

الجمهورية  
الجزائرية  
الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم  
العالي والبحث  
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد  
تلمسان

Université Aboubakr Belkaid- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

Département de Génie Electrique et Electronique



**THESE DE DOCTORAT LMD**

Spécialité : **automatique**

Présentée par  
ADJIM Sarra

**Pilotage et Modélisation de Système de Production Manufacturière  
Par les Réseaux de Petri à Intervalles**

Soutenue publiquement le 23/01/2020 devant le jury composé de :

CHERKI	Brahim	professeur	Univ. Tlemcen	Président
GHOUL HADIBY	Rachida	Professeur	U.S.T.M.B. Oran	Directeur de thèse
CHERMITTI	ALLI	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de thèse
ALLA	Hassan	Professeur	U.S.T.M.B. Oran	Examineur
DAAOU	Bachir	Professeur	U.S.T.M.B. Oran	Examineur
GHOMRI	Latifa	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

# ملخص

---

جودة المنتج هي جانب من أهم الجوانب التي تسعى إليها المؤسسات الصغيرة والمتوسطة. في نظام الإنتاج. توجد العديد من المجالات الزمنية و الغير الزمنية التي يجب احترامها، مثل الوزن ونسب المنتج التي تلعب دوراً أساسياً في جودة المنتج. تعتمد عملية الإنتاج الصحيحة على نسب معينة من كل مادة أولية.

نهجنا في هذه الأطروحة هو نموذج هذه الأنظمة بشبكة بيتري ذات المجال و لاتخاذ القرار اخترنا التحكم بالمنطق الغامض.

لتجسيد عملنا، اخترنا نظام إنتاج الشوكولاته لشركة صغيرة. لقد قمنا بنمذجة هذا النظام بشبكة بيتري ذات المجال، بعدها قمنا بالتحكم في هذه المجالات بالمنطق غامض النوع الثاني لاتخاذ القرار لان الذوق البشري ليس دقيق تماماً.

**الكلمات المرشدة:** التحكم الغامض ، ضبط الجودة ، أنظمة التصنيع شبكة بيتري ذات المجال ، المنطق الغامض النوع الثاني، المنطق الغامض "TAKAGI SUGENO".

# ABSTRACT

---

## Abstract

Product quality is one of the most important aspects of small and medium-sized enterprises. In a production system, several parameters and non-temporal variables must respect very strict variation intervals, such as weight measurements and product proportions. These parameters also play a fundamental role in the quality of the product. The correct production process is based on a given percentage of each material. Our approach in this thesis is to model these systems by the interval Petri net. And for decision making we associate a fuzzy controller.

To illustrate this approach, we chose a food production system from a small company, producing chocolate. We have modeled this system by an Interval constrained interval Petri net, after applying a type-2 fuzzy controller to these intervals for decision-making assistance taking into account the human culinary aspect which is not all exactly. For this, small variations of assays were allowed around the exact values.

**Keywords:** Fuzzy control, quality control, manufacturing systems, Interval constrained petri net, type-2 fuzzy logic, TAKAGI SUGENO fuzzy logic

# RESUME

---

## Résumé

La qualité des produits est l'un des principaux aspects des petites et moyennes entreprises. Dans un système de production, plusieurs paramètres et variables non temporelles doivent respecter des intervalles de variation très stricts, tels que les mesures de poids, les proportions des produits. Ces paramètres jouent également un rôle fondamental dans la qualité du produit. Le processus de production correct est basé sur un pourcentage donné de chaque matière. Notre démarche dans ce mémoire consiste à modéliser ces systèmes par le réseau de Petri à intervalle. Et associé un contrôleur flou pour la prise de décision.

Pour illustrer cette démarche, nous avons choisi un système de production alimentaire d'une petite entreprise, de production de chocolat. Nous avons mobilisé ce système par un réseau de Petri à intervalle, après on a appliqué un contrôleur flou type-2 sur ces intervalle pour une assistance de la prise de décision en tenant compte de l'aspect culinaire humain qui n'est pas tout à fait exacte. Pour cela, on s'est permis des petites variations de dosages autour des valeurs exacts.

**Mots-clés:** Contrôle flou, contrôle de la qualité, systèmes de fabrication, Réseau de Petri à intervalles, Logique floue type 2, Logique floue TAKAGI SUGENO

# **Remerciements**

*Je tiens à remercier vivement Mme GHOU, professeur à l'université d'USTO qui en tant qu'encadreur de mémoire, je tiens à la remercier tout particulièrement pour m'avoir fait bénéficier de son savoir et son expérience tout au long de mes années passées.*

*Et mon co-encadreur Mr CHERMITTI que je lui exprime toute mes gratitudes pour ses conseils et pour la disponibilité dont il a toujours fait preuve.*

*Au président Mr CHERKI et membres du jury Mr DAAOU et Mme GHOMRI pour leurs remarques et suggestions.*

*Ainsi que je remercie Mr SLIMENE, Mr MECHE et Mr ADJIM qui m'ont aidé.*

*Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.*

*Pour finir, je tiens à remercier du fond du cœur ma mère, mon père, mes frères Mohamed e Djilali mas sœur Ilhem, mon mari hamza et ma petite fille Yasmina qui n'ont cessée de m'encourager tout au long de ces années d'études.*

