de Petri

$y$  : Vecteur de tir de  $\sigma$

$\Pi$  : Fonction qui associe à  $\sigma$  un vecteur  $y \in \mathbb{N}^m$ , En particulier,  $y = \Pi(\sigma)$

$M[\sigma >$  : Franchissabilité d'une séquence de transitions  $\sigma$  partir d'un marquage  $M$

$M[\sigma > M'$  : Franchissabilité d'une séquence de transitions  $\sigma$  partir d'un marquage  $M$  si le marquage résultant est  $M'$

$T_o$  : Ensemble des transitions observables

$T_u$  : Ensemble des transitions inobservables

$T_f$  : Ensemble des transitions de fautes

$T_{df}$  : Ensemble de toutes les transitions de défauts discrètes

$T_{cf}$  : Ensemble de toutes les transitions de défauts continues

$T_{reg}$  : Ensemble des transitions des comportements réguliers

$T^*$  : Ensemble de toutes les séquences pouvant être combinées dans  $T$

$T_{co}^*$  : Ensemble de toutes les séquences pouvant être obtenues en combinant des éléments dans l'ensemble des transitions observables continues.

$T_{do}^*$  : Ensemble de toutes les séquences pouvant être obtenues en combinant des éléments dans l'ensemble des transitions observables discrètes.

$C_o$  : Restriction de la matrice d'incidence à  $T_o$

$C_u$  : Restriction de la matrice d'incidence à  $T_u$

$n_o$  : Cardinal de l'ensemble  $T_o$

$n_u$  : Cardinal de l'ensemble  $T_u$

$L(N, M_0)$  : Ensemble de toutes les séquences activées au marquage initial

$R(N, M_0)$  : Ensemble de tous les marquages accessibles à partir du marquage initial  $M_0$

$PR(N, M_0)$  : Ensemble de potentialité accessible

$P_o$  : Projection sur  $T_o$

$P_u$  : Projection sur  $T_u$

$\omega$  : Mot observé correspondant à une séquence  $\sigma$  tel que  $\omega = P_o(\sigma)$

$L(\omega)$  : Ensemble des séquences de tir cohérentes avec  $\omega$

$C(\omega)$ : Ensemble des marquages cohérents avec  $\omega$

$\Sigma(M, t)$  : Ensemble de justifications de la transition  $t$  au marquage  $M$

$T_f^i$ :  $i^{\text{ème}}$  classe de fautes

$T_{df}^i$ :  $i^{\text{ème}}$  classe de fautes discrète

$T_{cf}^i$ :  $i^{\text{ème}}$  classe de fautes continue

$\Delta_c$  : Diagnostiqueur continu

$\Delta_d$  : Diagnostiqueur discret

$\Delta_h$  : Diagnostiqueur hybride



## Liste des abréviations

S : Système

SC : Système continu

SED : Système à événements discrets

SDH : Système dynamique hybride

SàFC : Système à flux continu

RdP : Réseau de Petri

IPN : Réseau de Petri interprété

TPN : Réseau de Petri temporisé

FSPN : Réseau de Petri stochastique fluide

BPN : Réseau de Petri Batch

DAE-PN : Equations différentielles algébriques-réseaux de Petri

DPN : Réseau de Petri différentiel

OPTN : Réseau de Petri orienté objet

TOR : Tout-Ou-Rien

f.é.m. : Force électromotrice

M : Machine

AFNOR : Association française de normalisation

## **Introduction générale**

Les équations différentielles étaient le moyen le plus adéquat pour la modélisation et l'étude des systèmes continus qui constituent une partie très importante des systèmes industriels. Néanmoins, cet outil, très puissant, de modélisation ne peut pas être appliqué aux systèmes dont l'espace d'état est discret et dont le passage d'un état à un autre est produit par des événements. Ces systèmes, appelés systèmes à événements discrets, constituent la partie complémentaire des systèmes continus dans les processus industriels.

Pendant longtemps, l'automatique a traité séparément les systèmes continus et les systèmes à événements discrets, pour chacune de ces deux classes de systèmes, il existe une théorie, des méthodes et des outils pour résoudre les problèmes qui se posent. Cependant, la séparation entre le monde des systèmes continus et celui des systèmes à événements discrets n'est pas aussi claire et la plupart des systèmes réels ont des aspects continus et discrets, ces systèmes sont appelés systèmes hybrides.

Le développement des systèmes récents présente une complexité croissante des comportements. Cela implique deux problèmes : Premièrement, il devient de plus en plus difficile d'ignorer le fait que la plupart des systèmes sont hybrides. Généralement, dans un système hybride, deux types de capteurs peuvent être disponibles, notamment les capteurs continus fournissant des lectures en temps continu, c'est-à-dire des nombres réels, et les capteurs discrets fournissant des sorties discrètes. Deuxièmement, les systèmes sont exposés à des défaillances. L'entretien et la réparation sont devenus une partie importante du coût total du produit final. Des techniques de diagnostic et de pronostic efficaces doivent être adoptées pour détecter, isoler et anticiper les fautes.

Les exigences rigoureuses de fiabilité et de maintenabilité des systèmes complexes modernes, exigent le développement de méthodes systématiques de détection et d'isolement des fautes. Le diagnostic des pannes est essentiel pour garantir la sécurité du système grâce à une commande adaptative aux pannes. Lorsque le système est dans un tel état, il est dit en mode de défaillance. Avant cet état, il peut être soit en mode nominal, soit après l'apparition d'une ou plusieurs fautes en mode défectueux ou en mode de dégradation. Cette tâche de diagnostic

est difficile dans les systèmes hybrides avec des comportements combinés continus et discrets, car les changements de mode rendent la diagnosticabilité difficile à réaliser.

L'objectif de la fonction de diagnostic est de déterminer les causes et de localiser les organes et les éléments qui vont entraîner et provoquer la dégradation du système. Cette fonction se délite en deux fonctions élémentaires : la localisation permettant de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant, et l'identification de la cause qui consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale, ces causes peuvent être internes ou bien externes à l'équipement.

Dans ce rapport, nous avons présenté les principales méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques, à savoir les méthodes sans modèle et les méthodes à base de modèle. Notre méthode proposée sera basée sur un modèle qualitatif qui est les réseaux de Petri hybrides. Les réseaux de Petri sont un outil mathématique et graphique qui s'applique à un nombre très important de domaines dont les notions d'événements et d'évolutions simultanées sont intéressantes.

Généralement, les outils de diagnostic des fautes sont divisés en méthodes basées sur un modèle et méthodes sans modèle. Dans notre cas, une approche qualitative, qui est basée sur un modèle décrit par les réseaux de Petri hybrides, a été développée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides.

Puisque les classes des systèmes hybrides sont nombreuses, nous avons choisi d'appliquer notre méthode sur les systèmes industriels hybrides à flux continu. Cette méthode peut être généralisée, par la suite, pour les autres classes des systèmes hybrides. Ce point est défini comme perspective de notre travail de recherche.

Ce rapport de thèse a pour objectif de présenter notre travail de recherche intitulé : Développement d'une méthode de diagnostic des systèmes industriels hybrides. Pour ce faire, nous avons présenté ce travail en trois parties, chaque partie contient deux chapitres.

Dans la première partie, le premier chapitre présente un aperçu général sur les systèmes dynamiques, à savoir les systèmes continus et les systèmes à événements discrets. Nous y

avons présenté nos travaux, qui ont fait l'objet de trois articles scientifiques, ces articles analysent la tendance de la recherche scientifique pour les systèmes à événements discrets tout en justifiant le choix de notre sujet de thèse. Le deuxième chapitre de cette partie concerne les systèmes dynamiques hybrides et la classe de ces systèmes qu'on a choisis pour appliquer notre méthode de diagnostic.

La partie B de ce manuscrit représente le diagnostic des systèmes dynamiques. Dans le premier chapitre de cette partie, nous avons introduit, tout d'abord, un lexique concernant le diagnostic des systèmes et nous avons cité les principales méthodes de diagnostic, à savoir les méthodes sans modèle et les méthodes à base de modèle. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur le diagnostic des systèmes dynamiques qui a fait l'objet d'un article scientifique.

La dernière partie de ce rapport est aussi constituée de deux chapitres. Le premier a pour objectif de détailler l'outil de modélisation « Réseaux de Petri » utilisé dans notre méthode de diagnostic. Le deuxième chapitre de la partie C présente le travail, élaboré dans un article scientifique publié dans un journal de la base de données Inderscience, ce travail de recherche propose une méthode pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybride.

## **PARTIE A : Systèmes hybrides**

## **Introduction**

Traditionnellement, l'automatique traite différemment les problèmes de type continu et ceux de type discret. Ainsi, deux spécialités distinctes sont introduites : l'automatique des systèmes continus et l'automatique des systèmes à événements discrets. Les trajectoires des systèmes continus correspondent aux solutions d'une équation différentielle et les trajectoires des systèmes à événements discrets correspondent aux itérations d'une fonction. Un système est dit hybride lorsqu'il fait intervenir à la fois la dynamique continue et la dynamique discrète.

Pour garantir le bon fonctionnement des systèmes industriels qui sont en général complexe et qui font intervenir les systèmes continus et les systèmes discrets, il est nécessaire de prendre en compte les aspects continus et discrets de ces systèmes.

Dans cette première partie, nous présentons les systèmes continus et les systèmes à événements discrets, pour ces derniers, nous avons fait une analyse de la tendance de la recherche scientifique qui est présentée dans le premier chapitre de cette partie. Dans le deuxième chapitre, les systèmes dynamiques hybrides sont présentés ainsi que la classe des systèmes hybrides considérée.

## Chapitre 1 : Systèmes dynamiques

### 1. Systèmes continus et systèmes à événements discrets

#### 1.1 . Systèmes continus

Les systèmes continus sont des systèmes constitués d'éléments caractérisés par une ou plusieurs mesures qui peuvent prendre des valeurs réelles lorsque le temps évolue, les grandeurs physiques sont généralement continues et de nature analogique (Voir figure 1). Ces grandeurs peuvent être une position, une vitesse, une accélération, un niveau, une pression, une température, un débit, une tension, etc.

Le comportement de ces systèmes est décrit par une représentation mathématique, fonction des grandeurs physiques, donnée sous forme d'un modèle d'entrée/sortie ou d'espace d'état.

La gestion de ces systèmes fait appel à des outils mathématiques aptes à la représentation de la dynamique continue comme les équations différentielles.

Les systèmes continus sont très répandus dans les procédés chimiques où toutes les variables d'état sont des variables continues telles que le débit, la concentration, l'état d'un réservoir, l'état d'une vanne analogique, etc.

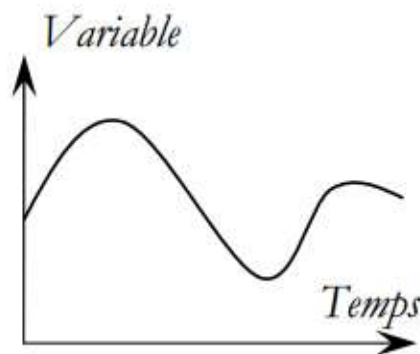


Figure 1: Evolution d'une variable d'état dans un système continu

Formellement, un système continu est un 5-tuplet [1]:

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

- $T \in \mathbb{R}$  est l'intervalle du temps ;

- $X \subseteq \mathbb{R}^n$  est l'espace d'état continu ;
- $X_0 \subseteq X$  est l'espace d'état initial du système continu ;
- $U \subseteq \mathbb{R}^r$  est le vecteur de commande ;
- $\Phi$  est le vecteur champ déduit par l'équation différentielle de la forme.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) ; x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

$F : X \rightarrow \mathbb{R}^n$  vecteur champ continu

Exemple d'un système continu :

On considère le système de la figure 2, constitué d'un réservoir d'eau, de niveau constant, vidangé par un tuyau. Une vanne placée à l'extrémité du tuyau permet de faire varier le débit  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Un autre tuyau est placé à l'intérieur du réservoir qui contient un colorant et qui permet d'obtenir un mince filet fluide coloré au centre du tuyau.

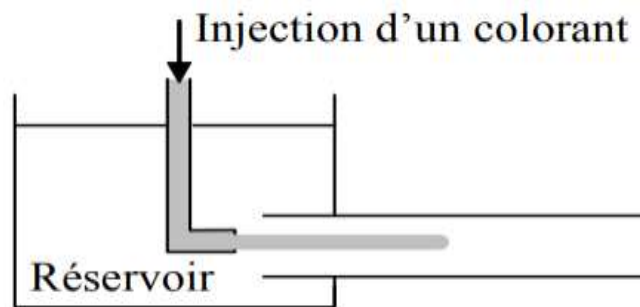


Figure 2: Exemple d'un système continu

## 1.2 . Systèmes à événements discrets

Les systèmes à événements discrets sont des systèmes à espace d'états discrets dont les transitions entre les états sont associées à l'occurrence d'événements discrets asynchrones, cette commutation d'état est liée à la fin de certaines tâches et le début d'autres tâches (Voir figure 3). Ces événements peuvent être un changement dans un signal provenant d'un capteur, l'arrivée ou le départ d'une ressource, le démarrage ou l'arrêt d'un actionneur, etc.



Ces systèmes ont été introduits à la fin des années 1970 et ils constituent une classe très importante des systèmes dynamiques industriels.

Les automates à états finis et les réseaux de Petri sont parmi les modèles qui ont été proposés pour l'analyse et la commande de ces systèmes. Les systèmes à événements discrets, qui ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, sont des systèmes qui mettent en jeu des informations qui ne sont prises en compte qu'à des moments précis.

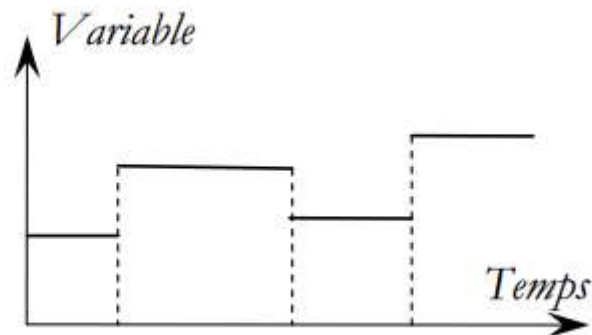


Figure 3: Evolution d'une variable d'état dans un système à événement discret

Formellement, un système événements discrets est un 5-tuplet [1] :

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

- $T \in \mathbb{R}$  est l'intervalle du 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 d'un système à événements discrets :

On considère l'exemple de la figure 4, le système est constitué d'un réservoir et d'une vanne pneumatique située commandée en tout-ou-rien, permet de prélever du liquide pour utilisation. La vanne TOR est considérée comme un système à événement discret.

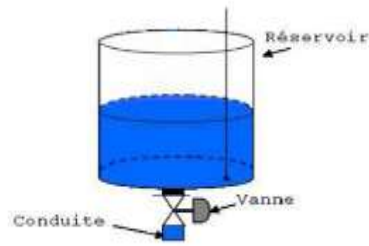


Figure 4: Exemple d'un SED

## 2. Quelques propriétés des systèmes dynamiques

### 2.1 . Déterministe/Non-déterministe

Un système déterministe [2] est un système qui réagit toujours de la même manière à l'occurrence d'une séquence des événements. L'état du système est décrit par un processus bien défini, c'est-à-dire qu'à partir d'un état donné, son évolution sera toujours identique après l'occurrence d'une séquence des événements.

Un système est non-déterministe [2] si une ou plusieurs de ses variables de sortie sont des variables aléatoires. Un cadre probabiliste est requis pour l'étude de ces systèmes.

### 2.2 . Linéaire/ Non linéaire

Un système est dit linéaire si pour deux entrées  $u_1(t)$  et  $u_2(t)$  qui produisent respectivement les sorties  $y_1(t)$  et  $y_2(t)$ , c'est-à-dire,  $f(u_1(t)) = y_1(t)$  et  $f(u_2(t)) = y_2(t)$  et  $a_1$  et  $a_2$  sont deux constantes. On a :  $f(a_1 * u_1(t)) + f(a_2 * u_2(t)) = a_1 * y_1(t) + a_2 * y_2(t)$

Le système linéaire a une caractéristique importante : Si l'entrée du système est nulle, il génère une sortie nulle. Si le système génère une ou quelques sorties (non nulles) en réponse à l'entrée avec une valeur zéro, alors le système est dit système non linéaire. Les systèmes non linéaires sont plus difficiles à étudier que les systèmes linéaires.

### 2.3 . Structure de prise de décision : Centralisée/ Décentralisée

L'approche centralisée est une approche où il existe un seul module d'analyse ou de décision qui collecte et analyse les informations globales issues du processus.

L'approche décentralisée est une approche dans laquelle existent plusieurs structures élémentaires de prise de décision du même type. Chacune de ces structures recueille une partie de l'information globale. La décision globale est obtenue en effectuant un calcul fonctionnel sur toutes les décisions des structures élémentaires.

### 3. Analyse de la tendance de la recherche scientifique des systèmes

#### 3.1 . Problématique et méthodologie

La théorie des systèmes hybrides a été largement appliquée dans plusieurs domaines industriels notamment l'industrie chimique et les systèmes manufacturiers. Par conséquent, les systèmes hybrides représentent un axe de recherche en pleine expansion faisant l'objet de beaucoup de travaux scientifiques et reçoivent beaucoup d'attention les deux dernières décennies.

Les questions qui se posent sont : Pourquoi nous avons choisi d'étudier le diagnostic des systèmes hybrides par réseaux de Petri hybrides ? Pourquoi d'abord le diagnostic des systèmes et non pas un autre axe de recherche tel que le contrôle, la supervision, la robustesse, etc... ?

Notre équipe de recherche a fait un travail minutieux sur les systèmes à événements discrets, que nous avons pu étendre sur les systèmes hybrides, et donc avant de répondre aux questions évoquées dans le paragraphe précédent, nous présentons dans le paragraphe suivant le travail que nous avons effectué sur les systèmes à événements discrets.

Nous avons collecté plus de 2000 articles publiés lors des trois dernières décennies, dans des journaux indexés (Scopus ou Thomson Reuters), afin de définir la tendance de la recherche scientifique en relation avec les systèmes à événements discrets. Une classification et une comparaison ont été faites dans le but d'extraire l'axe de recherche le plus actif, pour permettre aux nouveaux chercheurs de se focaliser sur les domaines les plus intéressants. Ce travail a été traduit par trois articles que nous avons publiés [3-5].

Cette classification a été faite en fonction de :

- Outils de modélisation : outils mathématiques[5]; langages à savoir le langage formel et le LADDER [3]; outils graphiques à savoir les réseaux de Petri [4].

- Domaines d'application : Modélisation, contrôle, surveillance, diagnostic, supervision, robustesse, simulation)
- Structure de prise de décision : Centralisée / Décentralisée
- Type des données du système : Déterministes / Non-déterministes.

Afin de faciliter la lisibilité de nos résultats, nous avons opté pour des graphes. En premier lieu, nous avons représenté, par des histogrammes, le nombre des articles traitant les différents outils de modélisation (Automates finis, RdP et les autres outils de modélisation) en fonction de leurs années de publication (figure 6). Ensuite, dans la figure 9, nous avons tracé les courbes représentant la variation des pourcentages des articles publiés dans chaque domaine de recherche en fonction de leurs années de publication, ainsi que la courbe linéaire de chacune, afin de comparer leurs progressions.

Selon la pente de ces courbes de tendance, un axe de recherche peut avoir trois cas de figure (figure 5) :

- Axe de recherche actif si la courbe est toujours en croissance ;
- Axe de recherche saturé si la courbe est décroissante dans les dernières années ;
- Axe de recherche presque saturé si la courbe devient constante dans les dernières années.

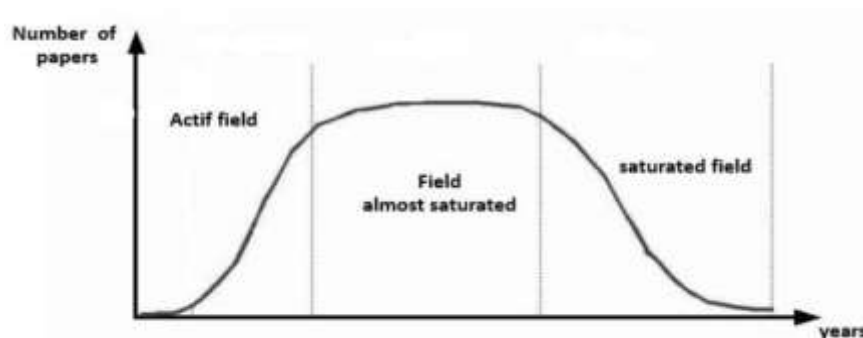


Figure 5: Interprétation des courbes

### 3.2 . Interprétation des résultats

D'après la figure 6, le nombre des articles qui ont utilisé les automates finis est très important par rapport aux autres outils de modélisation vu que cet outil a constitué la base des premiers travaux dans le domaine des systèmes à événements discrets. Et il est clair que l'utilisation des réseaux de Petri est de plus en plus croissante dans les dernières années.

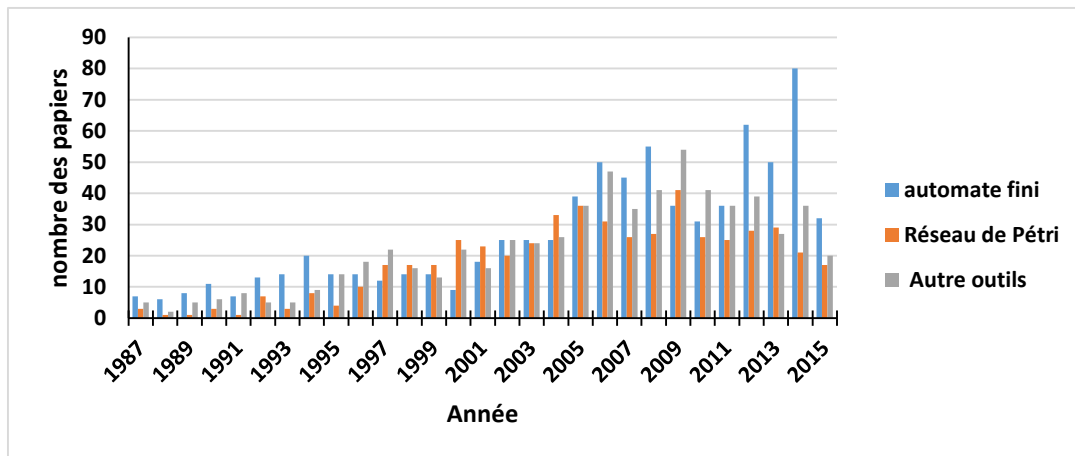


Figure 6: Outils de modélisation en fonction des années de publication

Les Figures 7 et 8 montrent que les architectures centralisées déterministes font l'objet de la majorité des papiers scientifiques en relation avec les SED.

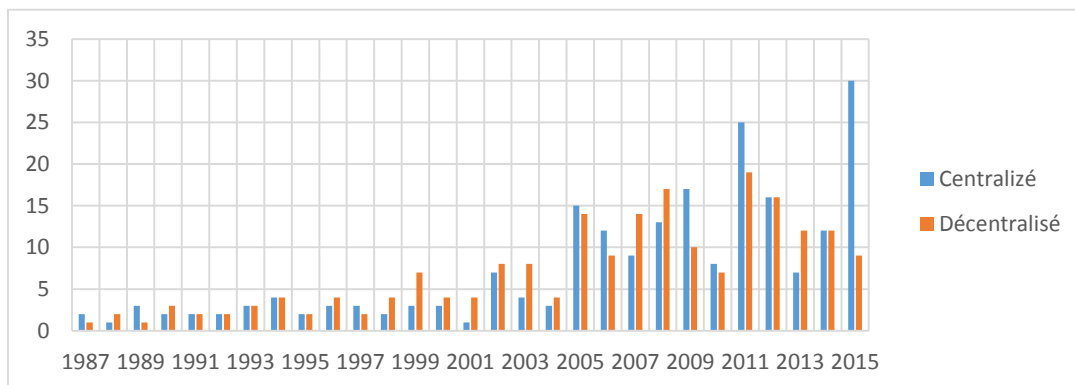


Figure 7: Nombre d'articles selon l'architecture de prise de décision

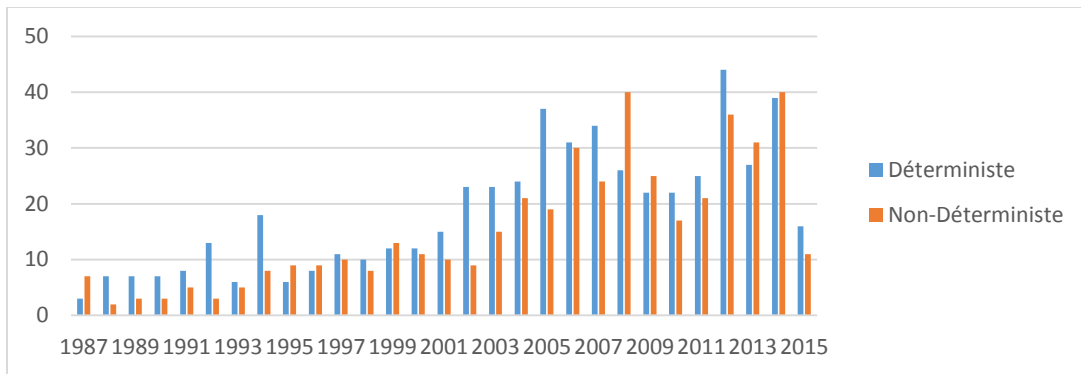


Figure 8: Nombre d'articles selon le type du système

Dans la figure 9, on a tracé la variation des pourcentages des articles publiés dans les différents domaines en fonction de leurs années de publication, et sur le même graphique, on a représenté leurs courbes de tendance linéaires.