## Sommaire

Introduction générale .....	4
-----------------------------	---

### Chapitre I : Etat de l'art

Introduction.....	9
I.1.Réseaux de Petri p-temporels.....	9
I.2. L'analyse quantitative des réseaux de petri hybride.....	12
I.3. Contributions à la commande robuste par les réseaux de Petri p-temporels .....	12
I.4.Contribution à la modélisation et l'analyse de performances des systèmes logistique par RdP stochastiques.....	14
I.5.Les réseaux de petri à intervalles .....	16
I.6.Configurations cinématiques d'un système de production reconfigurable .....	17
I.7. Contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Petri.....	18
I.8.Algorithmes évolutionnaires et méthodes approchées multicritères pour la génération des processus de fabrication dans un environnement reconfigurable .....	21
Conclusion .....	23

### Chapitre II : Systèmes discrets, continus, hybrides et manufacturiers

Introduction.....	25
II.1.Les systèmes dynamiques.....	25
II.2. Système continu.....	25
II.2.1. Outils de modélisation et d'analyse des systèmes continus.....	26
II.2.2. Mise en équations des systèmes dynamiques continus .....	26
II.2.3. Exemples d'un système continu.....	29
II.2.4.Système continu échantillonné.....	31
II.3.Systèmes à événements discrets.....	31
II.3.1.Caractéristiques des Systèmes à événements discrets.....	33
II.3.2.Tour d'horizon des travaux sur les SED.....	34
II.3.3.Système à événement discret temporisé .....	35
II.3.3.1.Exemple d'un SEDT.....	35
II.4.Systèmes dynamiques hybrides .....	37
II.4.1.Tour d'horizon sur les travaux de modélisation et commande des SDH.....	38
II.4.2.Formalisme de modélisation des SDH .....	38
II.4.3.Les type des systèmes dynamiques .....	39

II.4.4.Classification des SDH.....	40
II.4.4.2.Exemples d'un Système de bacs [Gho12] .....	41
II.4.5.Les Systèmes manufacturiers.....	41
II.4.5.1.Systèmes manufacturiers dédiés (DML).....	41
II.4.5.2.Systèmes manufacturiers flexible (FMS).....	42
II.4.5.3.Systèmes manufacturiers reconfigurable (RMS) .....	43
II.4.5.4. exemple d'un système de production manufacturier [Gho12].....	43
Conclusion.....	44

### **Chapitre III : Outils de modélisation des Systèmes à événements discrets**

Introduction.....	46
III.1.Bond Graph .....	46
III.2. Graphe fonctionnel de commande des étapes et transitions.....	47
III.3.Les réseaux de Petri .....	48
III.3.1. Réseaux de pétri autonomes [Gh12] .....	48
III.3.2. Réseaux de Petri temporisés .....	49
III.3.2.1. Les RdP P-temporisés [Gh12] .....	50
III.3.2.2. RdP T-temporisés [Gh12].....	51
III.3.3.1. Les réseaux de Petri T-temporels [Gho12].....	51
III.3.3.2. Les réseaux de Pétri P-temporels [Med06].....	52
III.4.Les réseaux de Pétri continus .....	53
III.4.1. Le RdP continu à vitesse constante [DA87].....	53
III.4.2. Le RdP continu à Vitesses Variables [DA92] .....	54
III.4.3. Le RdP continu Asymptotique [Gho12].....	55
III.4.4. Le RdP continu à Vitesses Fonction du Temps [Gho12].....	55
III.4.5. Les RdP continus temporisés [DA 87].....	55
III.5. Les réseaux de Pétri hybrides [Gho12].....	56
III.5.1. Les réseaux de Petri hybrides élémentaire [Gh12] .....	58
III.5.2.IB-état d'un réseau de Pétri hybrides [Gh12].....	58
III.5.3. Les réseaux de Pétri hybrides D-élémentaires [Gho12].....	59
III.6. Les Réseaux de Petri de haut niveau [Dho05] .....	61
III.6.1. Les RdP de Hauts niveau à Marquages Abstraits (RdPHMA) [Dho05].....	61
III.6.Les RdP à Intervalles [COL 03] .....	62
III.6.1.Définition d'un état [DHO 05b].....	64

III.6.2.Calcul de l'état suivant [DHO 05b].....	65
III.9.3.Structures de fonctionnement .....	66
Conclusion .....	66

### **Chapitre IV : logique floue**

Introduction.....	68
IV.1. Concept d'ensemble flou [WN15].....	68
IV.2. Propriétés des ensembles flous [WN15].....	70
IV.3. Théorie du contrôle flou [WN15].....	71
IV.4. Logique flou type-2 .....	75
IV.4. 1. Contrôleurs floue (FLC) de type 2.....	75
IV.5.Systèmes flous de modèles TAKAGI-SUGENO.....	77
IV.4.1. Modèle flou Takagi-sugeno.....	78
Conclusion .....	80