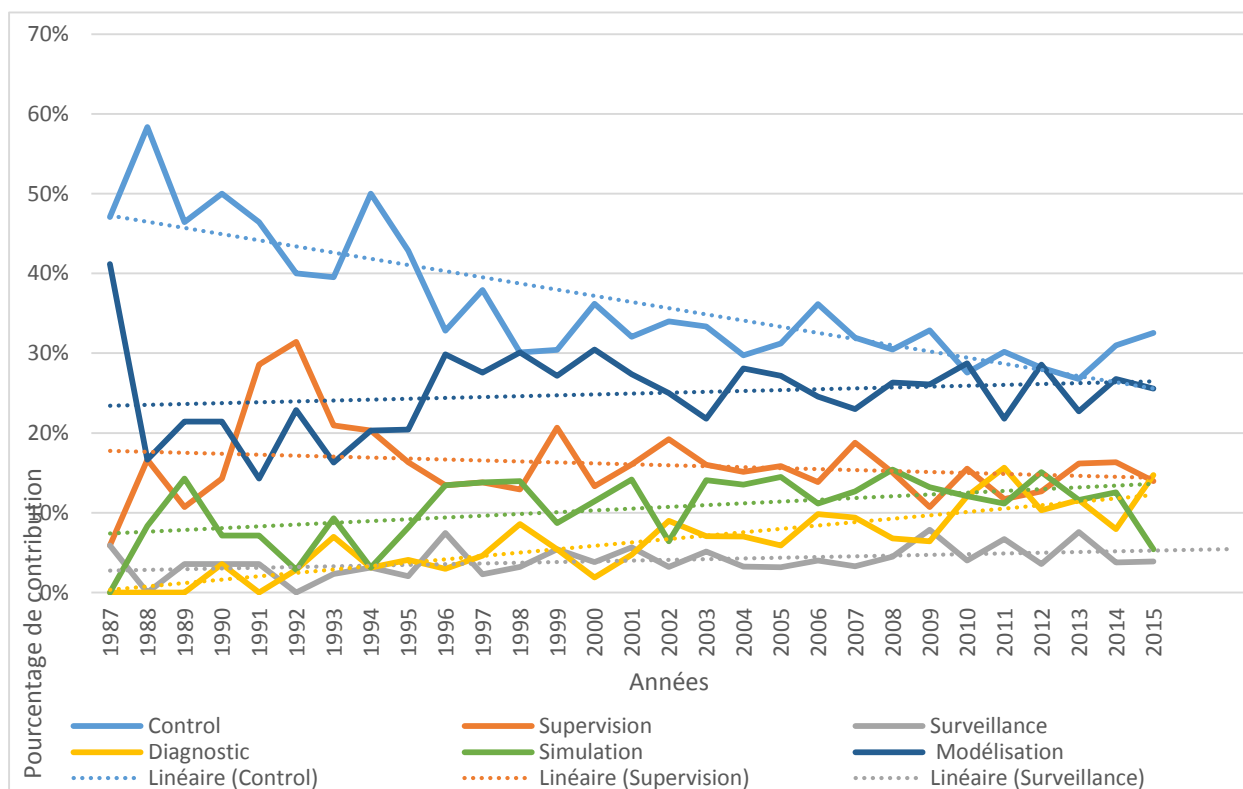


Figure 9: Variation des pourcentages des articles publiés dans les différents domaines en fonction des années

On remarque donc que :

- La courbe de tendance du contrôle est en décroissance ;
- Les courbes de tendance de la supervision et de la surveillance ont des allures quasiment constantes ;
- Les courbes de tendance de la modélisation et de la simulation ont des allures croissantes ;
- La courbe de tendance du diagnostic a une pente fortement croissante par rapport à celles de la modélisation et de la simulation.

Ce travail traduisant l'état de l'art sur les systèmes à événements discrets a été l'objet de trois [4] [5] [6] articles élaborés par notre équipe de recherche. Ces articles ont eu comme conclusion que l'utilisation de l'automate et des réseaux de Petri pour le diagnostic des systèmes à événements discrets déterministes constitue l'axe de recherche le plus actif actuellement.

Dans la mesure où la plupart des systèmes industriels sont des systèmes complexes qui font appel à l'aspect discret et à l'aspect continu, et puisqu'on cherche à traiter un sujet qui se focalise sur les domaines récents et intéressants, on peut donc répondre aux questions posées dans le paragraphe précédent et introduire notre méthode de diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides.

## Chapitre 2 : Systèmes dynamiques hybrides

### 1. Introduction

Traditionnellement, l'automatique traite différemment les problèmes de type continu et ceux de type discret. Ainsi, deux spécialités distinctes sont introduites : l'automatique des systèmes continus et l'automatique des systèmes à événements discrets. Les systèmes continus se caractérisent par une évolution continue de leur état dans le temps. Les grandeurs utiles sont analogiques et les modèles utilisés sont essentiellement les fonctions de transfert ou les équations d'état. Les fonctions principales de l'automatique continue sont du type régulation et asservissement. Tandis que l'état des systèmes à événements discrets prend ses valeurs dans un ensemble dénombrable et évolue de manière discrète et discontinue. Les modèles utilisés sont classiquement les modèles de la logique séquentielle, les graphes d'état, les réseaux de Pétri ou le GRAFCET.

Pour garantir le bon fonctionnement des systèmes industriels qui sont en général complexe et qui font intervenir les systèmes continus et les systèmes discrets, il est nécessaire de prendre en compte les aspects continus et discrets de ces systèmes.

Les classes des systèmes hybrides sont très nombreuses, et dans ce chapitre, nous présentons les principales classes de ces systèmes ainsi que leurs caractéristiques.

Un système dynamique hybride est un système pour lequel les dynamiques discrètes et continues interagissent. Cette interaction détermine le comportement du système (figure 10).

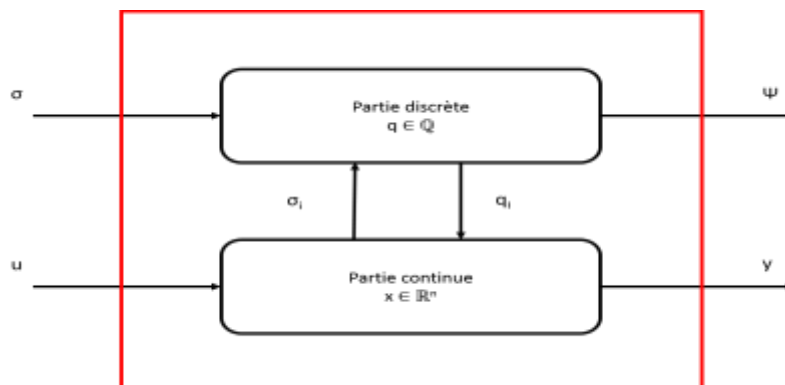


Figure 10: SDH (Interaction continu/discret)



Formellement, un système dynamique hybride est un 5-tuplet [1] :

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

- $T \in \mathbb{R}$  est l'intervalle du temps ;
- $(x, q) \subseteq X, Q$  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 ;
- $\Phi : X \times Q \rightarrow \mathbb{R}^n$  définit un sous-ensemble des trajectoires pour chaque état discret.

## 2. Classes des systèmes dynamiques hybrides

Les classes des systèmes dynamiques hybrides sont nombreuses, on a pu les rassembler dans six classes : [7]

### 2.1. Systèmes hybrides par la commande

Un système hybride par la commande est un système continu, commandé ou supervisé par un système à événements discrets. On peut retrouver cette classe dans plusieurs travaux [8].

Exemple : Système thermique [9]

Dans cet exemple, on considère un thermostat utilisé pour maintenir la température dans une pièce [9], il est composé d'un élément chauffant et d'un capteur de température. Les seuils inférieur et supérieur du thermostat sont fixés à des valeurs  $\theta_{\min}$  et  $\theta_{\max}$  tels que  $\theta_{\min} < \theta_{\max}$ . Le comportement hybride du système est imposé 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  $\theta_{\min}$ . Le chauffage est arrêté lorsque le capteur détecte le seuil supérieur  $\theta_{\max}$  et il reste en arrêt jusqu'au moment où la température descend en-dessous de  $\theta_{\min}$ . 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. (Figure 11.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 :

$$\dot{\theta} = \begin{cases} -k(\alpha - \theta), & \text{Si le chauffage est en marche} \\ -k\theta, & \text{Si le chauffage est en arrêt} \end{cases} \quad (2)$$

Où  $\alpha \in \mathbb{R}$  est une constante réelle positive qui dépend de la puissance du système de chauffage, et  $k$  est une constante déterminée par la pièce. Ainsi, l'évolution de la température est contrainte par une équation d'état qui dépend de l'état discret « Marche » ou « Arrêt ». La figure 11.a représente un exemple d'évolution.

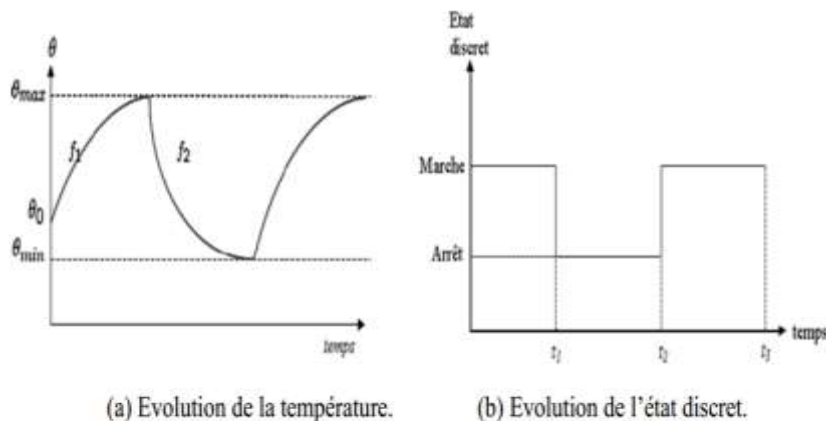


Figure 11: Evolutions continue et discrète du système de chauffage

## 2.2. Systèmes continus comportant des discontinuités

Lorsque l'état du système passe instantanément de sa valeur courante à une autre valeur, on parle de phénomènes de discontinuités. Ce phénomène de commutation est illustré dans 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 un saut.

Exemple : Balle en rebondissement [7]

On considère l'exemple d'une balle en chute libre qui rebondit sur le sol de façon élastique (Figure 12). La position initiale de la balle est  $(0, y_0)$ . La vitesse instantanée  $v(t)$  de la balle a deux

composantes  $v_y$  et  $v_x$ . Quand la balle arrive au sol, elle rebondit et la composante de la vitesse  $v_y$  change de signe.

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

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

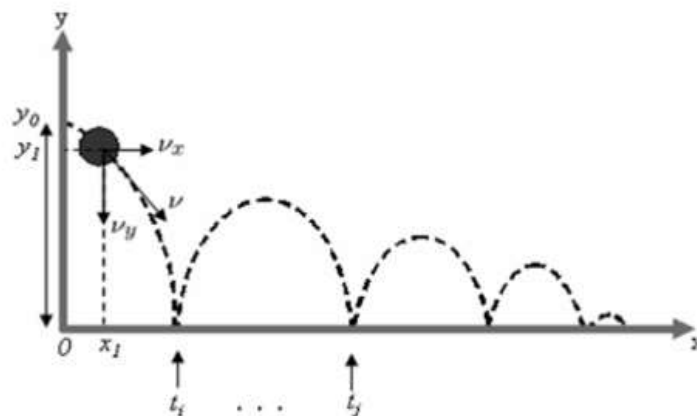


Figure 12: Balle en rebondissement

### 2.3. Systèmes comportant des éléments continus et discrets

Quelques systèmes sont constitués intrinsèquement d'éléments de type « continu » dont les variables contraintes ou produites ont une évolution continue, et d'éléments de type « discret » dont 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 [10]

Le système illustré par la figure 13 est composé d'une source de courant, d'une diode D, d'une résistance  $R_1$ , d'un interrupteur Sw, et d'une self L [10].

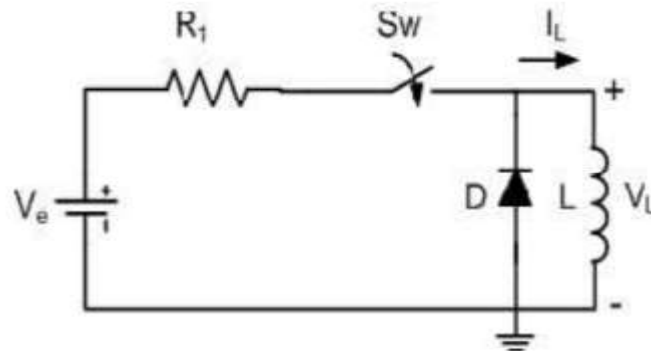


Figure 13: Circuit électrique intrinsèquement hybride

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant  $I_L$  traversant la self génère un flux magnétique  $\emptyset_0$ . 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  $\emptyset_0$  à 0. Cette variation du flux entraîne l'apparition d'une force électromotrice (f.e.m) selon la loi  $f.e.m = \frac{d\emptyset}{dt}$  donc d'un courant induit  $I_i$ . Le rapport  $\frac{d\emptyset}{dt}$  est important, la différence de potentiel  $V_L$  (qui est la f.e.m) aux bornes de la self est donc importante.

La diode est alors passante car le courant  $I_L$  généré par la self est supérieur au courant du seuil  $I_s$  de la diode (figure). 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 14. 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  $\emptyset$  à 0.

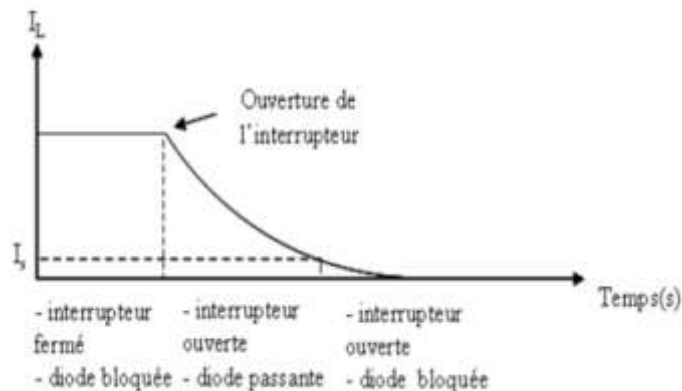


Figure 14: Evolution du courant dans la self

#### 2.4. Systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction

Des fois, la modélisation nécessite l'utilisation de fonctions non-linéaires difficiles à manipuler, c'est le cas des phénomènes physiques complexes. Certains travaux proposent d'introduire des phénomènes discrets au sein de l'évolution continue afin de simplifier la modélisation [9].

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 système dynamique hybride. 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 [7]

On considère l'exemple de la figure 15, le système est constitué d'un réservoir de section  $S$  muni d'une conduite  $C$ . Une vanne pneumatique  $V$  (Figure 16) située sur  $C$  et commandée en tout-ou-rien, 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.

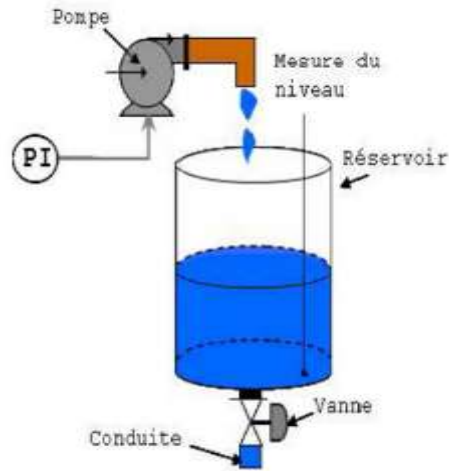


Figure 15: Système hydraulique

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

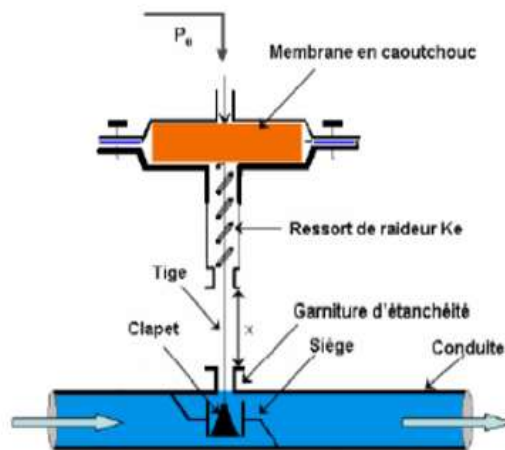


Figure 16: Vanne pneumatique

Lors d'une commande d'ouverture (passage de  $x=0\%$  à  $x=100\%$ ), l'évolution continue de  $x$ , donc  $\dot{x}$ , 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.

### 2.5. 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 [11].

Exemple : Système de production

Le système illustré par la figure 17 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 encours 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 sous forme d'équation d'état :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (3)$$

Où  $x = [x_1 ; \dots ; x_i ; \dots ; x_n]$ , représente le niveau des 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 de ressources. L'occurrence de l'un de ces événements entraîne le changement de l'état discret : flux d'entrée démarré, flux d'entrée arrêté, machine 1 en marche ou en arrêt, etc.

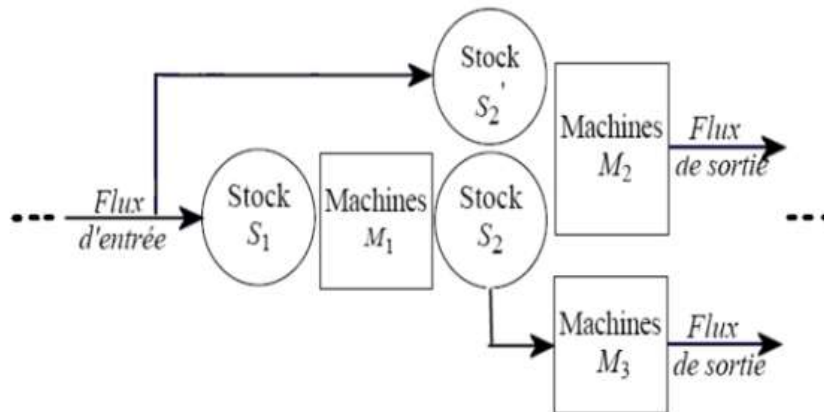


Figure 17: Architecture générique d'un système de production

## 2.6. Systèmes complexes composés de sous-systèmes continus et discrets

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

### Exemple : Procédés Batch

Les procédés Batch sont constitués intrinsèquement de plusieurs sous-systèmes hybrides. Chacun de ces sous-systèmes peut présenter les caractéristiques citées précédemment. La figure 18 présente un schéma simplifié d'une chaîne de fabrication de produits chimiques, composée de trois réservoirs  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , des vannes  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  et  $V_5$ , des pompes  $P_1$  et  $P_2$ , d'un thermostat, d'un agitateur, d'un réacteur, d'un convoyeur et des stocks  $S_1$  et  $S_2$ . Les vannes permettent de fournir des produits qui seront mélangés à d'autres produits dans les réservoirs  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ . Les vannes, les pompes, la résistance thermique, l'agitateur et le convoyeur sont commandés en tout-ou-rien.



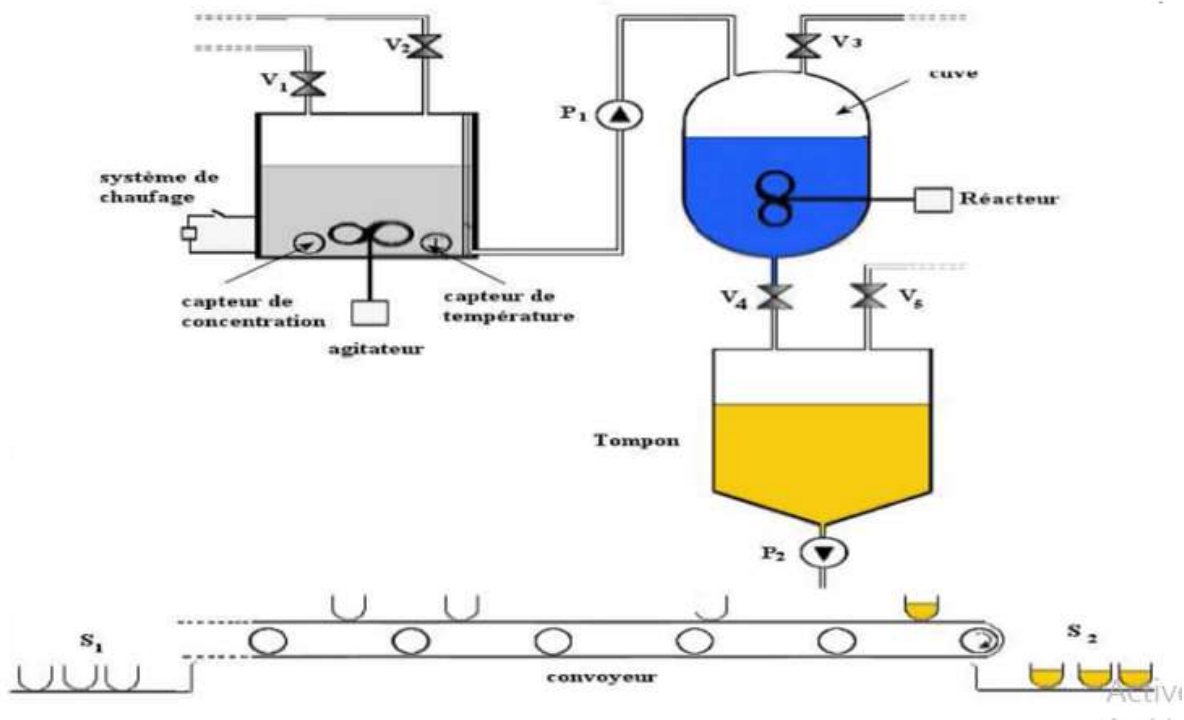


Figure 18: Procédés Batch

L'objectif du procédé est de produire, à partir de deux produits A et B un produit chimique D. Les produits A et B fournis à travers les vannes  $V_1$  et  $V_2$  au réservoir  $T_1$  sont d'abord mélangés et ensuite chauffés. Le mélange de A et B est alors transporté au réservoir  $T_2$  où il réagit avec un autre produit C. Le produit résultant est ainsi transporté dans le réservoir  $T_3$ , attendant pour remplir les bouteilles vides qui sont ensuite transportées par le convoyeur servi par le stock  $S_1$ . La nature hybride du système est clairement illustrée dans cet exemple, d'abord il contient des processus discrets (l'état des stocks  $S_1$  et  $S_2$ ) et des processus continus (l'évolution des niveaux, la température, la concentration des produits dans le réservoir 1). En plus, il est piloté par une commande discrète de type tout-ou-rien [9].

### 3. La classe des systèmes hybrides considérée

Dans ce travail nous nous intéressons à une sous classe de SDH, appelée, systèmes à flux continu (SàFC). Ces systèmes ont les trois caractéristiques suivantes :

- Positif : Un système dynamique est dit positif si toutes ses variables d'état prennent toujours des valeurs positives dans le temps, la positivité est souvent une conséquence de la nature du système.
- Linéaire : On considère des systèmes dont les variables continues sont linéaires.
- La partie discrète contrôle la partie continue, dans le sens où la configuration de la partie discrète est complètement autonome et influe sur celui de la partie continue.