### **Chapitre V : Résultats et simulation**

Introduction.....	81
V.1. Présentation de premier système .....	81
V.1.1. Cahier de charge .....	81
V.1.2. Modélisation du procédé de fabrication par les RdP à intervalles [AGC15] .....	82
V.1.3.La prise de décision.....	84
V.1.3.1. Les contrôleurs flous .....	85
V.1.4.Interface graphique .....	95
V.2. Présentation de deuxième système .....	95
V.2.1.ORGANIGRAMME .....	97
V.2.2.Application du réseau petri à intervalle sur le système [AGCS18] .....	98
V.2.2.1. Le modèle de réseau de Petri à intervalles.....	98
V.2.3.Explication du modèle de réseau de Petri à intervalle contraint.....	100
V.2.4.La prise de décision.....	100
V.2.4.1.Les contrôleurs flous .....	100
Conclusion .....	107
Conclusion général .....	108



## Introduction générale

---

Les systèmes industriels sont caractérisés par une forte complexité et souplesse, ainsi ils représentent de grands problèmes pour le monde scientifique. L'évolution de ces systèmes connaît depuis plusieurs années des difficultés croissantes très rapides et cela à cause :

- D'une concurrence très vive dans la plupart des secteurs,
- D'un marché fluctuant qui exige des produits de qualités croissantes et répondants mieux à ses besoins.
- D'un progrès technologique accéléré, contribuant au raccourcissement de la durée de vie des produits.

Sous ces diverses influences, les produits deviennent de plus en plus complexes. Cette complexité est la résultante de plusieurs facteurs :

- une nouvelle technologie qui exige des compétences et des équipements spécifiques.
- une augmentation des éléments constituant un produit.
- une production en petites quantités de produits à plusieurs variantes, qui impose un système de gestion de production plus évolué et performant.
- des clients plus exigeants pour les délais, la qualité et le prix.

Depuis bien des années que les systèmes industriels ont été modélisés par des modèles purement à événements discrets. La séparation des systèmes à événements discrets entre les deux paramètres temporels et non temporels n'est plus aussi nette, c'est l'une des raisons du rapprochement des communautés d'informaticiens et d'automaticiens, pour trouver des solutions simples aux problèmes d'analyse, de modélisation, de commande..., et ceci n'a jamais attiré autant d'attention qu'actuellement. Or, l'étude de tels systèmes est effectuée à la fois par les deux communautés, et ceci afin de répondre à des objectifs différents. D'un côté, les informaticiens s'intéressent principalement à la vérification des spécifications et d'un autre côté, l'objectif des automaticiens est la commande. Mais, à cause des enjeux économiques, on ne peut pas se permettre à des essais et des corrections successives. Ainsi, il est devenu décisif de disposer des outils formels et des techniques pour l'analyse et le contrôleur qui permettent de garantir le fonctionnement du système commandé en respectant les spécifications imposées par le cahier des charges exigées par le client.

L'entreprise agit non pas avant, mais après les modifications de l'environnement pour s'y adapter. La réaction de l'entreprise se traduit par sa capacité à répondre rapidement et économiquement à un changement de l'environnement ou aux aléas provenant soit du

## Introduction générale

---

système de production (pannes des machines, défauts de fabrication, défauts d'alimentation...) soit de son environnement (rupture du stock de matières premières ou de pièces de rechange, commande urgente...).

L'évolution rapide de l'environnement fait, aujourd'hui, des aléas de règle. A cet effet, un système de production doit être à la fois réactif et proactif. La réactivité se caractérise par une capacité d'adaptation en temps opportun. La proactivité se mesure par une capacité à prévoir les changements pour pouvoir ajuster son environnement et modifier ses règles de fonctionnement. L'amélioration de la réactivité des systèmes de production en vue de l'adaptation aux perturbations constitue un élément marquant à leur évolution. Afin d'assurer cette propriété de réactivité du système de production, trois fonctions annexes s'avèrent nécessaires [BRI 98] :

- *une fonction d'observation* qui collecte les variables nécessaires au suivi, afin de connaître l'état courant du système (disponibilité et état du produit, disponibilité et état des moyens de production) ;
- *une fonction de surveillance* qui collecte (suite au résultat d'une observation) et interprète les écarts et les changements entre le plan prévisionnel et le plan courant ;
- *une fonction de correction* qui tente à tout instant de corriger les écarts entre ces plans, ce qui implique un ordonnancement dynamique.

A cet effet, notre travail dans le cadre de cette thèse est d'apporter une contribution aux systèmes industriels à événement discret en introduisant des notions des réseaux de petri à intervalle et la logique flou type 2.

- ❖ Au premier chapitre de notre contribution, on a donné un bref synopsis sur la théorie générale des systèmes de production et les systèmes à événements discrets (SED). On a parlé des approches les plus connues de contrôle de tels systèmes, en focalisant sur les notions et les propriétés que nous allons développer dans la suite de ce mémoire.
- ❖ Dans le second chapitre, nous avons présenté les divers types des systèmes dynamiques: systèmes à événements discrets (SED), systèmes continus et les systèmes hybrides en se basant sur les systèmes de production manufacturière.

- ❖ Le troisième chapitre est dédié aux notions et formalismes de modélisation les plus largement utilisés, en introduisant la description sur l'outil de modélisation et d'analyse des systèmes à événements discrets utilisés dans notre travail: les réseaux de Pétri à intervalle.
- ❖ Au quatrième chapitre, nous avons fait une description de la logique floue de type-1, type-2 et TAKAGI-SUGENO.
- ❖ Le dernier chapitre constitue la partie la plus importante de ce mémoire est consacré aux résultats de simulation et aux contrôleurs flous, en traitant un exemple de productions de 'chocolat' avec deux cahiers de charge différent.

## **Problématique**

Les systèmes de production manufacturière et particulièrement les industries faisant appel à des procédés de nature chimique et agro-alimentaire sont constitués de procédés à contraintes de temps ou, plus précisément, à fenêtre de temps de séjour. La commande de ces procédés doit garantir, pour chaque opération, les spécifications sur les durées opératoires minimales afin d'assurer la conformité des produit et le taux de production.

Dans d'autres familles de procédés, le paramètre déterminant pour la qualité et le coût n'est pas le temps mais doit cependant appartenir de manière très stricte à des intervalles de validité. La commande devra alors donner des garanties sur le respect des spécifications.

Notre intérêt porte sur ce dernier type de procédé. Notre approche consiste à gérer les perturbations afin de maintenir la qualité du produit. Par exemple, dans l'application industrielle qui sera traitée en fin de ce mémoire, les spécifications concernent essentiellement la valeur du poids unitaire d'un produit, qui doit rester dans un intervalle déterminé. On cherche donc une commande robuste face aux dérives des paramètres influant sur la qualité. On veut ainsi garantir la capacité de corriger les fluctuations sur les entrées du système ainsi que sur l'état des composants du procédé. En effet, en assurant la qualité du produit, cette commande permettra d'obtenir un taux de production meilleure en diminuant les pertes en présence de variations.

Nous nous sommes intéressés à la robustesse et à la réactivité des systèmes de production à contraintes non temporelles face aux perturbations de type dérives de qualité.

## Introduction générale

---

Notre contribution se situe au niveau de la recherche d'un outil de modélisation capable de décrire la dynamique de procédé discrets (ou considérés comme tels) à contraintes non temporelles. Nous utilisons un nouveau modèle de réseaux de Petri permettant l'intégration de contraintes d'intervalles fortes. Ce modèle s'appuie sur une définition mathématique similaire à celle des réseaux de Petri P-temporels. Il constitue donc une extension fonctionnelle d'un modèle. Il sera utilisé, comme les RdP P-temporels, pour la synthèse de commande robuste.

# ***Chapitre I***

*ETAT DE L'ART*

## Introduction

Une littérature abondante a été développée pour le contrôle des systèmes automatisés car il fut depuis longtemps un domaine de grand intérêt pour le monde scientifique et industriel. Cependant, les outils de base pour la commande de ces systèmes consistaient à concevoir un modèle de la commande et le valider par une série de tests. Mais pour les systèmes complexes et critiques, tels que les avions, les centrales nucléaires ou les raffineries de pétrole, qui exigent un grand niveau de sécurité et de bonne précision, nécessitent des méthodes formelles de contrôle, qui permettent de garantir à priori un fonctionnement conforme aux spécifications exigées. Les premiers travaux dans cette direction ont eu naissance au début des années 1980.

Dans ce chapitre, nous proposons de passer en revue les travaux de certains auteurs et les différentes extensions qui englobent le formalisme de modélisation et d'analyse des systèmes à événements discrets principalement impliquées dans le cas de notre recherche sur la modélisation des systèmes de production manufacturière.

### I.1.Réseaux de Petri p-temporels

Wael KHANSA et all dans leurs travaux [Kha97], ont explorés des extensions temporelles du modèle Réseaux de Petri autonomes (RdPA). Ces extensions ont été établies dans le but de tenir compte le facteur "temps" dans l'évolution du modèle qui devient non autonome. Pour modéliser le comportement dynamique des systèmes à événements discrets, ils ont utilisé les réseaux de Petri (RdP) comme un outil graphique et mathématique, qui permet la représentation graphique et de visualisation de parallélisme, synchronisation, partage de ressource, et choix (conflits). Cependant, le modèle de base des réseaux de Petri (RdPA) permet d'étudier les propriétés logiques des systèmes, c'est-à-dire les propriétés qui dépendent de l'ordre des événements, mais sans faire référence aux instants où ils arrivent.

La nécessité de pouvoir représenter des durées maximum d'opérations, le choix d'une durée comprise entre un minimum et un maximum, ou l'incertitude sur une durée opératoire, a conduit tout d'abord à associer des intervalles de temps aux transitions du réseau: ce fut la naissance des réseaux de Petri t-temporels (t-RdPs). Ces modèles ont été utilisés pour étudier les systèmes dont l'évolution dépend des contraintes de type temps de réponse

(time-out), et ils ne traduisent pas le mécanisme de la synchronisation sous obligation. Ainsi, les chercheurs ont montré que les modèles temporisés (p-t-temporisé) et temporels (réseaux de Petri arc temporels et réseaux de Petri flux temporels) sont incapables de modéliser des contraintes de temps de séjour sur toutes les places.