Notre approche de diagnostic citée dans la partie C, basée sur cette classe des systèmes hybrides, pourra être généralisée pour tous les systèmes industriels hybrides. Cela constitue une de nos perspectives dans le futur.

Les exemples des SàFC sont nombreux, nous pouvons citer ici quelques exemples : une machine qui contrôle un flux de production, un feu tricolore qui contrôle un flux de véhicules, une décision de routage qui contrôle le flux d'écoulement de messages, ...etc. Nous présenterons dans la suite deux exemples de SàFC, le premier est un système de bacs où l'état (discret) de la vanne contrôle le flux (continu) du liquide et le second est un système manufacturier traitant un flux (continu) de produits contrôlé par l'état de la machine.

Exemple : Système de bacs[12]

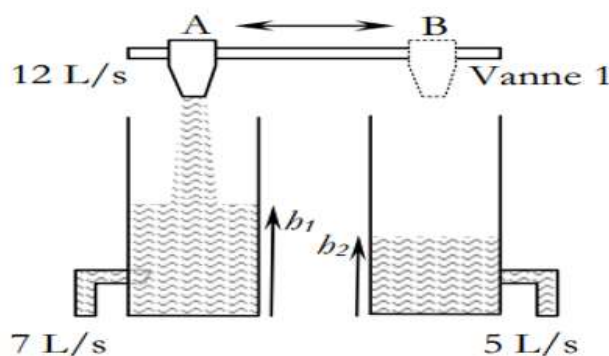


Figure 19: Système de bacs

Soit le système de bacs schématisé en figure 19. Ce système comporte deux bacs dont le débit est de 5 et 7 litres/seconde respectivement. Les bacs sont aussi alimentés à tour de rôle, avec une vanne dont le débit est 12 litres/seconde. Cette dernière à deux positions, quand elle est en position

A, elle alimente le bac1 et elle alimente le bac2 en position B. Dans ce système les variables d'état continues positives sont  $h_1$  et  $h_2$  les volumes du liquide dans les bacs. Le comportement des variables  $h_1$  et  $h_2$  est contrôlé par la variable discrète, position de la vanne.

Exemple : Système manufacturier [12]

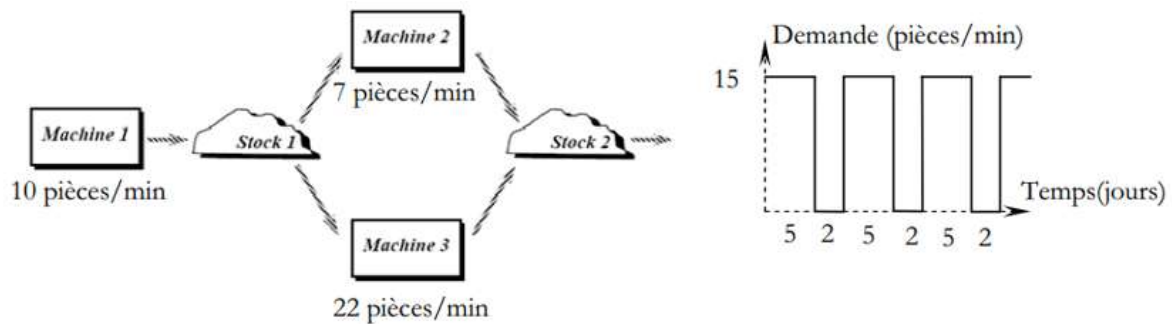


Figure 20: Système manufacturier

La figure 20 représente un système manufacturier comportant 3 machines et 2 stocks tampons. Ce système est utilisé pour satisfaire une demande périodique comme indiqué sur la figure 20. Les machines 1 et 2 restent opérationnelles en permanence, tandis que la machine 3 peut être arrêtée. Les machines ont des taux de fabrication de 10, 7, et 22 pièces/min respectivement. Dans ce système les contenus des stocks sont des variables d'état continues, positives et linéaires. L'état continu du système dépend des variables discrètes : 1) l'état de la machine 3, qui peut prendre deux valeurs : arrêt et marche ; et 2) l'état de la demande qui prend deux valeurs 15 pièces/min et 0 pièces/min.

## **Conclusion**

Dans cette première partie, en premier lieu nous avons présenté les systèmes continus et les systèmes à événements discrets. Quelques propriétés utiles pour la bonne compréhension du manuscrit ont été introduites. En deuxième lieu, nous avons fait une analyse de la tendance de la recherche scientifique des systèmes à événements discrets pour en déduire le choix de notre sujet de thèse.

Dans le deuxième chapitre de cette partie, les systèmes dynamiques hybrides sont présentés ainsi que leurs différentes classes. Quelques exemples, de la classe des systèmes hybrides considérée pour la suite de notre travail, sont illustrés.

Pour garantir le bon fonctionnement des systèmes industriels qui sont en général complexes et qui font intervenir les systèmes continus et les systèmes discrets, il est donc nécessaire pour les entreprises d'implémenter un système de diagnostic très efficace.

## **PARTIE B : Diagnostic des systèmes dynamiques**

## **Introduction**

Les systèmes industriels ont des structures automatiques très complexes, plus le système est complexe plus il est exposé à l'apparition des pannes. Il est donc nécessaire pour les entreprises d'implémenter un système de diagnostic efficace.

L'objectif de la fonction de diagnostic est de déterminer les causes et de localiser les organes et les éléments qui ont entraîné et provoqué la dégradation du système. Cette fonction se délite en deux fonctions élémentaires : la localisation permettant de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant, et l'identification de la cause qui consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale, ces causes peuvent être internes ou bien externes à l'équipement.

Dans le premier chapitre de cette partie, en premier lieu, nous avons essayé de collecter le lexique des termes en rapport avec le diagnostic afin de faciliter la compréhension du manuscrit. En deuxième lieu, nous avons présenté les principales méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques, à savoir les méthodes à base de modèle (quantitatives et qualitatives) et les méthodes sans modèles (quantitatives et qualitatives). Un état de l'art sur les différentes méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques et en particulier les systèmes dynamiques hybrides est présenté dans le deuxième chapitre, ce travail fait l'objet d'un article scientifique que nous avons publié en septembre 2017 [13].

## Chapitre1 : Méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques

### 1. Terminologies

Avant de parler des différentes méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques, il est important d'établir un lexique sur les différentes terminologies qui ont un rapport avec le concept de diagnostic. Les définitions ci-après, sont extraites de plusieurs travaux à savoir [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21, 22], nous avons essayé de choisir celles les mieux adaptées à notre travail de recherche puisqu'il y en a une multitude dans la littérature.

#### a. Faute

C'est un événement qui empêche le bon fonctionnement du système en perturbant son comportement. La faute peut causer la dégradation d'une des fonctions de l'équipement ou la non-prise en compte correcte de l'une des spécifications exprimées dans le cahier des charges.

#### b. Défaut

C'est un écartement non-souhaité du système ou de l'équipement par rapport à son comportement normal. Un défaut est donc une anomalie qui concerne une ou plusieurs propriétés du système, pouvant aboutir à une défaillance et parfois à une panne.

#### c. Dégradation

On parle de dégradation si on perd des performances de l'une des fonctions assurées par le système. La dégradation est liée à des causes directes, telle que le temps, l'usage... et à des causes indirectes, telle que la température, l'humidité...

Quand les performances atteignent le seuil d'arrêt qui est défini par les spécifications fonctionnelles de l'équipement, on ne parle plus de dégradation mais plutôt d'une défaillance.

#### d. Défaillance

Une défaillance est une anomalie altérant ou empêchant l'aptitude d'un équipement à accomplir la fonction ou les fonctions souhaitées définies par les spécifications fonctionnelles.

Les défaillances peuvent être classées selon leur degré de rigueur :

- Défaillance critique : nécessite une intervention d'urgence ;
- Défaillance significative : nécessite un processus de traitement ;
- Défaillance absorbable : pouvant être ignorée dans un premier temps.

Une défaillance implique l'existence d'un défaut et elle correspond à un passage d'un état à un autre contrairement à une panne qui est un état. Cet état de panne peut être appelé un mode de défaillance.

#### e. Panne

On parle de panne quand le système est incapable d'assurer une fonction requise et elle peut provoquer son arrêt complet. On distingue deux types de pannes :

- Les pannes permanentes : une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.
- Les pannes intermittentes : le système peut retrouver son fonctionnement nominal après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente.

Une panne est due à une erreur de conception ou, d'après la définition précédente, c'est la conséquence d'une défaillance. La défaillance correspond à une date bien précise tandis que la panne a une durée qui commence à la date d'occurrence de la défaillance et se termine à la date de fin de réparation. Une panne c'est la cause de l'apparition des symptômes.

#### f. Symptôme, observation, mesure

Un symptôme c'est la conséquence d'un comportement anormal et il correspond à une ou plusieurs observations qui révèlent d'un dysfonctionnement.

Une observation est une information obtenue à partir du comportement ou du fonctionnement réel du système.



Une mesure est une observation élémentaire du fait qu'elle reflète une et une seule grandeur physique. Elle est représentée par une variable dont le contenu est l'image d'une grandeur physique. Son obtention s'effectue par l'intermédiaire de capteurs.

#### g. Mode de fonctionnement

Un mode de fonctionnement décrit le comportement du système afin d'atteindre un objectif spécifique. Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement. Parmi lesquels :

- Mode de fonctionnement nominal : c'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.
- Mode de fonctionnement dégradé : C'est le mode où il y a eu une dégradation dans l'équipement ou dans le système sans avoir une défaillance.
- Mode de défaillance : C'est le mode où il y a eu une défaillance soit après une dégradation ou une défaillance brusque. A chaque mode de défaillance, on associe une décision et une interprétation possible. Chaque équipement ou système ne peut posséder qu'un seul mode nominal ; par contre, il possède plusieurs modes de défaillance.

#### h. Surveillance

Un système de surveillance a pour premier objectif d'énoncer des alarmes, à partir des informations engendrées par les capteurs. L'objectif est d'informer l'opérateur de supervision sur l'apparition d'un ou plusieurs événements sensés affecter le bon fonctionnement du système.

La surveillance est donc un procédé informationnel qui consiste à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. Les principales causes qui induisent à surveiller un système sont la conduite et la maintenance.

#### i. Diagnostic

Selon l'AFNOR, Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

L'objectif de la fonction de diagnostic est de déterminer les causes et de localiser les organes et les éléments qui ont entraîné et provoqué la dégradation du système. Cette fonction se délite en deux fonctions élémentaires : la localisation permettant de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant, et l'identification de la cause qui consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale, ces causes peuvent être internes ou bien externes à l'équipement.

## 2. Méthodes de diagnostic des systèmes

### 2.1. Introduction

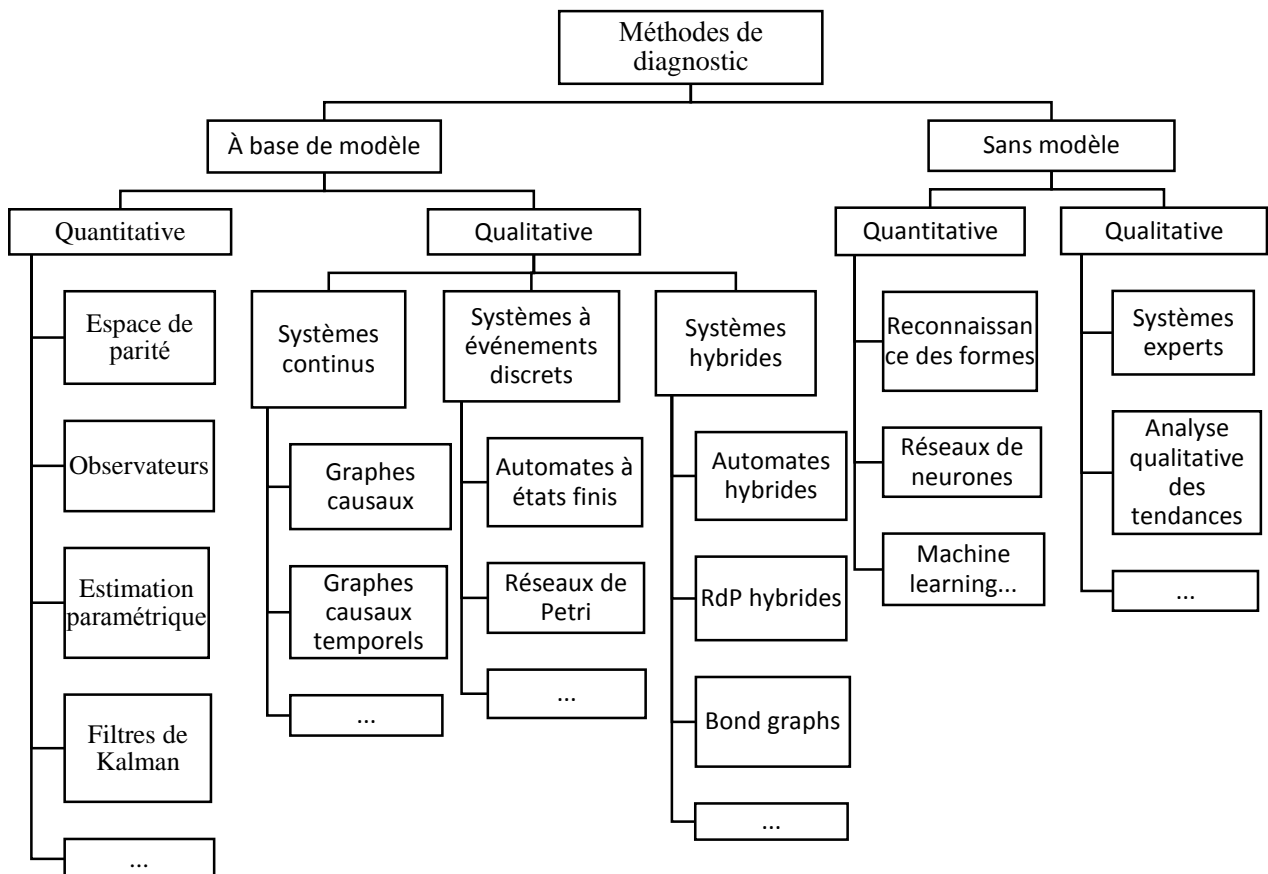


Figure 21: Méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques

Dans la littérature, plusieurs méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques ont été présentées. Ces méthodes sont classées selon les connaissances disponibles sur les systèmes et selon leurs représentations. Les méthodes de diagnostic sont divisées en deux axes principaux : Méthodes de diagnostic à base de modèle et méthodes de diagnostic sans modèle [23]. Les méthodes à base de modèles, appelées aussi méthodes internes, sont utilisées lorsque le fonctionnement du système étudié est bien connu, et les méthodes sans modèle sont utilisées lorsqu'on n'a pas assez d'informations sur le système considéré. Dans cette partie du manuscrit, nous avons essayé de présenter brièvement les méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques. Le schéma de la figure 21 représente une classification, non exhaustive, de ces méthodes. Les travaux [14] [24] [23] [25] [15] contiennent plus de détails sur ces méthodes.

## 2.2. Méthodes à base de modèle

Les méthodes à base de modèle sont diverses et elles sont utilisées lorsque le fonctionnement du système étudié est bien connu. Ces méthodes sont divisées en deux grandes catégories : Méthodes quantitatives et méthodes qualitatives.

### a. Méthodes quantitatives :

Les méthodes quantitatives [15] sont basées sur l'estimation de l'état, des paramètres ou de l'espace de parité, elles utilisent des modèles mathématiques qui permettent de décrire le comportement du système. On introduit la notion de résidu si l'on a un dépassement du seuil de l'écart entre les modèles mathématiques et les variables du système. Dans ce cas, une défaillance est alors détectée.

Lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence. Un résidu est alors généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connues, afin d'isoler et d'identifier la défaillance.

Parmi les différentes méthodes quantitatives de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous avons présenté l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique.

➤ Espace de parité

La méthode de l'espace de parité est basée sur le fait de vérifier la cohérence entre les entrées et les sorties du système surveillé, c'est-à-dire, entre les entrées connues telles que les consignes et le signal de commande, et les mesures issues des capteurs. Son nom provient du domaine de l'informatique où le contrôle de parité se faisait dans les circuits logiques [26] [27]

➤ Observateurs

La méthode des observateurs est basée sur la reconstruction de la sortie du système à l'aide d'observateurs et la comparer avec la sortie mesurée en utilisant l'écart entre ces deux fonctions (résidu). Cette méthode est appelée « en boucle fermée » et la méthode de l'espace de parité est appelée « en boucle ouverte » [28] [29].

➤ Estimation paramétrique

La méthode de l'estimation paramétrique suppose l'existence d'un modèle paramétrique qui décrit le comportement du système et suppose que les valeurs de ces paramètres, en fonctionnement nominal, soient connues. Elle consiste alors à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir des mesures des entrées et des sorties du système. Et donc pour détecter l'apparition de défaillances dans le système, il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques [24].

b. Méthodes qualitatives :

Les méthodes, à base de modèles, qualitatives sont classées selon le niveau d'abstraction du système à diagnostiquer, à savoir, les systèmes continus, les systèmes à événements discrets ou les systèmes dynamiques hybrides.

Ces méthodes permettent un diagnostic des systèmes en se basant sur un modèle symbolique et non seulement un modèle mathématique. Pour les systèmes continus, les approches à base de graphes causaux [30] et de graphes causaux temporels [31] [32] ont été développées. Pour les systèmes à événements discrets, le diagnostic à base de modèles qualitatifs est basé principalement sur les automates à états finis et les réseaux de Petri [33]. Et pour les systèmes hybrides, on trouve principalement les modèles à aspect hybride tels que les Bons graphs, les automates hybrides, les réseaux de Petri hybrides [34] [35] [36]...

➤ Graphes causaux

Un graphe causal ou un graphe informationnel de causalité est une présentation graphique de l'information transitant au sein d'un processus. Il permet de déterminer les composantes défectueuses qui ont entraînés un fonctionnement anormal d'un système. Une disposition causale est une description des effets des variables les unes sur les autres, cette représentation est faite par un graphe orienté (digraphe). Les variables sont modélisées par des nœuds et les arcs symbolisent les relations entre elles (Voir l'exemple du moteur à courant continu sur la figure 22).

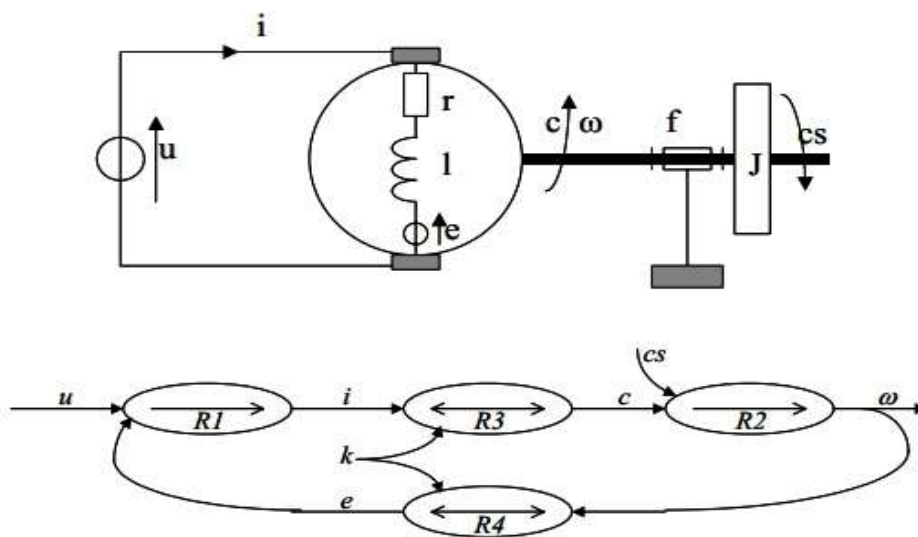


Figure 22: Graphe causal du moteur à courant continu

➤ Automates à états finis

L'automate fini est un outil formel adapté pour la modélisation de l'information sous forme d'événements observables et non observables par le manipulateur. Cet outil est adéquat pour la description des évolutions par le biais des séquences événementielles [37]. (Voir la figure 23).

Parmi les avantages de l'automate fini c'est qu'il permet une description précise du comportement des systèmes manufacturiers d'un point de vue matériel et il permet une manipulation facile grâce à la théorie des langages et les outils de composition et de projection. Le risque d'explosion combinatoire est l'inconvénient de cet outil.

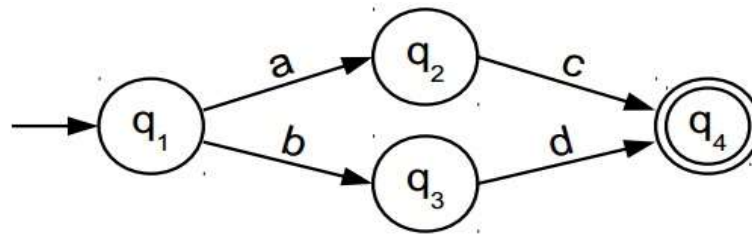


Figure 23: Exemple d'un automate à états finis

### ➤ Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri sont un outil mathématique et graphique qui s'applique à un nombre très important de domaines dont les notions d'événements et d'évolutions simultanées sont intéressantes.

Un réseau de Petri est un graphe orienté qui comporte deux types de nœuds ; des places et des transitions qui sont reliées par des arcs. Le comportement d'un réseau de Petri est défini par la façon dont ces places et ces transitions sont reliées. Les places peuvent contenir des marques ou jetons. Dans ce cas, le RdP est dit marqué.

Dans notre travail de recherche, nous nous sommes basés sur cet outil pour proposer notre méthode de diagnostic des systèmes industriels hybrides. Donc, plus de détails, sur les réseaux de Petri, sont présentés dans la partie C de ce manuscrit.

### ➤ Bond graphs

Le bond graph ou le graphe de liaisons est un outil mathématique qui permet la modélisation d'un système dynamique, à savoir les systèmes mécaniques, électriques, hydrauliques, pneumatiques... C'est une représentation graphique utilisée pour modéliser le contenu énergétique des systèmes. Les graphes de liaisons reposent sur le principe de conservation de la puissance. Les liens d'un Bond graph sont des symboles représentant soit des flux d'énergie, soit des flux d'informations.

Dans un graphe de liaisons, les nœuds représentent les phénomènes physiques décrits par des équations, et les arcs représentent les flux d'énergie (Voir l'exemple de la figure 24).

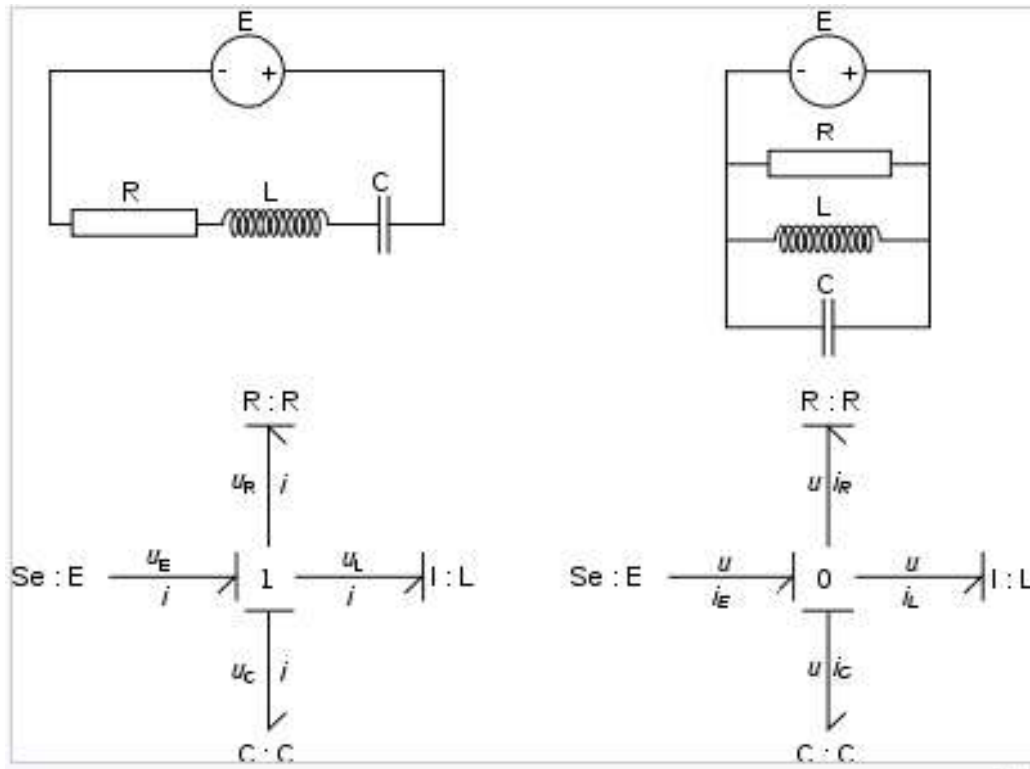


Figure 24: Exemples de Bond graph

### 2.3. Méthodes sans modèle

Dans certaines industries, ce n'est pas évident d'établir une modélisation du système, vu la complexité accrue de l'application industrielle ou l'intervention de nombreuses reconfigurations durant le processus de production. De ce fait, on a recours aux méthodes de diagnostic sans modèles, qui reposent sur des exemples de résolution, sur des règles heuristiques ou sur des informations issues d'une expérience préalable. Parmi ces méthodes : la reconnaissance des formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones...