Ensuite, ils ont proposé un nouveau modèle temporel qui permet la modélisation et l'analyse de tels systèmes. Dans ce contexte, ils ont associé les intervalles de temps aux places, cette extension est nommée : les réseaux de Petri p-temporels (p-RdP). Ceci implique que les dates d'arrivée des marques dans les places en amont des transitions de synchronisation jouent un rôle important. Dès qu'une marque arrive dans une place, son temps est compté. La nouvelle extension a permis de:

- conserver le traitement des conflits comme dans les réseaux de Petri temporisés et les Réseaux de Petri autonomes ;
- fixer l'échéance de tir d'une transition de synchronisation en fonction de toutes les marques qui participent à sa validation.

Et ils ont fournis, en premier temps, l'analyse énumérative pour caractériser le comportement dynamique d'un réseau par la construction d'arbres (graphes) de couverture. Pour cela, deux approches d'analyse énumérative ont été établies :

- l'approche "classe d'états", qui regroupe les états accessibles infinis dans des classes pour pouvoir en faire une représentation finie ;
- l'approche "état entier", qui s'intéresse seulement aux états entiers (et par conséquent aux séquences de tir entières), et dont la restriction majeure par rapport à la précédente est qu'elle ne peut traiter que des réseaux pour lesquels les bornes supérieures des intervalles statiques sont finies.

Mais, ces approches ont des limites, la première limite de ces approches est que, même pour un p-RdP borné, le nombre de classes d'états ou d'états entiers peut être très grand (explosion combinatoire), et la seconde, est qu'on est incapable d'en évaluer leur performance. C'est pourquoi qu'ils ont, ensuite, établi l'analyse structurelle répondant à ces besoins. Cette approche analytique permet d'analyser les performances du réseau (et donc du système qu'il modélise), si le modèle est borné et vivant. Elle permet aussi d'établir des conditions sur l'existence de fonctionnements spécifiques (fonctionnement répétitif

stationnaire par exemple) en fonction des propriétés structurelles du réseau. Ces conditions ne sont pas suffisantes dans le cas des graphes d'événements fortement connexes p-temporels (p-GEFCs). Ceci conduit à déterminer les conditions nécessaires et suffisantes d'existence de tels fonctionnements pour ces graphes en utilisant une approche basée sur la structure du graphe. Ceci a permis d'évaluer les performances de systèmes modélisés par les réseaux particuliers, en utilisant un algorithme en temps polynomial.

Ils ont fait une étude du mode de fonctionnement périodique pour des graphes d'événements fortement connexes p-temporels (p-GEFC) afin de savoir si ce mode est un mode admissible. De plus, ils ont montré que ce mode de fonctionnement périodique donne aussi les mêmes performances que les fonctionnements répétitifs stationnaires généraux des p-GEFCs (la performance optimale comprise).

Et, afin de caractériser la robustesse de ce mode de fonctionnement, une étude des marges sur les franchissements des transitions a été établie aussi bien sur les GEFCs que sur les p-GEFCs. Ainsi, les marges ont été utilisées pour déterminer la borne inférieure et la borne supérieure des temps de séjour des marques dans les places des graphes (GEFCs et p-GEFCs). Elles apparaissent comme un outil d'analyse permettant d'apprécier les possibilités d'absorption d'éventuelles perturbations intervenant sur les systèmes modélisés sans modification de l'objectif de production.

En fin, ils ont arrivés à mentionner que les fonctionnements des p-GEFCs doivent être contrôlés (le fonctionnement au plus tôt et le fonctionnement au plus tard ne sont pas, en général, des fonctionnements admissibles).

La démarche suivie se résume dans le diagramme de la figure I.1.

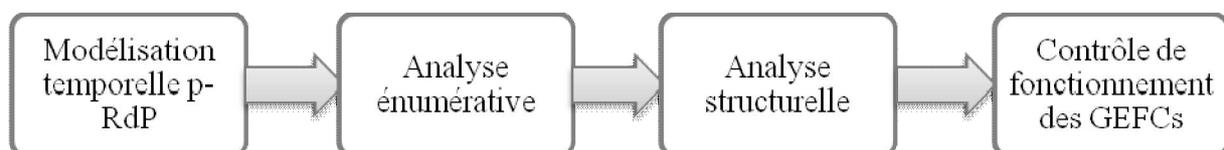


Figure I.1. Contribution à l'étude des systèmes à événements discrets

## I.2. L'analyse quantitative des réseaux de petri hybride

Dans les travaux de ALLAM Mohamed et ALLA Hassan [AL98],[AA98], il on commence par la présentation des notions de base sur les systèmes dynamique hybrides et la présentation des principaux phénomènes hybrides. Puis ils ont passé aux principales approches de modélisation des systèmes dynamique hybrides.