#### ➤ Reconnaissance des formes

La méthode de reconnaissance des formes se base sur l'application des algorithmes de classification des mesures et des formes continues et discrètes. Le déroulement d'un système de diagnostic basé sur la reconnaissance de formes se fait en trois phases [38] [39] [15]:

- Phase d'analyse qui consiste en la détermination et à la réduction de l'espace de représentation des données et à la définition de l'espace de décision qui permet de spécifier l'ensemble des classes possibles ;

- Phase de choix de la méthode de décision qui permet de définir une décision et qui a pour objectif de classer les nouvelles observations dans toutes les classes de l'ensemble d'apprentissage ;
- Phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

➤ Systèmes experts

Un système expert est un système d'aide à la décision qui est basé sur une base de connaissances, il utilise une information heuristique pour lier les symptômes aux défauts [23], il est capable de produire une solution qui semble la plus juste.

Les systèmes experts sont conçus pour résoudre des problèmes de classification ou de décision, leur fonctionnalité est de trouver la cause de ce qui a été observé en parcourant les règles par un raisonnement inductif par chaînage avant ou arrière.

➤ Réseaux de neurones

Un réseau de neurones [40] [41] est un des outils de l'intelligence artificielle, utilisé pour résoudre une diversité de problème à savoir la reconnaissance de formes. Les réseaux de neurones permettent d'établir et d'apprendre les différentes relations entre les différents vecteurs contenant les informations provenant des capteurs et les différents modes de fonctionnement. Ces vecteurs sont extraits de l'historique des pannes et ils constituent une base d'apprentissage pour le réseau de neurones. Après l'apprentissage des relations entre ces vecteurs et les modes de fonctionnement de système, le réseau de neurones permet une classification en temps réel des différents comportements de système.



## Chapitre 2 : Etat de l'art sur le diagnostic des systèmes hybrides

### 1. Etat de l'art sur le diagnostic des systèmes continus et le diagnostic des SED

#### 1.1. Systèmes continus

Les systèmes continus sont constitués d'éléments caractérisés par une ou plusieurs mesures qui peuvent prendre des valeurs réelles dans le temps. Les quantités peuvent être, par exemple, une position, une vitesse, une accélération, un niveau, une pression, une température, un débit, une tension, etc. La gestion de ces systèmes utilise des outils mathématiques adaptés à la représentation de la dynamique continue comme les équations différentielles. Les systèmes continus sont perçus, par le spécialiste automaticien, à travers une représentation basée principalement sur des variables d'état continues et une variable temporelle, continue ou discrète.

Les méthodes développées jusqu'à présent pour le diagnostic des systèmes industriels concernent le diagnostic des systèmes linéaires [42] [43]. Cependant, la majorité des systèmes présents dans l'industrie sont non linéaires. Il n'y a pas de méthodes générales systématiques pour le diagnostic de tels systèmes. Les méthodes développées pour le diagnostic des systèmes non linéaires reposent principalement sur la connaissance du comportement du système non linéaire en question. Les nombreuses méthodes proposées au fil des années peuvent être classées selon qu'elles reposent sur des connaissances du modèle mathématique du système à diagnostiquer.

Approches floues [44] [45], approches basées sur des réseaux de neurones [44] ou par analyse stochastique des signaux [46] ne sont pas considérées comme des approches basées sur un modèle. Les approches basées sur des modèles comprennent, les équations de parité [42] [47] [48] [49] [50], l'identification paramétrique [51] [52] [53] et les observateurs [54] [55] [56] [57].

#### 1.2. Systèmes à événements discrets

Un système à événements discrets est un système d'espace d'états discrets dont les transitions entre les états sont associées à l'occurrence d'événements asynchrones discrets [2]. Ces systèmes couvrent un large éventail de situations, allant d'une circulation des véhicules (dans un réseau urbain ou une usine de fabrication) au fonctionnement des machines dans un milieu industriel. Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour l'analyse et le contrôle de ces systèmes, notamment les automates à états finis et les réseaux de Petri. Certains modèles de systèmes à

événements discrets, tels que les automates temporisés, utilisent des variables temporelles de nature symbolique, où le temps sert essentiellement à définir une chronologie entre les événements.

Pour construire des outils de diagnostic pour des systèmes à événements discrets, différents formalismes de modélisation ont été utilisés, à savoir les automates [33] et les réseaux de Petri [58].

Plusieurs travaux ont proposé des méthodes de diagnostic pour les systèmes à événements discrets temporisés basés sur les automates temporisés [59] [60] [61] [62] [63] et autres. Des extensions des méthodes de diagnostic pour les systèmes probabilistes ont été proposées dans [64] [65] [66] [67] [68] [69].

Afin de réduire la complexité de calcul en évitant l'énumération exhaustive de l'espace d'état du système, plusieurs approches de diagnostic basées sur les réseaux de Petri ont été proposées. Certaines méthodes ont considéré que le marquage de certaines places est observable comme dans [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] [78] et d'autres ont estimé que le marquage est inobservable mais l'ensemble des transitions est observable comme dans [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85] [58].

Le diagnostic des systèmes à événements discrets dépend également de la structure de prise de décision. Trois principales structures, ou architectures, de traitement sont utilisées : centralisée, décentralisée [86] [87] [88] [89] [90] [91] [92] [93] et distribué [80] [81] [94] [76] [95] [96].

A noter que la distinction entre les structures décentralisée et distribuée est parfois floue. Généralement, les approches décentralisées ont un ensemble de diagnostiqueurs, chacun avec des capacités d'observation différentes, mais toutes considèrent le modèle du système global dans leur inférence basée sur un modèle. Dans les approches distribuées, les diagnostiqueurs individuels n'utilisent que des modèles partiels (locaux) du système par opposition au modèle du système global [86].

## 2. Etat de l'art sur le diagnostic des systèmes hybrides

Les systèmes dynamiques hybrides couvrent simultanément les aspects continus et discrets. Ces systèmes combinent des variables continues et des variables discrètes tout en évoluant dans le temps [97]. Un état discret du système peut être considéré comme un système à variables continues reliées par des contraintes. Cependant, la portée de ces contraintes se limite à l'état en question.

La transition du système d'un état à un autre modifie son mode de fonctionnement en le soumettant à d'autres lois continues propres au nouvel état.

L'efficacité d'une méthode de diagnostic pour les systèmes dynamiques hybrides peut être mesurée par sa capacité à exploiter les deux aspects présentés par ces systèmes : l'aspect continu à travers les variables d'état continues et l'aspect discret à travers les événements discrets. Habituellement, ces deux aspects sont abordés par des approches différentes, à partir des systèmes continus ou des systèmes à événements discrets. En effet, la détection d'une anomalie sur une variable continue est effectuée lorsqu'elle dépasse un certain seuil, et sur une variable discrète lorsque l'occurrence d'un événement inattendu se produit ou lorsqu'un événement attendu ne se produit pas.

Le diagnostic basé sur un modèle qualitatif [98] [99] ne peut pas isoler les défaillances qui se manifestent par des petites variations continues dans les procédés industriels, et ils ne peuvent pas fournir une résolution suffisante pour permettre le contrôle compensatoire des dégradations continues dans le système. Ces limitations rendent ces techniques discrètes mal adaptées pour le diagnostic et le contrôle de nombreux systèmes embarqués, comme il est démontré dans des applications pratiques [100].

Les approches basées sur des modèles pour les systèmes continus [24] [25] [47] [48] sont inappropriés pour diagnostiquer les comportements hybrides présentés par de nombreux systèmes physiques. Ces techniques génèrent, généralement, une matrice de signature de fautes basée sur des relations de redondance analytique et du calcul des statistiques des fautes pour former un diagnostiqueur. La tâche de calcul peut devenir extrêmement coûteuse pour les systèmes hybrides, qui présentent un grand nombre de transitions de modes possibles parce que les modèles changent à chaque transition de modes, et la matrice de signature de fautes doit être recalculée en ligne.

Une classe importante des approches pour le diagnostic des systèmes hybrides repose sur des abstractions discrètes de la dynamique continue. Un diagnostic hybride basé sur des représentations à événements discrets temporisés a été présenté dans [101] où l'état continu est quantifié et des méthodes discrètes sont utilisées. Les travaux de [102] ont étendu ceux de [103] pour le diagnostic des systèmes hybrides. Ce cadre utilise des algorithmes qualitatifs pour l'isolation des fautes basée sur des graphiques causaux temporels. L'approche de [104] utilise également des abstractions discrètes, à savoir un modèle de réseau de Petri temporisé et un diagnostiqueur d'arbre de décision. Le modèle est utilisé par le diagnostiqueur pour demander des

séquences de tests des capteurs basé sur leur discrimination puissance et coût de calcul. Ceci est important pour les systèmes hybrides complexes, où le nombre total de modes et le coût de communication, de détection et de traitement pourrait être très élevé.

Une autre direction importante de la recherche est basée sur les méthodes de filtrage particulaire. Une approche par filtre à particules pour le suivi de plusieurs modèles de comportements est décrite dans [105]. Des techniques de diagnostic qualitatif sont utilisées pour fournir un échantillonnage du filtre des particules cohérent avec le modèle de prédiction. La surveillance et le diagnostic basés sur le filtrage particulaire a également été appliqué en [106] pour une classe des systèmes hybrides modélisés par les réseaux bayésiens dynamiques, où les transitions autonomes entre les états discrets ne sont définies qu'à l'aide des distributions de probabilités conditionnelles dites soft-max.

Une autre approche de filtrage particulaire pour la surveillance et la détection des défauts des systèmes hybrides est présentée dans [107]. Une évaluation des performances de l'approche pour les systèmes hybrides à capteurs discrets est présentée dans [108]. La principale faiblesse de ces approches est la complexité de calcul qui limite leur applicabilité aux systèmes de faible dimension.

Une approche différente pour diagnostiquer une classe spéciale des systèmes hybrides est présentée dans [109], où les hypothèses de fautes sont modélisées à l'aide d'une chaîne de Markov avec un résidu gaussien associé à chaque état. Cette approche ne considère pas la dynamique événementielle présente dans les systèmes hybrides. Une approche en réseau bayésien pour suivre les trajectoires des systèmes hybrides est décrite dans [110]. Un problème directement lié au diagnostic est l'estimation d'état des systèmes hybrides. Une approche basée sur les filtres de Kalman étendus est présentée dans [111].

Les approches de diagnostic de la communauté des systèmes continus sont telles que la génération de résidus et les graphes causaux, l'utilisation de l'aspect discret des systèmes dynamiques hybrides est généralement faible dans ces approches. Plusieurs approches de diagnostic basées sur la génération de résidus ont été proposées dans la littérature. Nous citons comme exemple l'approche de [112]. Dans cette approche, l'estimation en ligne du mode de fonctionnement des systèmes dynamiques hybrides est réalisée par l'utilisation des réseaux de Petri. L'occurrence d'un défaut est détectée par la comparaison des grandeurs mesurées avec celles attendues, en tenant compte des

commandes envoyées au process. Le diagnostic de l'état du processus est ensuite réalisé à l'aide d'une arborescence logique. Cette approche, adaptée aux systèmes dynamiques hybrides, a l'avantage de détecter des anomalies dues à des variables continues et la survenue des événements perturbateurs.

Une autre technique de diagnostic pour les systèmes dynamiques hybrides a été proposée dans [113]. Cette technique repose sur les méthodes de diagnostic basées sur la redondance analytique. Le système à diagnostiquer est modélisé par un automate hybride.

Dans [114], une solution est proposée basée sur l'utilisation d'un observateur hybride composé d'un observateur continu et d'un observateur discret. L'observateur discret permet d'identifier l'état discret actuel du système pendant que l'observateur continu estime l'évolution des variables continues. Dans [35], Goma propose une approche de diagnostic des systèmes dynamiques hybrides basée sur une extension des réseaux de Petri hybrides, appelée RdPC2H.

Une autre approche basée sur le raisonnement causal a été proposée dans [115]. Cette approche repose d'abord sur la modélisation du système par un bond graphe hybride [116] puis la génération d'un graphe de propagation des défauts, ce qui rend la possibilité de décrire les relations causales et temporelles entre les différents modes des fautes d'une part et les observations associées d'une autre part.

Il existe peu de contributions, du diagnostic des systèmes dynamiques hybrides, dérivées des méthodes destinées pour les systèmes à événements discrets. En effet, le développement de telles méthodes est en confrontation avec les dynamiques complexes du système dynamique hybride. On peut identifier deux approches principales dans ce contexte : l'approche de diagnostic de Lunze et l'approche du modèle hybride à temps discret.

Lunze a proposé dans [117] des algorithmes de diagnostic similaires au concept du diagnostiqueur de Sampath. Ainsi, l'inférence et l'évaluation des hypothèses sur les défauts sont effectuées à travers un algorithme de diagnostic. Le problème de diagnostic est associé à un problème d'observation de l'état qualitatif. En effet, une abstraction qualitative des variables continues du système est réalisée grâce à l'utilisation de quantificateurs.

Une extension de l'approche Sampath pour le diagnostic des systèmes hybrides à temps discret a été proposée dans [34]. Le modèle considéré évolue comme un automate temporisé avec  $n$  flux

différents [118]. Il est représenté par un graphe d'activité de transition, où chaque activité correspond à un sommet du graphe. L'évolution des variables continues de chaque activité est synchronisée avec l'occurrence d'un événement spécial, appelé tick, qui se produit après chaque période constante. A l'apparition d'un tick, chaque variable évolue avec un pas constant, défini en fonction de sa dynamique. Les variables sont divisées en variables discrètes (ou événements) observables et non observables et variables continues mesurables et non mesurables. L'approche du diagnostic commence par la modélisation des composants du système à l'aide des graphes d'activité de transition, puis l'obtention du modèle global par la composition de ces modèles.

Le diagnostiqueur est un graphe d'activité de transition, compilé hors ligne. Chaque sommet du diagnostiqueur contient une estimation de l'état du système et les étiquettes de l'ensemble pour indiquer la présence de défauts.

## **Conclusion**

Dans le premier chapitre de cette partie, en premier lieu, nous avons essayé de collecter le lexique des termes en rapport avec le diagnostic afin de faciliter la compréhension du manuscrit. En deuxième lieu, nous avons présenté les principales méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques, à savoir les méthodes à base de modèle (quantitatives et qualitatives) et les méthodes sans modèles (quantitatives et qualitatives). Un état de l'art sur les différentes méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques et en particulier les systèmes dynamiques hybrides est présenté dans le deuxième chapitre, ce travail a été l'objet d'un article scientifique que nous avons publié en septembre 2017 [13].

Dans la 3<sup>ème</sup> et la dernière partie, nous allons présenter notre méthode proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides. Notre approche est basée sur les réseaux de Petri hybrides.

**PARTIE C : Méthode proposée pour le diagnostic des  
systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux  
de Petri hybrides**



## **Introduction**

Le premier chapitre de cette partie a pour objectif de détailler l'outil de modélisation « Réseaux de Petri » utilisé dans notre approche. En premier lieu, nous avons présenté quelques extensions de cet outil, et en particulier les réseaux de Petri continus et hybrides. Et en deuxième lieu les différentes notions liées aux réseaux de Petri hybrides et qui seront utilisées dans la suite de notre travail ont été définies.

Le deuxième chapitre de cette partie présente notre méthode proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides. Les différentes étapes pour calculer le diagnostiqueur sont présentées sous forme d'un algorithme. Un exemple d'application de notre approche est proposé en fin de cette partie.

## Chapitre 1 : Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri sont un langage de modélisation graphique et mathématique utilisé pour décrire et vérifier les propriétés des systèmes. C'est un outil de modélisation puissant qui peut être utilisé pour représenter des activités parallèles ou simultanées dans un système. Avec les réseaux de Petri, les utilisateurs peuvent visualiser graphiquement le système global et le modifier avec l'éditeur. Un réseau de Petri peut également être utilisé pour analyser les performances du système, générer du code, simuler le système, effectuer une vérification du modèle, etc.

Un réseau de Petri est un graphe orienté qui comporte deux types de nœuds ; des places et des transitions qui sont reliées par des arcs. Le comportement d'un réseau de Petri est défini par la façon dont ces places et ces transitions sont reliées. Les places peuvent contenir des marques ou jetons. Dans ce cas, le RdP est dit marqué.

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de Petri, et en particulier, ceux utilisés pour notre approche de diagnostic des systèmes industriels hybrides. Quelques notions liées à cet outil sont présentées aussi dans ce chapitre, afin de faciliter la compréhension de la méthode proposée.

### 1. Extensions des réseaux de Petri

Les réseaux de Petri sont un modèle à événements discrets proposé en premier lieu par Carl Adam Petri dans sa thèse de doctorat au début des années 1960 [119]. Dans la littérature associée, différentes extensions des réseaux de Petri ont été proposées. Dans nos travaux, nous nous concentrons sur les réseaux de Petri hybrides.

Parmi les extensions de cet outil graphique, nous trouvons les RdP temporisés, les RdP stochastiques, les RdP colorés, les RdP orientés objets, les RdP par lots, les RdP interprétés...

Dans les réseaux de Petri colorés [120], les jetons sont distinguables et chacun d'eux porte une valeur de données qui appartient à un type de données. Les réseaux de Petri interprétés [121] (IPN) sont utilisés pour représenter les systèmes à événements discrets. Les IPN est une extension des RdP qui permet de représenter les signaux de sortie générés lorsqu'un marquage est atteint.

Afin de résoudre les aspects temporels des systèmes complexes, les réseaux de Petri temporisés (TPN) [122] sont nécessaires. Les TPN sont des RdP qui utilisent des fonctions de temps comme l'une des règles de tir de transition. Les TPN peuvent être déterministes ou stochastiques. Le modèle réseau de Petri stochastique fluide (FSPN) a été présenté pour la première fois par Trivedi

et Kulkarni au début des années 1990 [123] et développé en [124]. Dans un FSPN, une ou plusieurs places peuvent contenir des jetons fluides plutôt que discrets.

Il existe un formalisme appelé réseau de Petri Batch (BPN), dérivé de Demongodin, Audry et Prunet [125] comme outil de modélisation pour une classe particulière de processus qui est appelée procédé Batch. Ces procédés, très présents dans le domaine de l'industrie chimique, parapharmaceutique ou agro-alimentaire, comportent des séquences de transfert et de conditionnement relevant des systèmes à événements discrets et des opérations continues pendant un certain temps : évaporation, cristallisation, mélange, etc. (Voir la figure 18).

Les équations différentielles algébriques-réseaux de Petri (DAE-PN) sont basées sur le modèle présenté par Andreu, Pascal, Valentin-Roubinet et Valette [126] [127]. Les réseaux de Petri différentiels (DPN) ont été présentés pour la première fois par Demongodin et Koussoulas dans [128]. Grâce à ces réseaux de Petri, l'analyse des systèmes de contrôle hybrides est facilitée, car les problèmes de sécurité peuvent être étudiés en même temps avec le comportement continu du processus.

Dong et Chen proposent [129] [130] une méthodologie de modélisation et d'analyse d'une chaîne logistique basée sur les réseaux de Petri orienté objet (OPTN). Chaque OPTN est composé de deux parties : une structure interne et une structure externe. La structure interne est composée des places d'état et des transitions d'activités. Traitant chaque objet comme une unique file d'attente du serveur, chaque objet ne peut exécuter qu'une seule fonction à la fois. Donc aucune concurrence ne peut être incluse dans chaque objet.

Les réseaux de Petri continu et hybride sont basés ou directement inspirés du modèle présenté par David et Alla à la fin des années 1980 [131]. Ces auteurs ont obtenu un modèle continu par fluidification, c'est-à-dire en relâchant la condition que le marquage soit un vecteur entier. Les réseaux de Petri hybrides sont alors constitués d'une «partie continue» (places et transitions continues) et une «partie discrète» (places et transitions discrètes). La partie continue permet de modéliser des systèmes avec des flux continus et la partie discrète modélise le fonctionnement logique.

## 2. Réseaux de Petri discrets

### 2.1. Définition formelle d'un RDP discret

Un réseau de Petri discret [132] est une paire  $\langle N, M_0 \rangle$ , où :

- $N = \langle P, T, Pre, Post \rangle$  est la structure du réseau avec deux ensembles disjoints de places  $P$  et de transitions  $T$ ,
- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  ensemble fini, non vide, de places.
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  ensemble fini, non vide, de transitions.
- $Pre$  et  $Post$  sont respectivement les matrices Pre-Incidence et Post-incidence qui spécifient les arcs. Où  $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  et  $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  (Figure 25).  $C = Post - Pre$  est la matrice d'incidence.

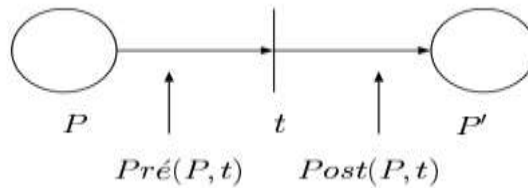


Figure 25: Applications d'incidence

- $M_0$  est le marquage initial. Toutes les places d'un réseau de Petri discret contiennent un entier naturel.

Les ensembles des entrées et sorties d'un nœud  $x \in P \cup T$  sont notés  $\cdot x$  and  $x \cdot$  respectivement.

Le marquage  $M$  d'une place  $p_i$  est représenté par  $M(p_i)$  ou simplement par  $M_i$ .

Une transition  $t_j \in T$  est activée par le marquage  $M$  si et seulement si  $\forall p_i \in \cdot t_j, M(p_i) \geq 0$  et le degré d'activation de  $t_j$  par  $M$  est:

$$enab(t_j, M) = \min_{p_i \in \cdot t_j} \frac{M(p_i)}{Pre(p_i, t_j)} \quad (4)$$

Une transition dans un réseau de Petri discret peut être tirée par n'importe quel entier naturel  $\alpha$ , où :  $0 \leq \alpha \leq enab(t_j, M)$ . Une transition  $t_j \in T$  est franchie par un marquage  $M$  si et seulement si  $M \geq \alpha \cdot Pre(\cdot, t_j)$ .

Le nouveau marquage d'un réseau de Petri discret est :  $M' = M + \alpha \cdot C(\cdot, t_j)$ , noté :  $M [t_j > M']$ .

On note  $\sigma$  une séquence de franchissement pour  $M$  : si le marquage  $M$  est le résultat du franchissement depuis le marquage initial par une séquence de franchissement  $\sigma = t_1(\alpha_1) t_2(\alpha_2) \dots t_k(\alpha_k)$ .

On écrit alors :  $M = M_0 + C \cdot \sigma$ , qui est appelée l'équation fondamentale du réseau de Petri.

## 2.2. Définition non formelle d'un RdP discret

Un réseau de Petri discret [133] est constitué de places, qui sont représentées graphiquement par des cercles simples, et de transitions qui sont représentées par des traits simples, reliées aux places par des arcs orientés (Figure 26).



Figure 26: Représentation d'une place et d'une transition discrètes

Une transition est franchie si les places amont à cette transition sont marquées par le nombre de jetons qui est indiqué sur l'arc entrant à la transition (Figures 27 et 28). Si rien n'est indiqué sur l'arc, il est nécessaire d'avoir un jeton dans la place amont.



Figure 27: Marquage d'une place discrète

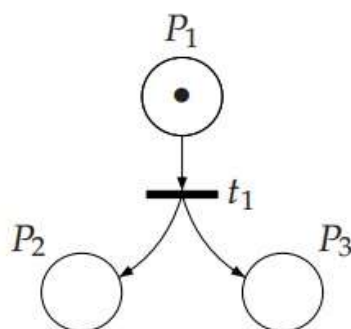


Figure 28: Exemple d'une transition franchissable

Le franchissement de la transition peut aussi être conditionné par un événement extérieur [134]. Après franchissement de la transition, les places aval sont incrémentées du nombre de jetons indiqués sur les arcs sortant de la transition. Dans les Réseaux de Petri discrets autonomes, on

admet que le franchissement de la transition est immédiat dès lors que toutes les conditions sont vérifiées.

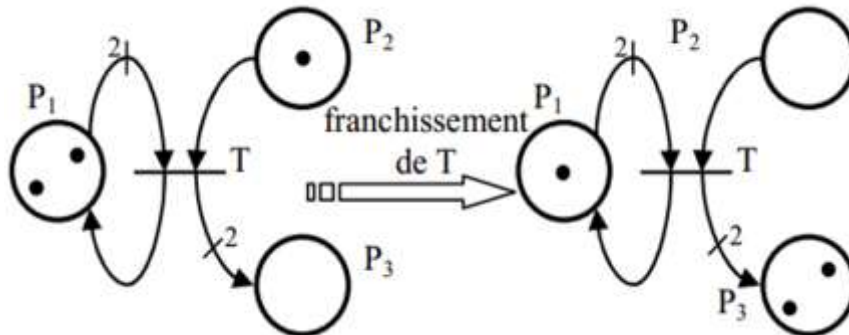


Figure 29: Franchissement d'une transition discrète

Dans l'exemple de la figure 29, le franchissement de la transition T est conditionné par la présence de deux jetons dans la place P<sub>1</sub> et d'un jeton dans la place P<sub>2</sub>. Au franchissement, la place P<sub>1</sub> est décrémentée de deux jetons et la place P<sub>2</sub> est décrémentée d'un jeton. La place P<sub>1</sub> est alors incrémentée d'un jeton et la place P<sub>3</sub> de deux jetons.

Exemple 2 : Soit le réseau de Petri non marqué (Figure 30), où :

$P = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,  $T = \{a, b, c, d, e\}$  et soit  $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ .

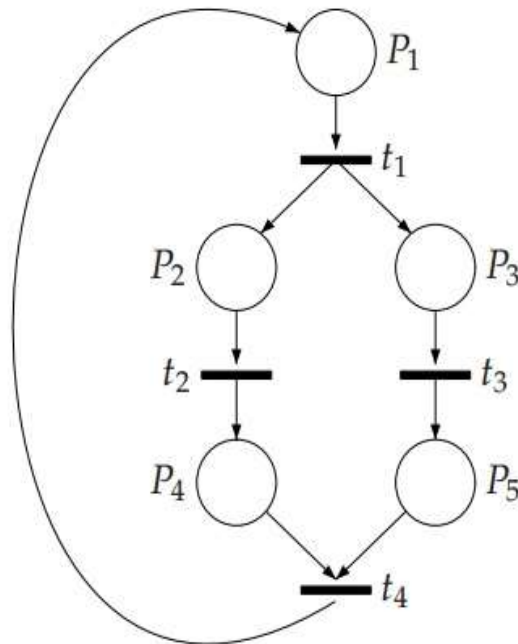


Figure 30: Exemple d'un réseau de Petri non marqué

Les matrices Pre-Incidence et Post-Incidence sont les suivantes :

$$Pre = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad Post = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

La matrice d'incidence est :

$$C = Post - Pre = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Soit  $\sigma = t_1 t_2 t_3$  une séquence de transitions. L'équation fondamentale du réseau de Petri est la suivante :

$$M = M_0 + C \cdot \sigma \quad (5)$$

Avec  $\sigma = [1 \ 1 \ 1 \ 0]$

$$M = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

### 3. Réseaux de Petri continus

#### 3.1. Définition formelle d'un RdP continu

Un réseau de Petri continu [132] est une paire  $\langle N, M_0 \rangle$ , où :

- $N = \langle P, T, Pre, Post \rangle$  est la structure du réseau avec deux ensembles disjoints de places  $P$  et de transitions  $T$ ,
- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  ensemble fini, non vide, de places.

- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  ensemble fini, non vide, de transitions.
- Pre et Post sont respectivement les matrices Pre-Incidence et Post-incidence qui spécifient les arcs. Où  $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$  et  $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$  ;  $C = Post - Pre$  est la matrice d'incidence.
- $M_0$  est le marquage initial. Toutes les places d'un réseau de Petri continu contiennent un réel positif.

Une transition dans un réseau de Petri continu peut être tirée par n'importe quel réel positif  $\alpha$ , où :  $0 \leq \alpha \leq \text{enab}(t_j, M)$ . Une transition  $t_j \in T$  est franchie par un marquage  $M$  si et seulement si  $M \geq \alpha \cdot Pre(\cdot, t_j)$ .

Le nouveau marquage d'un réseau de Petri continu est :  $M' = M + \alpha \cdot C(\cdot, t_j)$ , noté :  $M [t_j > M'$ .

On note  $\sigma$  une séquence de franchissement pour  $M$  : si le marquage  $M$  est le résultat du franchissement depuis le marquage initial par une séquence de franchissement  $\sigma = t_1(\alpha_1) t_2(\alpha_2) \dots t_k(\alpha_k)$ .

On écrit alors :  $M = M_0 + C \cdot \sigma$ , qui est appelée l'équation fondamentale du réseau de Petri.

### 3.2. Définition non formelle d'un RDP continu

Un Réseau de Petri continu est composé de places, qui sont représentées graphiquement par des doubles cercles et de transitions, qui sont représentées par des doubles traits reliés aux places par des arcs orientés (Figure 31).



Figure 31: Représentation d'une place et d'une transition continues

Une transition est franchie si toutes les places amont à cette transition sont marquées par un nombre réel strictement positif. Des proportions de flux liés au franchissement peuvent être indiquées sur les arcs. Si rien n'est indiqué sur l'arc, on admet que les places sont diminuées d'un rapport égal à 1. La vitesse de franchissement de la transition peut être conditionnée par une équation temporelle sur les valeurs des places amont. Pendant le franchissement progressif de la transition, les places



amont sont proportionnellement diminuées avec les rapports indiqués sur les arcs entrant à la transition. Les places avales sont proportionnellement augmentées avec les rapports indiqués sur les arcs sortant de la transition. Si les transitions sont régies par des équations différentielles, le franchissement de la transition est solution de cette équation. Il est cependant nécessaire de définir les conditions initiales sur les flux en plus du marquage initial [134].

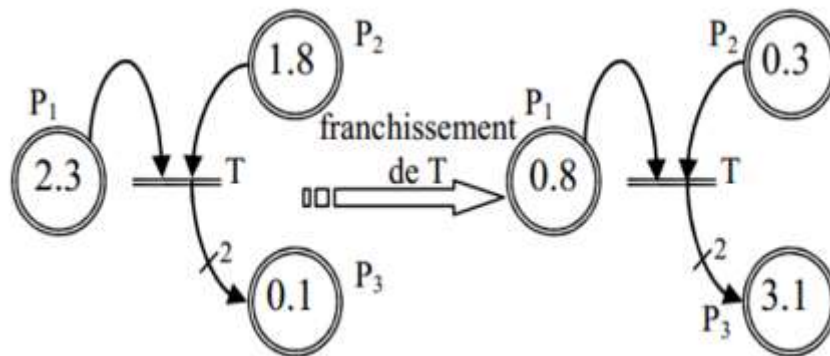


Figure 32: Trajectoire de franchissement d'une transition continue

Dans l'exemple de la figure 32, le franchissement de la transition T est conditionné par la présence de marquage dans les places P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>. Pour un franchissement de flux de 1.5, le marquage de la place P<sub>1</sub> est diminué de 1.5 et la place P<sub>2</sub> de 1.5. La place P<sub>3</sub> est augmentée de 2x1.5.

Exemple 2: On considère l'exemple d'un système à réservoirs [135] constitué de deux réservoirs et d'une pompe (Figure 33). Le réservoir 1 se vide dans le réservoir 2 par l'effet de la gravité à la vitesse V<sub>1</sub>. Le réservoir 2 se vide à la vitesse V<sub>2</sub> grâce à une pompe P qui à son tour remplit le réservoir 1 et ainsi de suite.

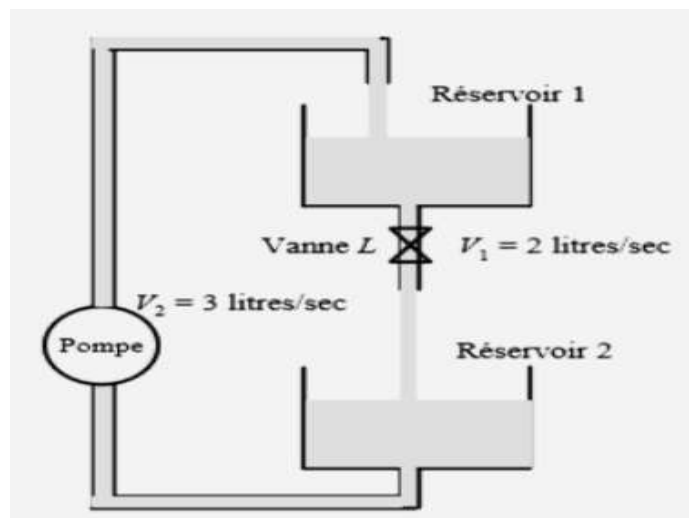


Figure 33: Système à réservoirs

Ce système à réservoirs d'eau peut être modélisé par un RdP continu (Figure 34). Deux places continues représentent les réservoirs 1 et 2. Le marquage de ces places indique la quantité d'eau initiale présente dans les réservoirs. Les vitesses  $V_1$  et  $V_2$  sont associées aux transitions  $T_1$  et  $T_2$ .

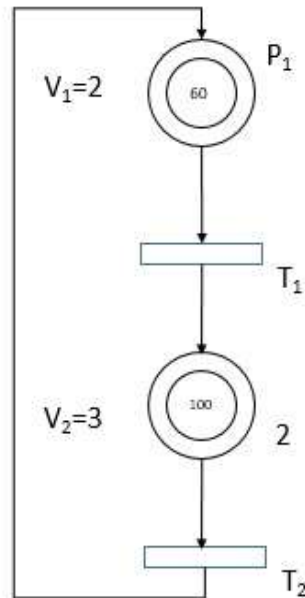


Figure 34: RdPC du système à réservoirs

#### 4. Réseaux de Petri hybrides

##### 4.1. Définition formelle d'un RdP hybride

Un réseau de Petri hybride autonome est un sextuplet :  $Q = \langle P, T, Pre, Post, M_0, h \rangle$  tels que :

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble fini, non vide, de places ;
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble fini, non vide, de transitions ;
- $P \cap T = \emptyset$ , les ensembles des places  $P$  et des transitions  $T$  sont disjoints ;
- $h: P \cup T \rightarrow \{D, C\}$ , nommée "fonction hybride", indique que pour chaque nœud, il s'agit d'un nœud discret (ensembles: places discrètes  $P^D$  et transitions discrètes  $T^D$ ) ou un nœud continu (ensembles: places continues  $P^C$  et transitions continues  $T^C$ );
- $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{R}^+ \text{ ou } \mathbb{N}$ , est la matrice Pre-incidence;
- $Post: P \times T \rightarrow \mathbb{R}^+ \text{ ou } \mathbb{N}$ , est la matrice Post-incidence;
- $M_0: P \rightarrow \mathbb{R}^+ \text{ ou } \mathbb{N}$  est le marquage initial.

Dans la définition de Pre, Post et  $M_0$ ,  $\mathbb{N}$  correspond au cas où  $P_i \in P^D$ , et  $\mathbb{R}^+$  correspond au cas où  $P_i \in P^C$ .

Les fonctions Pre et Post doivent répondre au critère suivant : Si  $P_i$  et  $T_j$  sont une place et une transition telles que :  $P_i \in P^D$  et  $T_j \in T^C$  donc  $\text{Pre}(P_i, T_j) = \text{Post}(P_i, T_j)$  doit être vérifiée.

#### 4.2. Définition non formelle d'un RDP hybride

Un réseau de Petri hybride reprend la représentation graphique des Réseaux de Petri continu et discret : Un cercle double représente une place continue et un cercle simple représente une place discrète. Une transition discrète est représentée par un trait simple relié aux places par des flèches. Il est possible d'utiliser des transitions discrètes reliées à des places continues. Dans ce cas, le franchissement de la transition incrémente ou décrémente, de la quantité indiquée sur l'arc, respectivement les places avals ou amonts. L'incrément ou la décrémentation est discrète : le marquage des places continues réalise un saut de valeur. (Voir l'exemple de la figure 35).

Une transition continue est représentée par un trait double relié aux places par des flèches. Il est possible d'utiliser des transitions continues reliées à des places discrètes. Cette notation est utilisée pour synchroniser la partie continue du modèle hybride d'un système avec la partie discrète. L'évolution de la partie continue est alors conditionnée par le marquage de la partie discrète. Un arc amont et aval lie la place discrète à la transition continue. (Voir l'exemple de la figure 36).

La partie discrète peut aussi être synchronisée par le modèle continu. La notion d'arc inhibiteur permet d'interdire le franchissement d'une transition discrète en fonction du marquage d'une place continue. La transition n'est franchissable que si la condition associée à l'arc inhibiteur n'est pas vérifiée. Le marquage de la place continue n'est pas affecté par la présence d'arcs inhibiteurs. L'arc inhibiteur est représenté par un arc orienté depuis une place continue pour aboutir à une transition où son extrémité est marquée par un cercle. (Voir l'exemple de la figure 37).

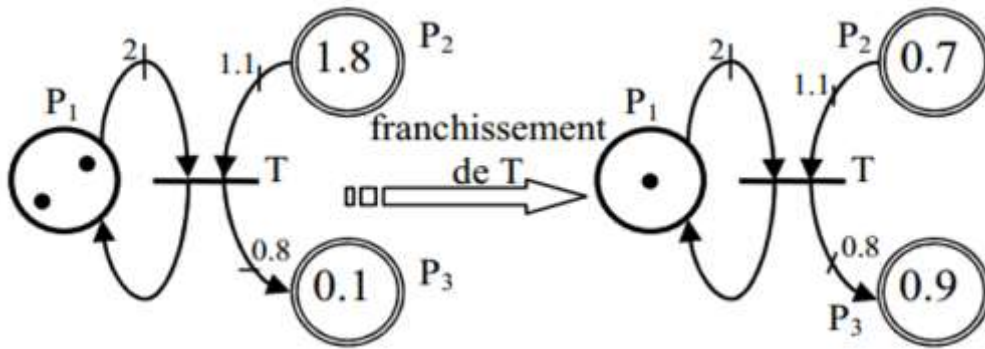


Figure 35: Franchissement d'une transition discrète dans un réseau de Petri Hybride

Dans l'exemple de la figure 35, le franchissement de la transition T est conditionné par la présence de deux jetons dans la place P<sub>1</sub> et de la présence d'un marquage de la place P<sub>2</sub> supérieur à la valeur indiquée sur l'arc amont. Au franchissement, la place P<sub>1</sub> est décrémentée de deux jetons et la place continue P<sub>2</sub> est décrémentée de la valeur indiquée sur l'arc. La place P<sub>1</sub> est simultanément incrémentée d'un jeton et la place P<sub>3</sub> est augmentée de la quantité indiquée sur l'arc aval.

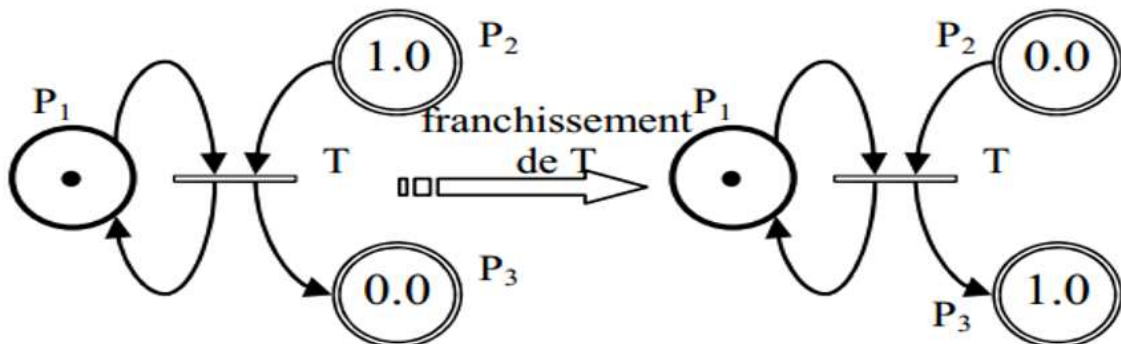


Figure 36: Synchronisation d'un modèle continu par un modèle discret

Dans l'exemple de la Figure 36, le franchissement, de la transition continue depuis la place P<sub>2</sub> vers la place P<sub>3</sub>, est conditionné par la présence d'un jeton discret dans la place P<sub>1</sub>. La transition ne peut pas être franchie s'il n'y a pas de jeton présent dans la place P<sub>1</sub>.

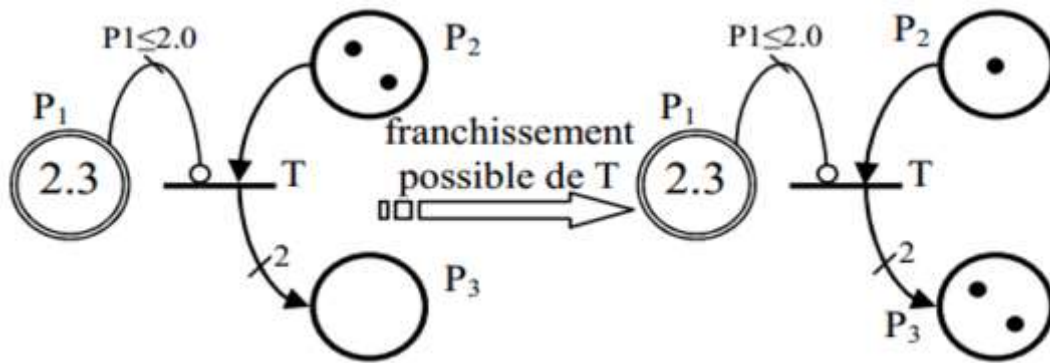


Figure 37: Exemple d'arcs inhibiteurs

Sur l'exemple présenté dans la figure 37, le franchissement de la transition T peut être inhibé suivant le marquage de la place  $P_1$ . Le marquage de la place  $P_1$  est supérieur à la valeur 2.0. La condition  $P_1 \leq 2.0$  n'est donc pas vérifiée. La transition T peut donc être franchie. La place amont  $P_2$  est décrémentée d'un jeton et la place  $P_3$  est incrémentée de deux jetons.

Exemple 2: On considère l'exemple d'un système à réservoirs [135] constitué de deux réservoirs et d'une pompe (Figure 38). Le réservoir 1 se vide dans le réservoir 2 par l'effet de la gravité à la vitesse  $V_1$ . Le réservoir 2 se vide à la vitesse  $V_2$  grâce à une pompe P qui à son tour remplit le réservoir 1 et ainsi de suite.

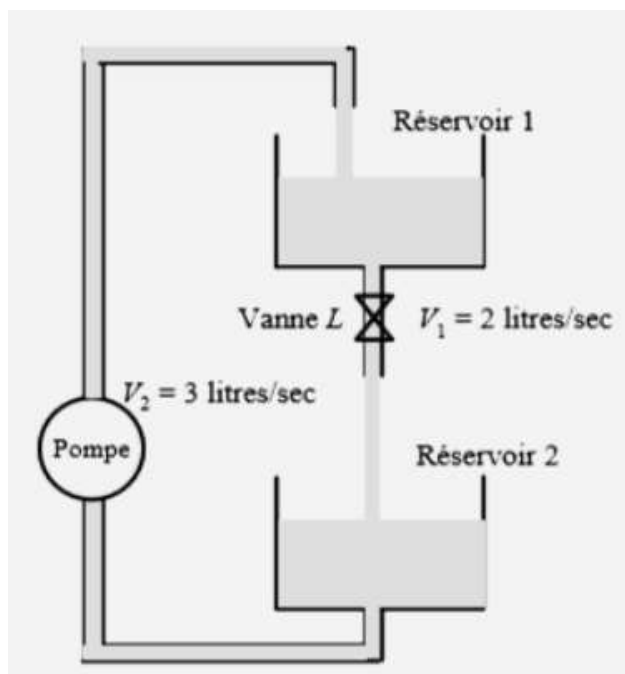


Figure 38: Système à réservoirs

Ce système à réservoirs d'eau est modélisé par un RdP hybride (Figure 39). On suppose que la capacité maximale du réservoir 1 est 150 litres. Lorsque ce réservoir atteint le niveau 150 litres d'eau, la pompe s'arrête automatiquement pendant une durée de 100 secondes puis reprend de nouveau. La pompe est représentée par deux états discrets : Un état de marche et un état d'arrêt. Le flux d'eau dans les réservoirs est continu.

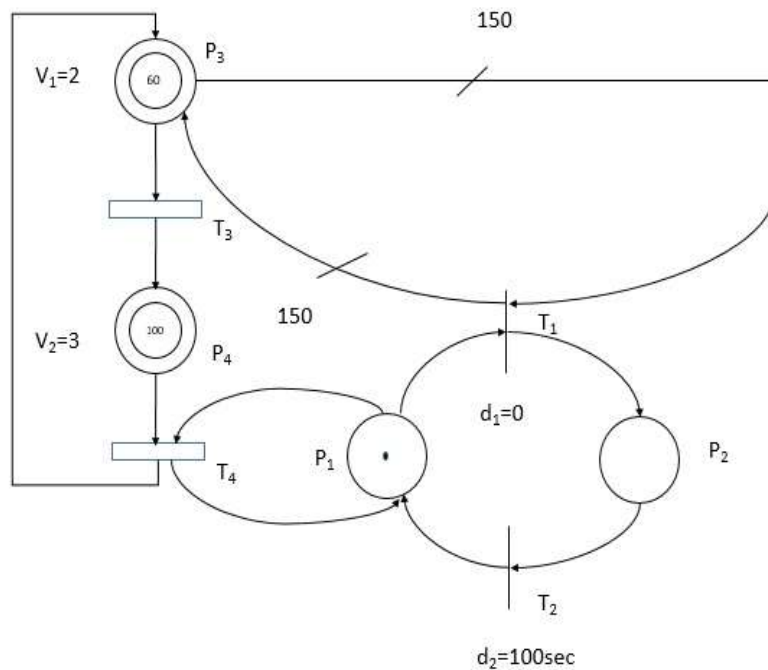


Figure 39: RdPH du système à réservoirs

Les places  $P_1$  et  $P_2$  représentent respectivement les états de marche et d'arrêt de la pompe. La partie continue est représentée par  $P_3 - T_3 - P_4 - T_4$ . A l'état initial, la pompe est en état de marche. La transition  $T_1$  représente le passage de la pompe de l'état de marche à l'état d'arrêt. Ce passage est conditionné par le niveau d'eau du réservoir 1 représenté par le poids de l'arc  $P_3 - T_1$ . La transition  $T_2$  représente le passage de l'état d'arrêt à l'état de marche. A la transition  $T_1$  est associée un temps de franchissement de durée nulle ( $d_1=0$ ) ; la transition est donc immédiate. A la transition  $T_2$  est associée un temps de franchissement de durée  $d_2=100$  sec. Cette durée correspond à la durée d'arrêt de la pompe. Lorsque  $P_2$  est marquée (pompe à l'arrêt), on commence à compter le temps, une fois la durée  $d_2$  est écoulée, la transition  $T_2$  est franchie.

La partie  $P_1 - T_4$  représente l'effet du discret sur le continu. En effet, tant que  $P_1$  n'est pas marquée, la transition  $T_4$  ne peut être franchie (règle de franchissement des RdP discrets). Par contre, en un temps  $dt$ , le franchissement de  $T_4$  va induire le passage d'une quantité  $V_2 dt$  de chacune des places

$P_1$  et  $P_4$ . L'arc ajouté de  $T_4$  vers  $P_1$  garantit qu'à chaque franchissement de  $T_4$ , la même quantité  $V_2 dt$  est enlevée puis ajoutée à  $P_1$  de telle sorte que le jeton présent dans  $P_1$  reste entier. En d'autres termes, le franchissement d'une transition continue ne doit pas modifier le marquage d'une place discrète.

La partie  $P_3 - T_1$  représente l'effet du continu sur le discret. En effet, tant que le marquage de  $P_3$  est inférieur à 150, la transition  $T_1$  n'est pas franchissable. Lorsque le marquage de  $P_3$  atteint 150,  $T_1$  est franchie et c'est  $P_2$  qui devient marquée (pompe à l'arrêt).