Ils ont accordé deux outils de modélisation et d'analyse des systèmes hybrides, les réseaux de petri hybrides et les automates hybrides. Ainsi, un algorithme est proposé pour le passage des réseaux de petri hybrides aux automates hybrides, et ils ont présenté une nouvelle approche d'analyse des réseaux de petri hybrides, la méthode d'analyse en avant pour le calculer des régions atteignables de l'automate hybrides. L'approche est plus expliquée à travers un exemple industriel simplifié. Il s'agit d'un atelier d'assemblage-test des composants électroniques Enfin, ils ont consulté la démarche de la mise en œuvre informatique. La figure I.2 présente les démarche suivie dans ces recherches.

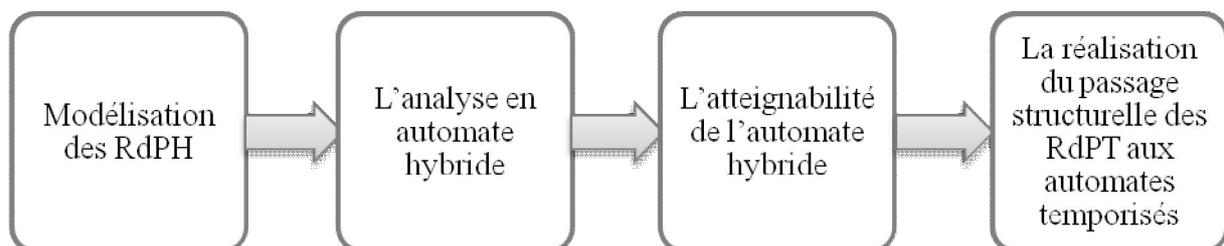


Figure I.2. L'analyse quantitative des réseaux de Petri hybride " une approche basée sur les automates hybrides"

## I.3. Contributions à la commande robuste par les réseaux de Petri p-temporels

Les travaux présentés par BONHOMME et all [BAC, 98] [BAC, 99/1] [BAC, 99/2] [BAC, 00] [BAC, 01/1] [BAC, 01/2] [Bon01], traitent des systèmes à contraintes de temps de séjour. Pour cette grande classe de systèmes, le facteur temps est une composante essentielle, qui n'affecte pas seulement les performances du système mais aussi sa validité fonctionnelle.

---

Le procédé peut se retrouver dans un état interdit si un résultat nécessaire à sa bonne évolution est produit trop tôt ou bien trop tard.

Les chercheurs ont établi un modèle de spécifications des systèmes considérés, qui permettent de dégager toutes les contraintes logiques et temporelles du problème de commande, dont le but d'effectuer la synthèse d'une commande robuste. Pour cela, leur choix s'est porté sur les réseaux de Petri, qui représentent un formalisme puissant et reconnu pour la modélisation et l'analyse des systèmes à événements discrets, et plus particulièrement, ils permettent de fournir une représentation simple et naturelle de la situation de synchronisation sous obligation (un rendez-vous en un temps imparti).

Ensuite, ils ont exposé les caractéristiques principales d'un ensemble de modèles, chacun faisant autorité dans son domaine d'application. Leur propos n'étant pas de présenter les réseaux de Petri p-temporels comme étant le modèle de référence, mais tout simplement de motiver (voire de justifier dans certains cas) leur choix. Ils ont alors rappelé les différentes méthodes d'analyse propres au modèle p-temporel, l'analyse structurelle et l'analyse énumérative. Bien que cette dernière s'appuie sur la notion de classes d'états, sa complexité est non négligeable.

Dans ce contexte, ils ont proposé une nouvelle méthode d'analyse exhaustive (approche énumérative), en s'appuyant sur la règle de franchissement des transitions du modèle temporel. Cette méthode permet de construire un arbre des classes d'états comparable à celui des marquages accessibles obtenu pour les réseaux de Petri autonomes. Ainsi, si l'arbre (le graphe) obtenu est fini, le comportement du système peut être étudié en vérifiant un certain nombre de ses propriétés d'intérêt : bornitude, vivacité, existence de fonctionnements stationnaires, existence de séquences marques-vivantes (dans le cas du modèle p-temporel), etc.... Dans le cas contraire, ce dernier peut être considéré comme un outil de simulation partielle du fonctionnement. Les résultats dégagés par l'approche énumérative, sont utilisés dans une optique de détermination d'une commande robuste. En commençant par passer en revue les différents concepts de robustesse, et ses différents modes d'évaluation possibles lorsque la commande est modélisée par un réseau p-temporel.

Puis, ils ont proposé un ensemble de règles de transformation pour les réseaux de Petri p-temporels. Ces dernières ont été établies afin de pouvoir disposer d'un modèle réduit plus simple d'analyse mais possédant les mêmes caractéristiques que le modèle de départ (ou un

sous-ensemble de celles-ci, plus particulièrement celles que l'on cherche à conserver). Les différentes règles proposées ont été dérivées de celles originellement introduites par Berthelot pour les réseaux de Petri autonomes. Ainsi, tout comme Sloan et Wang pour le modèle de Merlin, la présence du facteur temps a conduit d'avoir recours à des modifications structurelles du réseau de départ, aussi bien qu'à des mises à jour des intervalles statiques des places du réseau. Et, ils ont arrivé à proposer un algorithme de détection, et dans la plupart des cas, cet algorithme conduit à des résultats satisfaisants, et il s'appuie sur le concept de place linéairement dépendante et tient compte aussi bien de la structure du graphe que de la répartition initiale des différentes marques à l'intérieur du réseau étudié.

Ce travail a montré aussi la nécessité d'avoir des modèles concis aussi bien pour l'analyse que pour l'établissement d'une commande temporelle. Cette concision peut être obtenue dès la phase de modélisation par l'utilisation d'outils de haut niveau et/ou en utilisant une approche de description descendante. Ainsi, les perspectives à moyen terme de ce travail vont vers une coloration du modèle p-temporel respectant la philosophie du modèle initial (les attributs temporels seraient portés par les places). La figure I.3 résume les démarches de ces travaux.

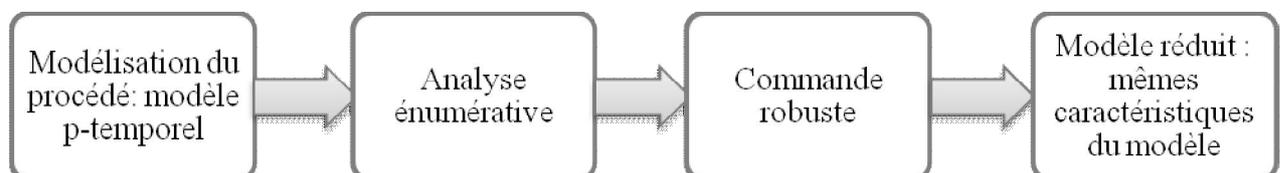


Figure I.3. Contributions à la commande robuste

#### **I.4. Contribution à la modélisation et l'analyse de performances des systèmes logistique par RdP stochastiques**

Les chercheuses LABADI Karim et all [LAB05] [LAB 02] [LAB 03] [LAB 04a] [LAB 04b] [LAB 05a] [LAB 05b] [LAB 05c] ont fait une étude bibliographique sur les réseaux de Petri et les chaînes logistiques, et aussi leur but a été d'accumuler des renseignements sur les caractéristiques et les problématiques des systèmes logistiques a

---

travers des travaux réalisés par de nombreux auteurs. Ainsi, très particulièrement le rôle joué par les réseaux de Petri en logistique.

Ils ont introduit les BDSPNs comme un nouveau modèle de réseaux de Petri. Ils ont apporté dans le modèle des nouveaux types de places, de jetons et de transitions qualifiés de composants lots. Ces derniers sont intégrés dans le formalisme classique des réseaux de Petri afin de pouvoir modéliser correctement la dynamique des flux évoluant en quantités discrètes qui caractérise de nombreux systèmes à événements discrets. Ainsi, une nouvelle sémantique Discrète de fonctionnement est formulée de façon à pouvoir synchroniser, coordonner et traiter simultanément deux types de flux : le flux des jetons lots et le flux des jetons discrets.

En suit, ils ont développé des différentes techniques d'analyse des BDSPNs qui permettent la vérification ou la recherche des propriétés qualitatives, à l'aide de relations formelles liant un BDSPN à un RdP classique, et une étude sur les techniques d'évaluation de performances. Dans ce cadre, ils ont développés des techniques analytiques basées sur le graphe d'évolution des états du système modélisé par un BDSPN utilisé simultanément avec le processus stochastique associé au modèle, une deuxième approche basée sur la simulation est discutée.

Afin de montrer l'intérêt et l'efficacité de leur modèle pour cette classe de systèmes. Ils ont étudié des systèmes de gestion de stocks qui jouent un rôle majeur dans les entreprises organisées en chaînes logistiques. Après la classification d'un ensemble de politiques de gestion de stocks les plus utilisées dans la pratique, ont développé un ensemble de modèles BDSPNs qui les représentent.

Par la suite, ils ont été intéressés par l'évaluation et l'analyse de performances de cette classe de systèmes. Deux applications distinctes sont réalisées à base de deux approches différentes, une approche analytique et une approche par simulation. Les deux études constituent à la fois une démonstration de l'efficacité de leur méthodologie.

Dans la dernière étape ont montré l'intérêt des BDSPNs pour la modélisation et l'étude des chaînes logistiques.