## 5. Définitions liées aux réseaux de Petri

### 5.1. Premières définitions

Ces notions ont été définies dans les travaux de [136] [137] [85] [138].

Hypothèses :

- On suppose que les fautes sont modélisées par des transitions inobservables, mais il peut exister des comportements réguliers qui sont également représentés par des transitions inobservables.
- L'ensemble de transitions est partitionné en deux sous-ensembles :  $T = T_o \cup T_u$ , où  $T_o$  est l'ensemble des transitions observables et  $T_u$  est l'ensemble des transitions inobservables. L'ensemble des transitions de fautes est noté  $T_f$  et vérifie  $T_f \subseteq T_u$  et  $T_u = T_f \cup T_{reg}$ .

Soit  $C_o$  ( $C_u$ ) la restriction de la matrice d'incidence à  $T_o$  ( $T_u$ ).

Soit  $T^*$  l'ensemble de toutes les séquences pouvant être combinées dans  $T$ , y compris le mot vide.

Comme c'est déjà mentionné dans le chapitre précédent, l'équation fondamentale d'un réseau de Petri est :  $M = M_0 + C \cdot \sigma$ . Où  $\sigma$  est une séquence de franchissement pour  $M$  depuis le marquage initial.

La franchissabilité d'une séquence de transitions  $\sigma = t_1(\alpha_1) t_2(\alpha_2) \dots t_k(\alpha_k)$  à partir d'un marquage  $M$  est noté :  $M[\sigma >$ . Si le marquage résultant est  $M'$ , on note :  $M[\sigma > M'$

L'ensemble de toutes les séquences qui sont activées au marquage initial est noté :  $L(N, M_0)$

$$L(N, M_0) = \{\sigma \in T^* \mid M[\sigma >\} \quad (6)$$

Etant donné une séquence  $\sigma \in T^*$ , on appelle  $\Pi : T^* \rightarrow \mathbb{N}^m$  la fonction qui associe à  $\sigma$  un vecteur  $y \in \mathbb{N}^m$ , nommé vecteur de tir de  $\sigma$ . En particulier,  $y(t)=k$  si la transition  $t$  est contenue  $k$  fois dans  $\sigma$ .

Un marquage  $M$  est accessible à  $\langle N, M_0 \rangle$  si et seulement s'il existe une séquence de tir  $\sigma$  tel que  $M_0 [\sigma > M$ .

Exemple : Soit le réseau de Petri discret représenté dans la figure 40. Son marquage initial est  $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ .

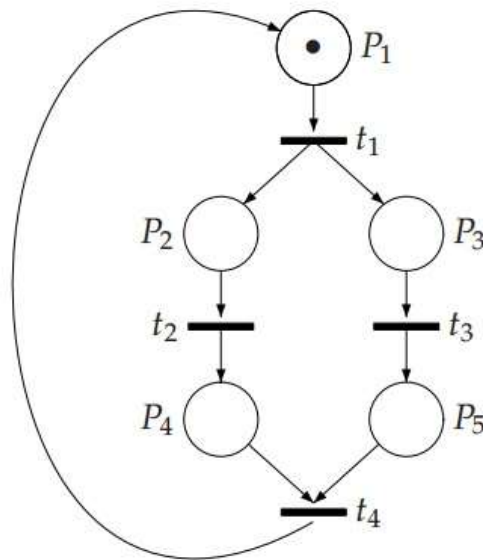


Figure 40: Exemple d'un RdP discret

L'ensemble des marquages accessibles à partir du marquage initial est :

$$*M_0 = \{M_0, M_1 M_2 M_3, M_4\}$$

Avec :

$$M_1 = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$M_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]$$

$$M_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$$

$$M_4 = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$



Les transitions franchissables sont :

$$M_3 [t_4 >$$

$$M_0 [t_1 >$$

Les franchissements à partir du marquage initial  $M_0$  sont :

$$M_0 [t_1 > M_1$$

$$M_0 [t_1 t_2 t_3 > M_3$$

$$M_0 [t_1 t_3 t_2 > M_3$$

a. Définition 1 : Ensemble de potentialité accessible

L'ensemble de tous les marquages accessibles à partir du marquage initial  $M_0$  définit l'ensemble d'accessibilité de  $\langle N, M_0 \rangle$  et il est noté  $R(N, M_0)$ .

On note  $PR(N, M_0)$  l'ensemble de potentialité accessible, c'est-à-dire, l'ensemble de tous les marquages  $M \in \mathbb{N}^m$ , pour lequel il existe un vecteur  $y \in \mathbb{N}^n$  qui satisfait l'équation d'état  $M = M_0 + C \cdot y$ , c'est-à-dire :

$$PR(N, M_0) = \{ M \in \mathbb{N}^m \mid \exists y \in \mathbb{N}^n : M = M_0 + C \cdot y \} \quad (7)$$

Et donc  $R(N, M_0) \subseteq PR(N, M_0)$ .

Un réseau de Petri n'ayant pas de circuit dirigé est appelé acyclique. Dans notre travail, on suppose que le réseau de Petri considéré est acyclique.

Théorème [139] : Soit  $N$  un réseau de Petri acyclique

- Si le vecteur  $y \in \mathbb{N}^n$  satisfait l'équation  $M_0 + C \cdot y \geq \vec{0}$  il existe une séquence de tir  $\sigma$  franchie à partir du marquage initial  $M_0$  dont le vecteur de tir est  $\Pi(\sigma) = y$ .
- Un marquage  $M$  est accessible à partir du marquage initial  $M_0$  si et seulement s'il existe une solution entier non négatif qui satisfait l'équation d'état  $M = M_0 + C \cdot y$ , c'est-à-dire,  $R(N, M_0) = PR(N, M_0)$ .

On suppose que l'ensemble de transitions  $T$  est partitionné en deux sous-ensembles  $T_o$  et  $T_u$ , c'est-à-dire,  $T=T_o \cup T_u$  et  $T_o \cap T_u = \emptyset$ .  $T_o$  est l'ensemble des transitions observables et  $T_u$  est l'ensemble des transitions inobservables ou les transitions silencieuses.

On note  $n_o$  ( $n_u$ ) le cardinal de l'ensemble  $T_o$  ( $T_u$ ), et  $C_o$  ( $C_u$ ) la restriction de la matrice d'incidence à  $T_o$  ( $T_u$ ).

b. Définition 2 : Projections sur  $T_o$  et  $T_u$

Soit  $N= (P, T, Pre, Post)$  un réseau de Petri, avec  $T=T_o \cup T_u$ , on définit les deux opérateurs suivants :

- La projection sur  $T_o$  est  $P_o : T^* \rightarrow T_o^*$  défini comme suit :
  - $P_o(\varepsilon)= \varepsilon$
  - Pour tout  $\sigma \in T^*$  et  $t \in T$ ,  $P_o(\sigma t)= P_o(\sigma)t$  si  $t \in T_o$ , et  $P_o(\sigma t)= P_o(\sigma)$  sinon.
- La projection sur  $T_u$  est  $P_u : T^* \rightarrow T_u^*$  défini comme suit :
  - $P_u(\varepsilon)= \varepsilon$
  - Pour tout  $\sigma \in T^*$  et  $t \in T$ ,  $P_u(\sigma t)= P_u(\sigma)t$  si  $t \in T_u$ , et  $P_u(\sigma t)= P_u(\sigma)$  sinon.

Etant donné une séquence  $\sigma \in L(N, M_0)$ , on note  $\omega= P_o(\sigma)$  le mot observé correspondant.

Définition : Ensemble des séquences de tir cohérentes avec  $\omega$

Soit  $\langle N, M_0 \rangle$  un réseau de Petri, où  $N= (P, T, Pre, Post)$  et  $T= T_o \cup T_u$ , soit  $\omega \in T_o^*$  un mot observé.

On définit l'ensemble des séquences de tir cohérentes avec  $\omega \in T_o^*$  :

$$L(\omega)= P^{-1}(\omega) \cap L(N, M_0) = \{ \sigma \in L(N, M_0) \mid P_o(\sigma) = \omega \} \quad (8)$$

c. Définition 3 : Ensemble des marquages cohérents avec  $\omega$

Soit  $\langle N, M_0 \rangle$  un réseau de Petri, où  $N= (P, T, Pre, Post)$  et  $T= T_o \cup T_u$ , soit  $\omega \in T_o^*$  un mot observé.

On définit l'ensemble des marquages cohérents avec  $\omega \in T_o^*$  :

$$C(\omega) = \{ M \in R(N, M_0) \mid \exists \sigma \in L(\omega): M_0 [\sigma > M] \} \quad (9)$$

C'est-à-dire, étant donné une observation  $\omega$  ;  $L(\omega)$  est l'ensemble des séquences qui ont pu être tirées et  $C(\omega)$  est l'ensemble des marquages dans lesquelles le système peut réellement se trouver.

d. Définition 4 : RdP induit par  $T'$ 

Soit  $\langle N, M_0 \rangle$  un réseau de Petri, où  $N = (P, T, Pre, Post)$ , et  $T' \subseteq T$  un sous-ensemble de ses transitions, on définit le sous-RdP induit par  $T'$  comme le nouveau RdP  $N' = (P, T', Pre', Post')$  où :  $Pre'$  et  $Post'$  sont les restrictions de  $Pre$  et  $Post$  à  $T'$ . Le RdP  $N'$  peut être considéré comme obtenu à partir de  $N$  en supprimant toutes les transitions dans  $T \setminus T'$ . On écrit :  $N' \prec_{T'} N$

## 5.2. Explications minimales et E-vecteurs

## a. Définition 1 : Explications et E-vecteurs

Soit un marquage  $M$  et une transition observable  $t \in T_o$ , on définit l'ensemble des explications de  $t$  au marquage  $M$  par :

$$\Sigma(M, t) = \{\sigma \in T_u^* \mid M[\sigma] > M', M' \geq Pre(\cdot, t)\} \quad (10)$$

Et on définit les e-vecteurs ou les vecteurs des explications (les vecteurs de tir associés aux explications), par :

➤ Pour un réseau de Petri discret :

$$Y(M, t) = \{e \in \mathbb{N}^{n_u} \mid \exists \sigma \in \Sigma(M, t) : \Pi(\sigma) = e\} \quad (11)$$

➤ Pour un réseau de Petri continu :

$$Y(M, t) = \{e \in \mathbb{R}^{m_u} \mid \exists \sigma \in \Sigma(M, t) : \Pi(\sigma) = e\} \quad (12)$$

Ainsi,  $\Sigma(M, t)$  est l'ensemble des séquences inobservables dont le tir en  $M$  permet la transition  $t$ .

Parmi les séquences ci-dessus, on veut sélectionner celles dont le vecteur de tir est minimal. Les vecteurs de tir de ces séquences sont appelés e-vecteurs minimaux.

## b. Définition 2 : Explications minimales et E-vecteurs minimaux

Soit un marquage  $M$  et une transition observable  $t \in T_o$ , on définit l'ensemble des explications minimales de  $t$  au marquage  $M$ , par :

$$\Sigma_{\min}(M, t) = \{\sigma \in \Sigma(M, t) \mid \nexists \sigma' \in \Sigma(M, t) : \Pi(\sigma') \prec \Pi(\sigma)\} \quad (13)$$

Et l'ensemble des e-vecteurs minimaux correspondant (pour un réseau de Petri discret) est défini par :

$$Y_{\min}(M, t) = \{e \in \mathbb{N}^{m_u} \mid \exists \sigma \in \Sigma_{\min}(M, t) : \Pi(\sigma) = e\} \quad (14)$$

### 5.3. Marquages de base et J-vecteurs :

Ces notions ont été définies dans les travaux de [136] [85] [138] [137] :

Cette partie du manuscrit introduit deux concepts importants pour la méthode de diagnostic que nous avons proposé : Marquages de base et J-vecteurs.

Un marquage de base  $M_{b,\omega}$  est un marquage atteint depuis le marquage initial  $M_0$  avec le tir du mot observé  $\omega$  et de toutes les transitions inobservables dont le tir est nécessaire pour activer  $\omega$ .

Un J-vecteur  $y \in Y_{\min}(M_0, \omega)$  est un vecteur de tir des transitions inobservables dont le tir est nécessaire pour atteindre  $M_{b,\omega}$ .

#### a. Définition 1 : Justifications et J-vecteurs

Soit  $\langle N, M_0 \rangle$  un réseau de Petri, où  $N = (P, T, Pre, Post)$  et  $T = T_o \cup T_u$ , soit  $\sigma \in L(N, M_0)$  une séquence tirable et  $\omega \in P_o(\sigma)$  le mot observé correspondant. On définit l'ensemble des justifications de  $\omega$  par :

$$J(\omega) = \{ \sigma_u \in T_u^* \mid [\exists \sigma \in L(\omega) : \sigma_u = P_u(\sigma)] \wedge [\nexists \sigma' \in L(\omega) : \sigma_u' = P_u(\sigma') \wedge \Pi(\sigma_u') < \Pi(\sigma_u)] \} \quad (15)$$

L'ensemble des J-vecteurs correspondant est défini par :

$$Y_{\min}(M_0, \omega) = \{ y \in \mathbb{N}^{m_u} \mid \exists \sigma_u \in J(\omega) : \Pi(\sigma_u) = y \} \quad (16)$$

En termes simples,  $J(\omega)$  est l'ensemble des séquences des transitions inobservables cohérentes avec  $\omega$  dont le tir permet  $\omega$  et dont le vecteur de tir est minimal. Les vecteurs de tir de ces séquences sont appelés J-vecteurs.

#### b. Définition 2 : Marquage de base

Soit  $\langle N, M_0 \rangle$  un réseau de Petri, où  $N = (P, T, Pre, Post)$  et  $T = T_o \cup T_u$ . Soit  $\omega$  une observation donnée et  $\sigma_u \in J(\omega)$  une de ses justifications minimales :

$$M_{b,\omega} = M_0 + C_u \cdot y + C \cdot y' \quad (17)$$

Où :  $y = \Pi(\sigma_u)$ ,  $y' = \Pi(\omega)$  ;

Ce marquage est appelé marquage de base et  $y$  est appelé son J-vecteur (Vecteur de justifications).

Evidemment, parce qu'en général il existe plus d'une justification pour un mot  $\omega$  (l'ensemble  $J(\omega)$  n'est pas un singleton), le marquage de base peut également ne pas être unique. En outre, deux ou plusieurs J-vecteurs peuvent correspondre au même marquage de base.

## c. Définition 3 : Ensemble de tous les marquages de base

Soit  $\langle N, M_0 \rangle$  un réseau de Petri, où  $N = (P, T, Pre, Post)$  et  $T = T_o \cup T_u$ . Soit  $\omega \in T_o^*$  un mot observé. L'ensemble des marquages de base à  $\omega$  est noté :

$$\mathcal{M}_{base}(\omega) = \{M \in \mathbb{N}^n \mid \exists y \in \mathbb{N}^{m_u} \text{ et } (M, y) \in \mathcal{M}(\omega)\} \quad (18)$$

L'ensemble des couples (Marquage de base, J-vecteur relatif) qui sont cohérents avec  $\omega \in T_o^*$ , est défini par :

$$\mathcal{M}(\omega) = \{(M, y) \mid \exists \sigma \in L(\omega) : M_0 [\sigma \rangle M \wedge M \in \mathcal{M}_{b,\omega} \wedge Y_{\min}(M_0, \omega)\} \quad (19)$$

L'ensemble des marquages de base de  $\omega$  est défini par :

$$\mathcal{M}_{base}(\omega) = \{M \in \mathbb{N}^m \mid \exists y \in \mathbb{N}^{m_u} \text{ et } (M, y) \in \mathcal{M}(\omega)\} \quad (20)$$

L'ensemble de tous les marquages de base pour toutes les observations, est noté :

$$\mathcal{M}_{base} = \bigcup_{\omega \in T_o^*} \mathcal{M}_{base}(\omega) \quad (21)$$

## 6. Quelques propriétés des réseaux de Petri

## ➤ Places bornées et RdP borné

Une place discrète  $P$  est dite bornée pour un marquage initial  $M_0$  donné si et seulement si  $\exists k \in \mathbb{N}$ ,  $\forall M \in R(N, M_0)$ ,  $M(P) \leq k$ , la place  $P$  est donc  $k$ -bornée.

Une place continue  $P$  est dite bornée pour un marquage initial  $M_0$  donné si et seulement si  $\exists k \in \mathbb{R}_+$ ,  $\forall M \in R(N, M_0)$ ,  $M(P) \leq k$ , la place  $P$  est donc  $k$ -bornée.

Un RdP est dit borné si et seulement si toutes ses places sont bornées.

Un RdP non borné est dit sauf/ binaire.

## ➤ Vivacité

Une transition  $T_j$  est vivante pour un marquage initial  $M_0$  si elle peut toujours être franchie à partir d'un marquage atteignable quelconque :  $\forall M \in R(N, M_0)$ ,  $\exists \sigma, \sigma' / M [\sigma T_j \sigma' \rangle$

Un RdP vivant est un RdP dans lequel toutes les transitions sont vivantes.

## ➤ Blocage

Un blocage est un marquage dans lequel aucune transition n'est franchissable.

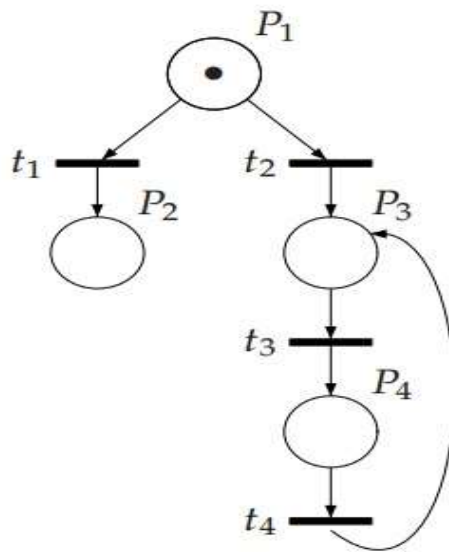


Figure 41: RdP en blocage

➤ Conflit

- Conflit structurel

Deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont en conflit structurel si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée en commun :

$$\exists p \text{ Pre}(p, t_1) \cdot \text{Pre}(p, t_2) \neq 0 \quad (22)$$

- Conflit effectif

Deux transitions sont en conflit effectif pour un marquage  $M$  si et seulement si  $t_1$  et  $t_2$  sont en conflit structurel et que :

$$M \geq \text{Pre}(p, t_1)$$

$$M \geq \text{Pre}(p, t_2)$$

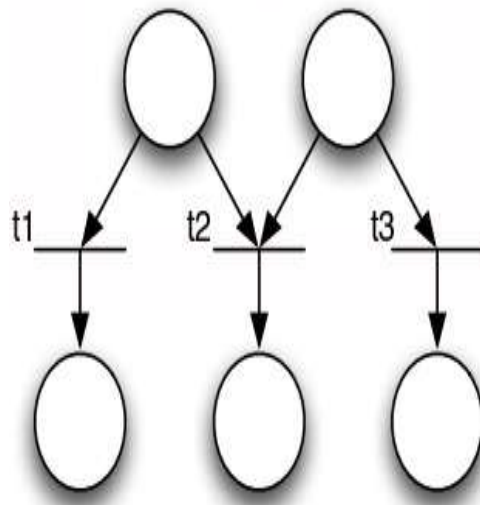


Figure 42: RdP en conflit

➤ Parallélisme

- Parallélisme structurel

Deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont parallèles structurellement si :

$$\text{Pre}(p,t_1)^T \times \text{Pre}(p,t_2) = 0 \quad (23)$$

Elles n'ont donc aucune place d'entrée commune (le produit scalaire de leurs vecteurs Pre est nul).

- Parallélisme effectif

Deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont parallèles pour un marquage donné  $M$  si et seulement si elles sont parallèles structurellement et :

$$M \geq \text{Pre}(p,t_1)$$

$$M \geq \text{Pre}(p,t_2)$$

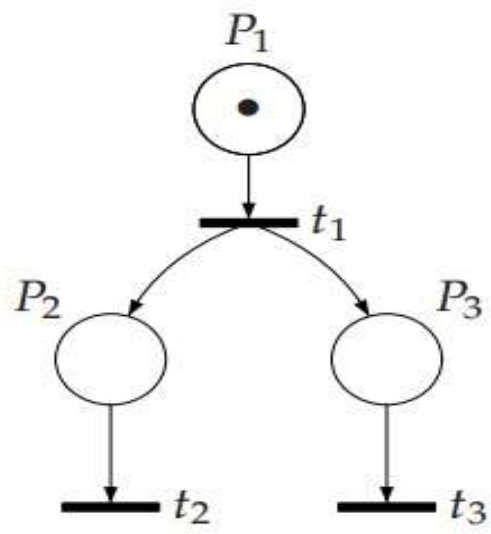


Figure 43: Transitions parallèles



## **Chapitre 2 : Méthode proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides**

### 1. Problématique

Les systèmes industriels ne sont plus considérés élémentaires mais deviennent de plus en plus sophistiqués, ce qui rend la tâche de diagnostic très complexe. Un système de surveillance efficace est avéré légitime pour améliorer la fiabilité des équipements de production et assurer la sécurité du personnel.

Le but du diagnostic est non seulement de déterminer si un défaut se produit, mais également de localiser le composant défectueux et ainsi d'identifier le problème. Par conséquent, le diagnostic est défini comme l'ensemble des actions mises en œuvre afin de détecter, localiser et identifier tout phénomène anormal sur le système.

Le diagnostic des systèmes industriels a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques. Deux communautés scientifiques différentes, à savoir les systèmes continus et les systèmes à événements discrets, ont contribué au développement de méthodes de détection et de localisation des défauts, dont l'objectif est de garantir une sécurité optimale des installations industrielles.

### 2. Hypothèses

Dans ce travail :

- Les classes de défauts mixtes, constituées de transitions continues et de transitions discrètes, ne sont pas considérées : Habituellement, les transitions de fautes qui appartiennent à la même classe de fautes sont des transitions qui représentent le même comportement physique défectueux. Ainsi, nous considérons dans notre travail que les classes de fautes discrètes ne contiennent que des transitions discrètes et que les classes de fautes continues ne contiennent que des transitions continues.
- Les réseaux de Petri hybrides considérés sont autonomes non-temporels : Pour pouvoir généraliser notre approche pour toutes les classes des systèmes industriels hybrides.
- $T_{co}^*$  est l'ensemble de toutes les séquences pouvant être obtenues en combinant des éléments dans l'ensemble des transitions observables continues.
- $T_{do}^*$  est l'ensemble de toutes les séquences pouvant être obtenues en combinant des éléments dans l'ensemble des transitions observables discrètes.

- $T_f = T_{df} \cup T_{cf}$ , où  $T_{df}$  inclut toutes les transitions de défauts discrètes et  $T_{cf}$  inclut toutes les transitions de défauts continus.
- $T_{df} = T_{df}^1 \cup T_{df}^2 \cup \dots \cup T_{df}^r$ , l'ensemble  $T_{df}$  est partitionné en  $r$  sous-ensembles différents où toutes les transitions discrètes dans le même sous-ensemble correspondent à la même classe de défauts.
- $T_{cf} = T_{cf}^1 \cup T_{cf}^2 \cup \dots \cup T_{cf}^q$ , l'ensemble  $T_{cf}$  est partitionné en  $q$  sous-ensembles différents où toutes les transitions continues dans le même sous-ensemble correspondent à la même classe de défauts.
- On suppose que les fautes sont modélisées par des transitions inobservables, mais il peut exister des comportements réguliers qui sont également représentés par des transitions inobservables.

### 3. Etats du diagnostiqueur

Un diagnostiqueur est une fonction qui associe à chaque observation  $\omega$  et à chaque classe de fautes  $T_f^i, i=1, 2, \dots, r$  un état de diagnostic :

#### 3.1. Diagnostiqueur discret

$$\Delta_d : T_{do}^* \times \{T_f^1, T_f^2, \dots, T_f^r\} \rightarrow \{0, 1, 2, 3\} \quad (24)$$

- $\Delta_d(\omega, T_{df}^i) = 0$  si pour tout  $\sigma \in L(\omega)$  et pour tout  $t_f \in T_{df}^i$  on a  $t_f \notin \sigma$ .

Dans ce cas, la  $i^{\text{ème}}$  faute ne peut pas s'être produite, car aucune des séquences de tir cohérentes avec l'observation ne contient des transitions de classe de fautes  $i$ .

- $\Delta_d(\omega, T_{df}^i) = 1$  si il existe  $\sigma \in L(\omega)$  et  $t_f \in T_{df}^i$  tel que  $t_f \in \sigma$ , mais pour tout  $\sigma \in J(\omega)$  et pour tout  $t_f \in T_{df}^i$  on a  $t_f \notin \sigma$ .

Dans ce cas, une transition de faute de classe  $i$  peut se produire, mais elle n'est incluse dans aucune justification de  $\omega$ .

- $\Delta_d(\omega, T_{df}^i) = 2$  si il existe  $\sigma, \sigma' \in J(\omega)$  tels que : il existe  $t_f \in T_{df}^i$  tel que  $t_f \in \sigma$  ; pour tout  $t_f \in T_{df}^i$  on a  $t_f \notin \sigma'$ .

Dans ce cas, une transition de faute de classe  $i$  est contenue dans une (mais pas toutes) justification de  $\omega$ .

- $\Delta_d(\omega, T_{df}^i)=3$  si pour tout  $\sigma \in L(\omega)$  il existe  $t_f \in T_{df}^i$  tel que  $t_f \in \sigma$ .

Dans ce cas, le  $i^{\text{ème}}$  défaut doit s'être produit, parce que toutes les séquences tirables cohérentes avec l'observation contiennent au moins une transition de faute de classe  $i$ .

### 3.2. Diagnostiqueur continu

$$\Delta_c: T_{co}^* \times \{T_f^1, T_f^2, \dots, T_f^n\} \rightarrow \{N, U, F\} \quad (25)$$

- $\Delta_c(\omega, T_{cf}^i)=N$  si pour tout  $\sigma \in L(\omega)$  et pour tout  $t_f \in T_{cf}^i$  on a  $t_f \notin \sigma$ .

Dans ce cas, le  $i^{\text{ème}}$  défaut ne peut pas s'être produit, car aucune des séquences de tir cohérentes avec l'observation ne contient des transitions de classe de défauts  $i$ .

- $\Delta_c(\omega, T_{cf}^i)=U$  si il existe  $\sigma \in L(\omega)$  et  $t_f \in T_{cf}^i$  tel que  $t_f \in \sigma$ , mais il existe  $\sigma' \in L(\omega)$  tel que pour tout  $t_f \in T_{cf}^i$  on a  $t_f \notin \sigma'$ .

Dans ce cas, une transition de classe de faute  $i$  peut s'être produite ou non, c'est-à-dire, qu'elle est incertaine, et nous n'avons aucun critère pour tirer une conclusion de cet égard.

- $\Delta_c(\omega, T_{cf}^i)=F$  si pour tout  $\sigma \in L(\omega)$ , il existe  $t_f \in T_{cf}^i$  tel que  $t_f \in \sigma$ .

Dans ce cas, le  $i^{\text{ème}}$  défaut doit s'être produit, parce que toutes les séquences tirables cohérentes avec l'observation contiennent au moins une transition de faute de classe  $i$ .

## 4. Algorithme : Diagnostic des systèmes industriels hybrides basé sur les réseaux de Petri hybride

Les travaux de [85] et [138] portent sur les systèmes à événements discrets. Dans notre algorithme, nous avons essayé d'étendre leurs résultats afin de diagnostiquer les systèmes industriels hybrides en introduisant l'aspect continu.

En se basant sur ces travaux, nous proposons l'algorithme ci-après, qui détermine les états d'un diagnostiqueur hybride basé sur les réseaux de Petri hybrides.

soit  $\omega = \varepsilon$

soit  $\bar{Y}(M_0, \omega)$  le polytope défini comme suit

$$\begin{cases} M = M_0 + C_u \cdot e \\ M \geq 0 \\ 0 \leq e \leq EN \end{cases}$$

attendre une nouvelle observation  $t(\alpha)$ .

soit  $\omega' = \omega$  et  $\omega = \omega' \cdot t(\alpha)$ .

calculer l'ensemble des sommets  $\mathcal{M}(\omega)$

si  $\omega \in T_{co}^*$ ,

$$\begin{cases} (M, y) \in \bar{Y}(M_0, \omega) \\ M \geq \alpha \cdot \text{Pre}(\cdot, t_j) \end{cases}$$

si  $\omega \in T_{do}^*$ ,

$$\begin{cases} (M, y) \in \bar{Y}(M_0, \omega) \\ M \geq \text{Pre}(\cdot, t_j) \end{cases}$$

soit  $\mathcal{M}(\omega) = \emptyset$ .

pour tous les nœuds contenant  $M'$ :  $(M', y') \in \mathcal{M}(\omega')$ , faire

pour tous les arcs sortant du nœud avec  $M'$ , faire

soit  $M$  le marquage du nœud de sortie et  $e$  le e-vecteur minimal au bord de  $M'$  à  $M$ ,  $M = M' + C_u \cdot e + \alpha \cdot C(\cdot, t)$ , tel que  $\alpha = 1$  pour une transition discrète et  $0 < \alpha \leq 1$  pour une transition continue,

pour tout  $y'$  tel que  $(M', y') \in \mathcal{M}(\omega')$ , faire

soit  $y = y' + e$ ,

soit  $\mathcal{M}(\omega) = \mathcal{M}(\omega) \cup \{(M, y)\}$ .

pour tout  $i= 1, \dots, r$ , faire

- si  $\forall (M,y) \in \mathcal{M}(\omega)$ , faire
  - si  $\forall t_f \in T_{cf}^i$  on a  $y(t_f)=0$ , faire
    - soit  $\Delta_h(\omega, T_{cf}^i)=N$ ;
  - si  $\forall t_f \in T_{df}^i$  on a  $y(t_f)=0$ , faire
    - si  $\forall (M,y) \in \mathcal{M}(\omega)$  on a  $x(i)=0$ ,
- Où  $x$  est le vecteur binaire dans le nœud, faire
  - soit  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i)=0$
  - sinon
    - soit  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i)=1$
- si  $\exists (M,y) \in \mathcal{M}(\omega)$  et  $(M',y') \in \mathcal{M}(\omega')$  tels que.:
  - $\exists t_f \in T_{cf}^i$  tel que  $y(t_f)>0 \wedge y'(t_f)=0$ , faire
    - soit  $\Delta_h(\omega, T_{cf}^i)=U$ ;
  - $\exists t_f \in T_{df}^i$  tel que  $y(t_f)>0 \wedge y'(t_f)=0$ , faire
    - soit  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i)=2$ ,
- si  $\forall (M,y) \in \mathcal{M}(\omega)$ , faire
  - si  $\exists t_f \in T_{cf}^i$ :  $y(t_f)>0$ , faire
    - soit  $\Delta_h(\omega, T_{cf}^i)=F$ ;
  - si  $\exists t_f \in T_{df}^i$ :  $y(t_f)>0$ , faire
    - soit  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i)=3$ ,

aller à l'étape 3.

En termes simples ; cet algorithme, en premier lieu, en étape 2, calcule l'ensemble des  $\bar{Y}(M_0, \varepsilon)$ . Par définition, il inclut tous les vecteurs de tir correspondant aux séquences des transitions inobservables qui sont activées au marquage initial.

Puis, après une nouvelle observation  $t(\alpha)$ , il calcule l'ensemble de  $\mathcal{M}(\omega)$ . Tous les couples  $(M, y)$ , tels qu'un arc étiqueté  $t(\alpha)$  existe à partir du nœud initial et se termine par un nœud contenant le marquage de base  $M$ , sont inclus dans l'ensemble  $\mathcal{M}(\omega)$ . La valeur correspondante de  $y$  est égale au e-vecteur dans l'arc allant de  $M_0$  à  $M$ .

En général, si  $\omega'$  est l'observation actuelle, et qu'une nouvelle observation  $t(\alpha)$  se déclenche, il faut considérer tous les couples  $(M', y') \in \mathcal{M}(\omega')$  et tous les nœuds qui peuvent être atteints à partir de  $M'$  avec un arc marqué  $t(\alpha)$ .

Soit  $M$  le marquage de base du nœud générique résultant. Inclure dans  $\mathcal{M}(\omega) = \mathcal{M}(\omega' \cdot t(\alpha))$  tous les couples  $(M, y)$ , où pour tout  $M$ ,  $y$  est égal à la somme de  $y'$  et le e-vecteur étiquetant l'arc de  $M'$  à  $M$ .

L'étape 8 de l'algorithme calcule les états de diagnostic. Si  $\forall (M, y) \in \mathcal{M}(\omega)$  et  $\forall t_f \in T_{cf}^i$  on a  $y(t_f) = 0$ , alors l'état du diagnostiqueur hybride est  $N$ , si  $\forall t_f \in T_{df}^i$  on a  $y(t_f) = 0$ , la ième entrée de tous les vecteurs de rang binaire associés aux marquages de base  $M$  doit être vérifiée, telle que  $(M, y) \in \mathcal{M}(\omega)$ .

Si ces entrées sont toutes égales à 0, on a  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i) = 0$ , sinon on a  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i) = 1$ .

En revanche, si  $\exists (M, y) \in \mathcal{M}(\omega)$  et  $(M', y') \in \mathcal{M}(\omega')$  et  $\exists t_f \in T_{cf}^i$  tels que  $y(t_f) > 0 \wedge y'(t_f) = 0$ , dans ce cas  $\Delta_h(\omega, T_{cf}^i) = U$ ; si  $\exists t_f \in T_{df}^i$  tel que  $y(t_f) > 0 \wedge y'(t_f) = 0$ , dans ce cas  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i) = 2$ .

Finalement, si  $\forall (M, y) \in \mathcal{M}(\omega)$  et si  $\exists t_f \in T_{cf}^i$ :  $y(t_f) > 0$ , dans ce cas  $\Delta_h(\omega, T_{cf}^i) = F$ ; si  $\exists t_f \in T_{df}^i$ :  $y(t_f) > 0$ , dans ce cas  $\Delta_h(\omega, T_{df}^i) = 3$ .

### 5. Exemple d'application : Ligne de production

L'exemple suivant est inspiré de [137]. Dans l'article de Cabasino, les auteurs ont considéré une ligne de fabrication similaire à l'exemple que nous avons proposé, sauf qu'ils ont supposé que cette ligne fonctionne en mode discret. Dans ce qui suit, nous appliquerons notre méthode de diagnostic proposée précédemment tout en considérant une ligne de production en fonctionnement hybride.

Il s'agit d'une ligne de production traitant des pièces endommagées, à savoir un bloc métallique où une plaque a été placée dans une mauvaise position.

Lorsqu'une les pièces endommagées ( $x+y$  pièces) sont prêtes à être traitées (jetons en  $p_1$ ), les blocs et plaques sont séparées (transition  $t_1$ ) et les  $x$  plaques sont envoyées dans la ligne supérieure (modélisée par les emplacements  $p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ ), tandis que les  $y$  blocs sont envoyés sur la ligne inférieure (modélisée par les emplacements  $p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}$ ). Dans les deux lignes, les pièces sont traitées, à savoir lissées, nettoyées, peintes et polies (cela correspond au tir des transitions  $\varepsilon_3$  à  $\varepsilon_{10}$ ). Enfin une plaque métallique est insérée dans le bloc dans la bonne position (transition  $t_2$ ).

Nous avons modélisé cette ligne par un réseau de Petri hybride (figure 44), où :

- $P^C = \{P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}\}$  est l'ensemble des places continues.
- $P^D = \{P_1, P_{12}, P_{13}, P_{14}\}$  est l'ensemble des places discrètes.
- $T^C = \{\varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6, \varepsilon_7, \varepsilon_8, \varepsilon_9, \varepsilon_{10}\}$  est l'ensemble des transitions continues.
- $T^D = \{t_1, t_2, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}\}$  est l'ensemble des transitions discrètes.
- $M_0 = [x+y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$  est le marquage initial.

$T_1$  est franchie par  $x+y$  ( $x$  plaques pour la ligne supérieure et  $y$  blocs pour la ligne inférieure).

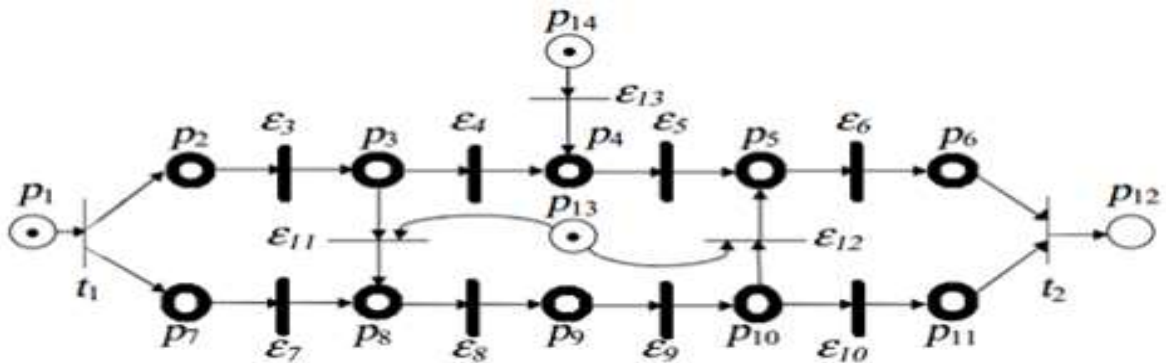


Figure 44: Réseau de Petri hybride d'une ligne de fabrication

On considère :

- L'ensemble des transitions observables :  $T_o = \{t_1, t_2\}$ .
- L'ensemble des transitions inobservables :  $T_u = \{\varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6, \varepsilon_7, \varepsilon_8, \varepsilon_9, \varepsilon_{10}, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}\}$ .

Deux différentes classes de fautes :

- $T_f^1 = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}\}$  si une plaque est déplacée vers la ligne inférieure ou un bloc est déplacé vers la ligne supérieure.
- $T_f^2 = \{\varepsilon_{13}\}$  si une plaque de type différent entre à la ligne supérieure.
- L'ensemble des transitions inobservables régulières :  $T_{reg} = \{\varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6, \varepsilon_7, \varepsilon_8, \varepsilon_9, \varepsilon_{10}\}$ .

**L'ensemble des marquages compatibles avec  $\omega \in T_o^*$  :**

- On suppose qu'aucun événement n'est observé, c'est-à-dire  $\omega = \varepsilon$ .

Alors :  $L(\omega) = \{\varepsilon, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{13} \varepsilon_5, \varepsilon_{13} \varepsilon_5 \varepsilon_6\}$

Les marquages qui sont compatibles avec cette observation sont  $C(\varepsilon) = \{m_0, m_1, m_2, m_3\}$  ; où :

- $m_0 = [x+y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$  est le marquage initial ;
- $m_1 = [x+y \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$  ;
- $m_2 = [x+y \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$  ;
- $m_3 = [x+y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ .

- On suppose que  $t_1$  est observé,  $\omega = t_1$ . La transition  $t_1$  est activée par le marquage initial.

Plusieurs séquences peuvent être tirées compte tenu de cette observation :  $t_1 \varepsilon_3, t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4, t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \varepsilon_5, t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \varepsilon_{13}, \dots, t_1 \varepsilon_7, t_1 \varepsilon_7 \varepsilon_8, \dots$

Donc  $C(t_1)$  comprend tous les marquages qui sont atteints par le tir de ces séquences.

- On suppose que  $t_2$  est observé,  $\omega = t_2$ . Aucune séquence de transitions inobservables ne peut l'activer. Donc  $C(t_2) = L(t_2) = \emptyset$ .
- On suppose que  $\omega = t_1 t_2$  est observé. Dans ce cas, nous avons :

$L(t_1 t_2) = \{t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \varepsilon_5 \varepsilon_6 \varepsilon_7 \varepsilon_8 \varepsilon_9 \varepsilon_{10} t_2, \varepsilon_{13} t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \varepsilon_5 \varepsilon_6 \varepsilon_5 \varepsilon_6 \varepsilon_7 \varepsilon_8 \varepsilon_9 \varepsilon_{10} t_2, t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_{11} \varepsilon_8 \varepsilon_9 \varepsilon_{10} \varepsilon_{13} \varepsilon_5 \varepsilon_6 t_2, \varepsilon_{13} t_1 \varepsilon_3 \varepsilon_7 \varepsilon_8 \varepsilon_9 \varepsilon_{10} \varepsilon_5 \varepsilon_6, \dots\}$



$$C(t_1 t_2) = \{ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ x+y \ 1 \ 1], [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (x+y) \ 1 \ 0], [0 \ 0 \ x-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ x+1 \ 0 \ 0], [0 \ 0 \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ y+1 \ 1 \ 0], \dots \}$$

L'ensemble  $\mathcal{M}(\omega)$  :

- $\omega = t_1$

Dans ce cas, l'ensemble des justifications est :

$$J(t_1) = \{ \varepsilon \}$$

L'ensemble des J-vecteurs est :

$$Y_{\min}(M_0, t_1) = \{ \vec{0} \}$$

Donc le marquage de base associé à  $\omega = t_1$  est :

$$M_b = M_0 + C(\cdot, t_1)$$

$$M_b = [0 \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$$

Et son J-vecteur est  $\vec{0}$

D'où :

$$\mathcal{M}(t_1) = \{ M_b, \vec{0} \}$$

- $\omega = t_1 t_2$

Dans ce cas, l'ensemble des justifications est :

$$J(t_1 t_2) = \{ \varepsilon_3 \ \varepsilon_4 \ \varepsilon_5 \ \varepsilon_6 \ \varepsilon_7 \ \varepsilon_8 \ \varepsilon_9 \ \varepsilon_{10}, \varepsilon_3 \ \varepsilon_4 \ \varepsilon_5 \ \varepsilon_6 \ \varepsilon_3 \ \varepsilon_{11} \ \varepsilon_8 \ \varepsilon_9 \ \varepsilon_{10}, \varepsilon_3 \ \varepsilon_{11} \ \varepsilon_8 \ \varepsilon_9 \ \varepsilon_{10} \ \varepsilon_{13} \ \varepsilon_5 \ \varepsilon_6, \varepsilon_7 \ \varepsilon_8 \ \varepsilon_9 \ \varepsilon_{10} \ \varepsilon_{13} \ \varepsilon_5 \ \varepsilon_6, \dots \}$$

Où les points désignent toutes les autres séquences (qui n'ont pas été rapportées ici par souci de concision) qui sont activées au marquage de base  $M_b$  et qui ont le même vecteur de tir que les précédentes.

L'ensemble des J-vecteurs est :

$$Y_{\min}(M_b, t_2) = \{ [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, [2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T, [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T, [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T \}$$

Avec :

$$e_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$e_2 = [2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$$

$$e_3 = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T$$

$$e_4 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

Les marquages de base atteints après le tir de  $\omega$  sont :

$$M_b^1 = M_b + C_u \cdot e_1 + C(\cdot, t_2)$$

$$= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (x+y) \ 1 \ 1]^T$$

$$M_b^2 = M_b + C_u \cdot e_2 + C(\cdot, t_2)$$

$$= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (x+1) \ 0 \ 1]^T$$

$$M_b^3 = M_b + C_u \cdot e_3 + C(\cdot, t_2)$$

$$= [0 \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$$

$$M_b^4 = M_b + C_u \cdot e_4 + C(\cdot, t_2)$$

$$= [0 \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (y+1) \ 1 \ 0]^T$$

$$D'où : \mathcal{M}(t_1 t_2) = \{ (M_b^1, e_1), (M_b^2, e_2), (M_b^3, e_3), (M_b^4, e_4) \}$$

$$Et : Y_{\min}(M_0, \omega) = Y_{\min}(M_b, t_2) \text{ étant } Y_{\min}(M_0, t_1) = \{ \vec{0} \}$$

### Diagnosticueurs :

- $\omega = \varepsilon$

$$J(\varepsilon) = L(\varepsilon) = \{ \varepsilon \}$$

$\varepsilon_{13} \in T_f^2$  peut être tirée par le marquage initial  $m_0$ . Alors que les autres transitions de fautes ne sont pas activées par  $m_0$ .

$$\text{Donc} \quad \Delta_h(\varepsilon, T_f^1) = \mathbf{0} \text{ et } \Delta_h(\varepsilon, T_f^2) = \mathbf{1}$$

- $\omega=t_1$

$$J(t_1) = \{\varepsilon\}$$

Aucune transition de faute n'est contenue dans une justification de  $\omega=t_1$ . Mais par contre, toutes les transitions de fautes sont contenues dans au moins une séquence de  $L(t_1)$ .

Donc  $\Delta_h(t_1, T_f^1) = \Delta_h(t_1, T_f^2) = 1$

- $\omega=t_1t_2$

Toutes les transitions de fautes sont contenues dans au moins une séquence de  $J(t_1t_2)$ . Mais il existe des justifications de  $t_1t_2$  qui ne contiennent pas des transitions de fautes.

Donc  $\Delta_h(t_1t_2, T_f^1) = \Delta_h(t_1t_2, T_f^2) = 2$

- $\omega=t_1t_2 t_2$

Dans ce cas, toutes les justifications de  $\omega$  contiennent des transitions des deux classes.

$$\Delta_h(\omega, T_f^1) = \Delta_h(\omega, T_f^2) = 3$$

## **Conclusion**

Dans cette partie nous avons présenté notre approche proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides.

Le calcul du diagnostiqueur hybride se fait en différentes étapes qui sont présentées sous forme d'un algorithme. En premier lieu, on définit l'ensemble des marquages compatibles avec une observation, ensuite les ensembles de justifications et des J-vecteurs associés sont présentés. L'étape qui suit c'est la computation des marquages de base. En dernier lieu, on calcule les états du diagnostiqueur hybride en se basant sur les étapes précédentes.

La fin de cette partie est dédiée à un exemple d'application de notre approche qui s'agit d'une ligne de fabrication traitant deux types de pièces.

## **Conclusion générale et perspectives**

Dans ce rapport de thèse, nous avons présenté nos résultats de recherche scientifique qui s'inscrivent dans la problématique de diagnostic des systèmes hybrides. Nous avons proposé une méthode pour diagnostiquer un cas particulier des systèmes de production hybrides qui est basée sur les réseaux de Petri hybrides.

La première partie de ce rapport a présenté un aperçu général sur les systèmes dynamiques, à savoir les systèmes continus et les systèmes à événements discrets. Nous y avons présenté nos travaux, qui ont fait l'objet de trois articles scientifiques, ces articles analysent la tendance de la recherche scientifique pour les systèmes à événements discrets tout en justifiant le choix de notre sujet de thèse. Le deuxième chapitre de cette partie a concerné les systèmes dynamiques hybrides et la classe de ces systèmes qu'on a choisis pour appliquer notre méthode de diagnostic.

La partie B de ce manuscrit a représenté le diagnostic des systèmes dynamiques. Dans le premier chapitre de cette partie, nous avons introduit, tout d'abord, un lexique concernant le diagnostic des systèmes et nous avons cité les principales méthodes de diagnostic, à savoir les méthodes sans modèle et les méthodes à base de modèle. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur le diagnostic des systèmes dynamiques qui a fait l'objet d'un article scientifique.

Dans la dernière partie nous avons présenté notre approche proposée pour le diagnostic des systèmes industriels hybrides basée sur les réseaux de Petri hybrides.

Le calcul du diagnostiqueur hybride se fait en différentes étapes qui sont présentées sous forme d'un algorithme. En premier lieu, on définit l'ensemble des marquages compatibles avec une observation, ensuite les ensembles de justifications et des J-vecteurs associés sont présentés. L'étape qui suit c'est la computation des marquages de base. En dernier lieu, on calcule les états du diagnostiqueur hybride en se basant sur les étapes précédentes.

La fin de cette partie est dédiée à un exemple d'application de notre approche qui s'agit d'une ligne de fabrication traitant deux types de pièces.

Dans nos prochains travaux, nous comptons prendre en considération les perspectives suivantes :

- Une perspective à court terme est de généraliser cet exemple et considérer que les classes de fautes contiennent des transitions continues et discrètes.
- Une autre perspective est de considérer un réseau de Petri hybride temporisé vu que la plupart des systèmes manufacturiers prennent en considération la notion de temps.

## Bibliographie

- [1] P. P. H. H. Philips, "Modelling, control and fault detection of discretely-observed systems," 2001.
- [2] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to discrete event systems*: Springer Science & Business Media, 2009.
- [3] O. BENATIA, "Trend of scientific research: Analysis of the mega database of discrete event systems described by formal language, automata and LADDER."
- [4] O. Benatia, M. Fri, M. Msaaf, H. I. Alaoui, and F. Belmajdoub, "Trend of Scientific Research: Analysis of Mega-Data of Discrete Event Systems Described by Petri Nets and Their Extensions," *International Journal of Engineering Research*, vol. 5, pp. 16-22, 2016.
- [5] H. A. Ismaili, M. Fri, M. Msaaf, O. Benatia, and F. Belmajdoub, "Trend of Scientific research: Analysis of Mega-data of discrete event systems described by mathematical tools," *International Journal of Advanced Information Science Technology (IJAST)*, vol. 46, 2016.
- [6] O. Benatia and F. Belmajdoub, "An algorithm to diagnose manufacturing hybrid systems," *International Journal of Automation and Control*, vol. 13, pp. 374-386, 2019.
- [7] D. M. LE DIPLOME, "Etude et Analyse des Systèmes Dynamiques Hybrides: Approche par les Réseaux de Petri Hybrides et Automates Hybrides Linéaires," 2010.
- [8] M. S. Branicky, "Stability of switched and hybrid systems," in *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, 1994, pp. 3498-3503.
- [9] T. E. Mezayani, "Méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides," Lille 1, 2005.
- [10] P. J. Mosterman and G. Biswas, "A theory of discontinuities in physical system models," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 335, pp. 401-439, 1998.
- [11] M. Kurovsky, "Etude des systèmes dynamiques hybrides par représentation d'état discrète et automate hybride," 2002.
- [12] L. GHOMRI, "Synthèse de contrôleur de systèmes hybrides à flux continu par réseaux de Petri hybrides," 2012.
- [13] O. BENATIA and F. BELMAJDOUB, "OVERVIEW OF FAULT DIAGNOSIS METHODS FOR DYNAMIC SYSTEMS," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY*, vol 77, pp 623-630, 2017.
- [14] R. Zemouri, "Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques: Application à la e-maintenance," Université de Franche-Comté, 2003.
- [15] H. Derbel, "Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides," 2009.

- [16] A. Villemeur, "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité-facteurs humains, informatisation," 1988.
- [17] R. Valette, J. Cardoso, and D. Dubois, "Monitoring manufacturing systems by means of Petri nets with imprecise markings," in *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1989, pp. 25-26.
- [18] A. K. A. Toguyeni, "Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière," Lille 1, 1992.
- [19] A. Philippot, "Contribution au diagnostic décentralisé des systèmes à événements discrets: Application aux systèmes manufacturiers," *Université de Reims-Champagne Ardenne*, 2006.
- [20] D. Lefebvre, "Contribution à la modélisation des systèmes dynamiques à événements discrets pour la commande et la surveillance," *Habilitation" a Diriger des Recherches, Universit*, 2000.
- [21] E. Deschamps, "Diagnostic de services pour la reconfiguration dynamique de systèmes à événements discrets complexes," 2007.
- [22] M. Combacau, L. Kouiss, and A. Toguyeni, "Fondements du pilotage des systèmes de production," *Traité ic2 productique edition*, 2002.
- [23] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels*: Hermès, 1995.
- [24] A. S. Willsky, "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems," 1975.
- [25] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey," *automatica*, vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [26] E. Chow and A. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 29, pp. 603-614, 1984.
- [27] J. Gertler and D. Singer, "A New Structural Framework for Parity Equation-based Failure Detection," *Automatica*, vol. 26, pp. 381-388, 1990.
- [28] R. V. Beard, "Failure accomodation in linear systems through self-reorganization," Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [29] H. L. Jones, "Failure detection in linear systems," Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- [30] K. Bousson, J. Steyer, L. Travé-Massuyès, and B. Dahhou, "From a rule-based to a predictive qualitative model-based approach using automated model generation: Application to the monitoring and diagnosis of biological processes," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 11, pp. 477-493, 1998.
- [31] J. Montmain, "Interprétation qualitative de simulations pour le diagnostic en ligne de procédés continus," Grenoble INPG, 1992.
- [32] P. J. Mosterman, "Diagnosis of physical systems with hybrid models using parametrized causality," in *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2001, pp. 447-458.



- [33] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Diagnosability of discrete-event systems," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 40, pp. 1555-1575, 1995.
- [34] P. Bhowal, D. Sarkar, S. Mukhopadhyay, and A. Basu, "Fault diagnosis in discrete time hybrid systems—a case study," *Information Sciences*, vol. 177, pp. 1290-1308, 2007.
- [35] M. Gomaa and S. Gentil, "Hybrid industrial dynamical system supervision via hybrid continuous causal Petri nets (HC2PNS)," in *Symposium on discrete events and manufacturing systems (Lille, July 9-12, 1996)*, 1996, pp. 285-290.
- [36] M. M. M. Gomaa, "Représentation et supervision des systèmes hybrides par réseaux de Pétri," Grenoble INPG, 1997.
- [37] H. A. Ismaili and F. Belmajdoub, "Étude comparative des approches de construction d'un module de diagnostic des Systèmes à évènements discrets," 2015.
- [38] B. Dubuisson, "Diagnostic et reconnaissance des formes," Hermès Paris 1990.
- [39] O. Ondel, "Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone," 2006.
- [40] H. Koivo, "Artificial neural networks in fault diagnosis and control," *Control engineering practice*, vol. 2, pp. 89-101, 1994.
- [41] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, "Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, pp. 1062-1069, 2007.
- [42] M.-A. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 31, pp. 839-846, 1986.
- [43] M.-A. Massoumnia, G. C. Verghese, and A. S. Willsky, "Failure detection and identification," *IEEE transactions on automatic control*, vol. 34, pp. 316-321, 1989.
- [44] J. KORBICZ and K. PATAN, "DETECTION AND ISOLATION SYSTEMS T," *Int. J. Appl. Math. and Comp. Sci*, vol. 9, pp. 519-546, 1999.
- [45] P. Frank and N. Kiupel, "Fdi with computer-assisted human intelligence," in *Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No. 97CH36041)*, 1997, pp. 913-917.
- [46] Q. Zhang, M. Basseville, and A. Benveniste, "Fault detection and isolation in nonlinear dynamic systems: A combined input–output and local approach," *Automatica*, vol. 34, pp. 1359-1373, 1998.
- [47] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results," *automatica*, vol. 26, pp. 459-474, 1990.
- [48] J. Gertler, "Analytical redundancy methods in fault detection and isolation-survey and synthesis," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 24, pp. 9-21, 1991.
- [49] R. J. Patton and J. Chen, "A review of parity space approaches to fault diagnosis," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 24, pp. 65-81, 1991.

- [50] M. Staroswiecki and G. Comtet-Varga, "Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems," *Automatica*, vol. 37, pp. 687-699, 2001.
- [51] R. Isermann, "Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods—an introduction," *Control engineering practice*, vol. 5, pp. 639-652, 1997.
- [52] W. Liu, E. Schaeffer, L. Loron, and P. Chanemouga, "High frequency modelling of stator windings dedicated to machine insulation diagnosis by parametric identification," in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2007, pp. 480-485.
- [53] A. Xu and Q. Zhang, "Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation," *Automatica*, vol. 40, pp. 1181-1193, 2004.
- [54] H. Hammouri, P. Kabore, and M. Kinnaert, "A geometric approach to fault detection and isolation for bilinear systems," *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 46, pp. 1451-1455, 2001.
- [55] H. Hammouri, M. Kinnaert, and E. El Yaagoubi, "Observer-based approach to fault detection and isolation for nonlinear systems," *IEEE transactions on automatic control*, vol. 44, pp. 1879-1884, 1999.
- [56] B. Jiang and F. N. Chowdhury, "Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 342, pp. 725-736, 2005.
- [57] H. Nijmeijer and T. I. Fossen, *New directions in nonlinear observer design* vol. 244: Springer Berlin, 1999.
- [58] F. Basile, P. Chiacchio, and G. De Tommasi, "An efficient approach for online diagnosis of discrete event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, pp. 748-759, 2009.
- [59] S. Tripakis, "Fault diagnosis for timed automata," in *International symposium on formal techniques in real-time and fault-tolerant systems*, 2002, pp. 205-221.
- [60] P. Bouyer, F. Chevalier, and D. D'Souza, "Fault diagnosis using timed automata," in *International Conference on Foundations of Software Science and Computation Structures*, 2005, pp. 219-233.
- [61] S. H. Zad, R. H. Kwong, and W. M. Wonham, "Fault diagnosis in discrete-event systems: Incorporating timing information," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, pp. 1010-1015, 2005.
- [62] S. Jiang and R. Kumar, "Diagnosis of repeated failures for discrete event systems with linear-time temporal-logic specifications," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 3, pp. 47-59, 2006.
- [63] F. Cassez, "A note on fault diagnosis algorithms," in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, 2009, pp. 6941-6946.
- [64] J. Lunze and J. Schröder, "State observation and diagnosis of discrete-event systems described by stochastic automata," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 11, pp. 319-369, 2001.

- [65] X. Wang, I. Chattopadhyay, and A. Ray, "Probabilistic fault diagnosis in discrete event systems," in *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)(IEEE Cat. No. 04CH37601)*, 2004, pp. 4794-4799.
- [66] E. Athanasopoulou and C. N. Hadjicostis, "Probabilistic approaches to fault detection in networked discrete event systems," *IEEE transactions on neural networks*, vol. 16, pp. 1042-1052, 2005.
- [67] D. Thorsley and D. Teneketzis, "Diagnosability of stochastic discrete-event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, pp. 476-492, 2005.
- [68] D. Thorsley, T.-S. Yoo, and H. E. Garcia, "Diagnosability of stochastic discrete-event systems under unreliable observations," in *2008 American Control Conference*, 2008, pp. 1158-1165.
- [69] E. Fabre and L. Jezequel, "On the construction of probabilistic diagnosers," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, pp. 229-234, 2010.
- [70] T. Ushio, I. Onishi, and K. Okuda, "Fault detection based on Petri net models with faulty behaviors," in *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 98CH36218)*, 1998, pp. 113-118.
- [71] S.-L. Chung, "Diagnosing PN-based models with partial observable transitions," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 18, pp. 158-169, 2005.
- [72] M. Ghazel, M. Bigand, and A. Toguyéni, "A temporal-constraint based approach for monitoring of DESs under partial observation," in *16th IFAC Triennial World Congress*, 2005.
- [73] Y. Wen, C. Li, and M. Jeng, "A polynomial algorithm for checking diagnosability of Petri nets," in *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2005, pp. 2542-2547.
- [74] Y. Wu and C. N. Hadjicostis, "Algebraic approaches for fault identification in discrete-event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, pp. 2048-2055, 2005.
- [75] P. E. Miyagi and L. A. M. Riascos, "Modeling and analysis of fault-tolerant systems for machining operations based on Petri nets," *Control Engineering Practice*, vol. 14, pp. 397-408, 2006.
- [76] A. Ramírez-Treviño, E. Ruiz-Beltrán, I. Rivera-Rangel, and E. Lopez-Mellado, "Online fault diagnosis of discrete event systems. A Petri net-based approach," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 4, pp. 31-39, 2007.
- [77] D. Lefebvre and C. Delherm, "Diagnosis of DES with Petri net models," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 4, pp. 114-118, 2007.
- [78] E. Hernandez-Flores, E. Lopez-Mellado, and A. Ramirez-Trevino, "Diagnosability analysis of partially observable deadlock-free Petri Nets," in *2011 3rd International Workshop on Dependable Control of Discrete Systems*, 2011, pp. 174-179.
- [79] A. Benveniste, E. Fabre, S. Haar, and C. Jard, "Diagnosis of asynchronous discrete-event systems: a net unfolding approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, pp. 714-727, 2003.
- [80] E. Fabre, A. Benveniste, S. Haar, and C. Jard, "Distributed monitoring of concurrent and asynchronous systems," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 15, pp. 33-84, 2005.

- [81] S. Genc and S. Lafortune, "Distributed diagnosis of place-bordered Petri nets," *IEEE Transactions on Automation science and Engineering*, vol. 4, pp. 206-219, 2007.
- [82] G. Jiroveanu, R. K. Boel, and B. Bordbar, "On-line monitoring of large Petri net models under partial observation," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 18, pp. 323-354, 2008.
- [83] G. Jiroveanu and R. K. Boel, "The diagnosability of Petri net models using minimal explanations," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55, pp. 1663-1668, 2010.
- [84] M. P. Fanti, A. M. Mangini, and W. Ukovich, "Fault detection by labeled Petri nets and time constraints," in *2011 3rd International Workshop on Dependable Control of Discrete Systems*, 2011, pp. 168-173.
- [85] M. P. Cabasino, A. Giua, M. Pocci, and C. Seatzu, "Discrete event diagnosis using labeled Petri nets. An application to manufacturing systems," *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 989-1001, 2011.
- [86] J. Zaytoon and S. Lafortune, "Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 37, pp. 308-320, 2013.
- [87] R. K. Boel and J. H. van Schuppen, "Decentralized failure diagnosis for discrete-event systems with costly communication between diagnosers," in *Sixth International Workshop on Discrete Event Systems, 2002. Proceedings.*, 2002, pp. 175-181.
- [88] H. Chakib and A. Khoumsi, "Multi-decision diagnosis: Decentralized architectures cooperating for diagnosing the presence of faults in discrete event systems," *Discrete event dynamic systems*, vol. 22, pp. 333-380, 2012.
- [89] R. Debouk, S. Lafortune, and D. Teneketzis, "Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 10, pp. 33-86, 2000.
- [90] W. Qiu and R. Kumar, "Decentralized failure diagnosis of discrete event systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, vol. 36, pp. 384-395, 2006.
- [91] S. Takai and R. Kumar, "Decentralized diagnosis for nonfailures of discrete event systems using inference-based ambiguity management," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, vol. 40, pp. 406-412, 2010.
- [92] Y. Wang, T.-S. Yoo, and S. Lafortune, "Diagnosis of discrete event systems using decentralized architectures," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 17, pp. 233-263, 2007.
- [93] C. Zhou, R. Kumar, and R. S. Sreenivas, "Decentralized modular diagnosis of concurrent discrete event systems," in *2008 9th International Workshop on Discrete Event Systems*, 2008, pp. 388-393.
- [94] Y. Pencolé and A. Subias, "A Chronicle-based Diagnosability Approach for Discrete Timed-event Systems: Application to Web-Services," *J. UCS*, vol. 15, pp. 3246-3272, 2009.
- [95] R. Su, W. Wonham, J. Kurien, and X. Koutsoukos, "Distributed diagnosis for qualitative systems," in *Sixth International Workshop on Discrete Event Systems, 2002. Proceedings.*, 2002, pp. 169-174.

- [96] R. Su and W. Wonham, "A model of component consistency in distributed diagnosis," in *Discrete Event Systems 2004 (WODES'04): A Proceedings Volume from the 7th IFAC Workshop, Reims, France, 22-24 September 2004*, 2005, p. 417.
- [97] N. B. Hadj-Alouane, M. Yeddes, A. B. Hadj-Alouane, and F. Lin, "A mixed integer dynamic programming approach to a class of optimal control problems in hybrid systems," *Cybernetics and Systems*, vol. 37, pp. 481-504, 2006.
- [98] J. De Kleer and B. C. Williams, "Diagnosing multiple faults," *Artificial intelligence*, vol. 32, pp. 97-130, 1987.
- [99] D. Dubois and H. Prade, "An overview of ordinal and numerical approaches to causal diagnostic problem solving," in *Abductive reasoning and learning*, ed: Springer, 2000, pp. 231-280.
- [100] C. H. Goodrich, J. Kurien, and D. Clancy, "Continuous measurements and quantitative constraints: Challenge problems for discrete modeling techniques," 2001.
- [101] J. Lunze, "Diagnosis of quantised systems by means of timed discrete-event representations," in *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2000, pp. 258-271.
- [102] S. Narasimhan and G. Biswas, "Model-based diagnosis of hybrid systems," *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and humans*, vol. 37, pp. 348-361, 2007.
- [103] P. J. Mosterman and G. Biswas, "Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, vol. 29, pp. 554-565, 1999.
- [104] F. Zhao, X. Koutsoukos, H. Haussecker, J. Reich, and P. Cheung, "Monitoring and fault diagnosis of hybrid systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 35, pp. 1225-1240, 2005.
- [105] S. McIlraith, G. Biswas, D. Clancy, and V. Gupta, "Hybrid systems diagnosis," in *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2000, pp. 282-295.
- [106] D. Koller and U. Lerner, "Sampling in factored dynamic systems," in *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, ed: Springer, 2001, pp. 445-464.
- [107] X. Koutsoukos, J. Kurien, and F. Zhao, "Estimation of distributed hybrid systems using particle filtering methods," in *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2003, pp. 298-313.
- [108] X. D. Koutsoukos, "Estimation of hybrid systems using discrete sensors," in *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475)*, 2003, pp. 155-160.
- [109] M. Basseville, A. Benveniste, and L. Tromp, "Diagnosing hybrid dynamical systems: Fault graphs, statistical residuals and viterbi algorithms," in *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 98CH36171)*, 1998, pp. 3757-3762.
- [110] U. Lerner, R. Parr, D. Koller, and G. Biswas, "Bayesian fault detection and diagnosis in dynamic systems," in *Aaai/iaai*, 2000, pp. 531-537.

- [111] M. W. Hofbaur and B. C. Williams, "Mode estimation of probabilistic hybrid systems," in *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2002, pp. 253-266.
- [112] X. Koutsoukos, F. Zhao, H. Haussecker, J. Reich, and P. Cheung, "Fault modeling for monitoring and diagnosis of sensor-rich hybrid systems," in *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*, 2001, pp. 793-801.
- [113] V. Cocquempot, T. El Mezyani, and M. Staroswiecki, "Fault detection and isolation for hybrid systems using structured parity residuals," in *2004 5th Asian Control Conference (IEEE Cat. No. 04EX904)*, 2004, pp. 1204-1212.
- [114] L. B. Andrea Balluchi, M. D. Di Benedetto, and A. L. Sangiovanni-Vincentelli, "Design of Observers for Hybrid Systems," in *Hybrid Systems: Computation and Control: 5th International Workshop, HSCC 2002, Stanford, CA, USA, March 25-27, 2002, Proceedings*, 2003, p. 76.
- [115] G. Karsai, S. Abdelwahed, and G. Biswas, "Integrated diagnosis and control for hybrid dynamic systems," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2003, p. 5673.
- [116] P. J. Mosterman, "Hybrid Dynamic Systems: A hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis," Vanderbilt University Nashville, TN, 1997.
- [117] J. Lunze, "Diagnosis of quantised systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 33, pp. 29-40, 2000.
- [118] R. 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*, ed: Springer, 1992, pp. 209-229.
- [119] C. Petri, "Kommunikation mit Automaten. Ph. D. thesis, Universitaet Bonn, Schriften des Instituts fuer Instrumentelle Mathematik, 1962 (in German)," 1962.
- [120] K. Jensen, *Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use* vol. 1: Springer Science & Business Media, 2013.
- [121] A. Ramírez-Treviño, I. Rivera-Rangel, and E. López-Mellado, "Observability of discrete event systems modeled by interpreted Petri nets," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, pp. 557-565, 2003.
- [122] M. A. Marsan, "Stochastic petri nets: an elementary introduction. Advances in Petri Nets," *Lecture notes in computer science*, vol. 424, 1989.
- [123] K. S. Trivedi and V. G. Kulkarni, "FSPNs: fluid stochastic Petri nets," in *International Conference on Application and Theory of Petri Nets*, 1993, pp. 24-31.
- [124] G. Horton, V. G. Kulkarni, D. M. Nicol, and K. S. Trivedi, "Fluid stochastic Petri nets: Theory, applications, and solution techniques," *European Journal of Operational Research*, vol. 105, pp. 184-201, 1998.
- [125] I. Demongodin, M. Caradec, and F. Prunet, "Fundamental concepts of analysis in batches Petri nets," in *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 98CH36218)*, 1998, pp. 845-850.
- [126] L. Touquet-France, "Systems, Man and Cybernetics," 1993.

- [127] R. Champagnat, P. Esteban, H. Pingaud, and R. Valette, "Modeling and simulation of a hybrid system through Pr/Tr PN-DAE model," in *ADPM*, 1998, pp. 131-137.
- [128] I. Demongodin and N. T. Koussoulas, "Differential Petri nets: Representing continuous systems in a discrete-event world," *IEEE transactions on Automatic Control*, vol. 43, pp. 573-579, 1998.
- [129] M. Dong and F. F. Chen, "Process modeling and analysis of manufacturing supply chain networks using object-oriented Petri nets," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, pp. 121-129, 2001.
- [130] I. Demongodin, "Generalised batches Petri net: hybrid model for high speed systems with variable delays," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 11, pp. 137-162, 2001.
- [131] R. David, "Continuous petri nets," in *Proc. 8th European Workshop on Appli. & Theory of Petri nets, 1987*, 1987.
- [132] M. Silva and L. Recalde, "On fluidification of Petri Nets: from discrete to hybrid and continuous models," *Annual Reviews in Control*, vol. 28, pp. 253-266, 2004.
- [133] G. Grabher and D. Stark, "Organizing diversity: evolutionary theory, network analysis and postsocialism," *Regional studies*, vol. 31, pp. 533-544, 1997.
- [134] B. Rohée, B. Riera, V. Carré-Ménétrier, and J.-M. Roussel, "Outil d'aide à l'élaboration de modèles hybrides de simulation pour les systèmes manufacturiers," 2007.
- [135] D. le Jury, "Modélisation et conduite des systèmes hybrides. Application aux systèmes manufacturiers," UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2014.
- [136] A. Giua and C. Seatzu, "Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions," in *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, 2005, pp. 6323-6328.
- [137] M. P. Cabasino, A. Giua, and C. Seatzu, "Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions," *Automatica*, vol. 46, pp. 1531-1539, 2010.
- [138] C. Mahulea, C. Seatzu, M. P. Cabasino, and M. Silva, "Fault diagnosis of discrete-event systems using continuous Petri nets," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, vol. 42, pp. 970-984, 2012.
- [139] A. Giua, C. Seatzu, and D. Corona, "Marking estimation of Petri nets with silent transitions," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, pp. 1695-1699, 2007.



## **Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur**

### **Résumé de la thèse**

Le développement des systèmes récents présente une complexité croissante des comportements. Cela implique deux problèmes : Premièrement, il devient de plus en plus difficile d'ignorer le fait que la plupart des systèmes sont hybrides et font intervenir l'aspect continu et l'aspect discret. Deuxièmement, les systèmes sont exposés à des défaillances. L'entretien et la réparation sont devenus une partie importante du coût total du produit final. Des techniques de diagnostic et de pronostic efficaces doivent être adoptées pour détecter, isoler et anticiper les fautes.

L'objectif de notre travail de recherche est le développement d'une méthode de diagnostic des systèmes industriels hybrides. Notre méthode, basée sur les réseaux de Petri hybrides, est inspirée de deux méthodes de la littérature : une qui est basée sur les réseaux de Petri discrets et l'autre basée sur les réseaux de Petri continus. Notre approche est proposée sous forme d'un algorithme qui traite les différentes étapes pour diagnostiquer un système industriel hybride à flux continu, dont la partie discrète contrôle la partie continue. Nous considérons que l'ensemble des classes de fautes est partitionné en deux sous-ensembles : La classe des fautes continues et la classe des fautes discrètes. Les transitions de fautes qui appartiennent à la même classe de fautes sont des transitions qui représentent le même comportement physique défectueux. Ainsi, nous considérons dans notre travail que les classes de fautes discrètes ne contiennent que des transitions discrètes et que les classes de fautes continues ne contiennent que des transitions continues.

**Mots clés:** Systèmes industriels hybrides, Réseaux de Petri hybrides, Diagnostic, Classes de fautes, Fautes discrètes, Fautes continues.

### **Abstract**

The development of recent systems presents an increasing complexity of behavior. This involves two problems: First, it is becoming increasingly difficult to ignore the fact that most systems are hybrid which involve continuous and discrete aspects. Second, systems are exposed to failures. Maintenance and diagnosis have become an important part of the total cost of the final product. Effective diagnostic and prognostic techniques must be adopted to detect, isolate and anticipate faults.

The objective of our research work is the development of a diagnosis method for hybrid industrial systems. Our method, based on hybrid Petri nets, is inspired by two methods from the literature: one is based on discrete Petri nets and the other based on continuous Petri nets. Our approach is proposed in the form of an algorithm which treats the different steps to diagnose a manufacturing hybrid system whose discrete part controls the continuous part. We consider that the set of fault classes is partitioned into two subsets: The class of continuous faults and the class of discrete faults. Fault transitions that belong to the same fault class are transitions that represent the same defective physical behavior. Thus, we consider in our work that the classes of discrete faults contain only discrete transitions and that the classes of continuous faults contain only continuous transitions.

**Keywords:** Industrial hybrid systems, Hybrid Petri nets, Diagnosis, Faults classes, Discrete faults, Continuous faults.