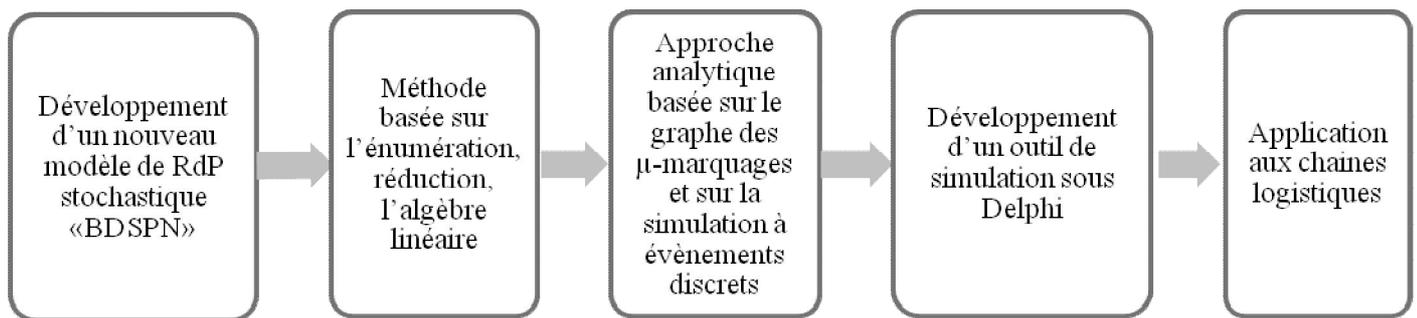


Figure I.4. Contribution à la modélisation et l'analyse de performances des systèmes logistiques à l'aide d'un nouveau modèle de RdP stochastiques

## 1.5. Les réseaux de petri à intervalles

Dans les travaux de [DHO 05] [DHO 05a] [DHO 05b] [DHO 05c], les travailleurs ont fait un rappel sur les approches utilisées pour l'optimisation des systèmes de production et les techniques de gestion des perturbations dans les systèmes de production manufacturière.

Dans cette thèse, les chercheurs s'intéressent plus particulièrement à deux principaux outils de modélisation des systèmes à événements discrets à contraintes temporelles : les RdP Temporisés et les RdP Temporels. Ces outils ont des limitations, le système de production manufacturière utilisé dans cette thèse est constitué de procédés où la contrainte poids de l'unité fabriquée est un facteur déterminant pour la qualité, le coût et le taux de production. La valeur du poids doit être dans un intervalle donné. La commande de ce processus devra alors donner des garanties sur le respect des spécifications pondérales. Ce type de contrainte ne peut être spécifié par les réseaux de Petri à contrainte du temps ou par les RdP de bas niveau en général; c'est pour cela qu'ils ont travaillé sur des outils de modélisation des systèmes hybrides et l'intégration des paramètres non temporels.

Afin d'introduire un nouveau formalisme adapté à la modélisation des systèmes de production manufacturière à contraintes non temporelle : le formalisme des réseaux de Petri à intervalle.

Et pour la validation de ce nouvel outil de modélisation, ils ont appliqué à un atelier de manufacture de tabac; Le modèle général obtenu sera produit par l'assemblage de deux sous

modèles qui représentent, le système de formation de la cigarette et le système de régulation du début de tabac à l'entrée du procédé.

Puis ils ont exploité industriellement le modèle pour permettre l'intégration des contraintes pour l'évaluation et l'optimisation de commandes robustes.

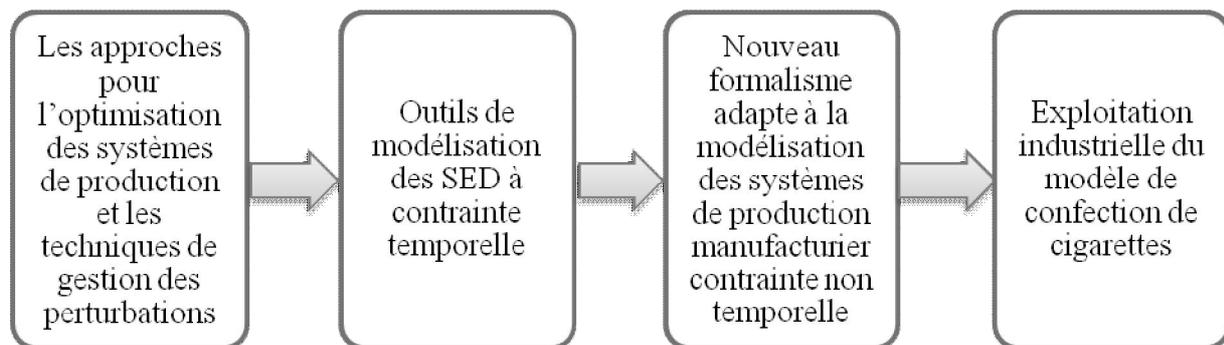


Figure I.5. Utilisation des réseaux de Petri à intervalles pour la régulation d'une qualité

## I.6. Configurations cinématiques d'un système de production reconfigurable

[BSDM07] [BSDM08] [BSDSM09] [BAQ10] , au premier temps les chercheurs ont cité le concept général de système de production reconfigurable (RMS) et les travaux existant sur la conception du système de production reconfigurable. Puis Ils ont proposé une étude bibliographique des systèmes manufacturiers actuels en se focalisant plus particulièrement sur les systèmes manufacturiers dédiés, les systèmes manufacturiers flexible et systèmes manufacturiers reconfigurables. Ensuite, ils ont donné une synthèse sur les différents travaux existant dans le domaine de conception de machines outils reconfigurables.

En deuxième temps, une démarche de conception d'un système de fabrication reconfigurable été présentée, l'approche Axiomatic Design (AD) a été déployée pour la conception des systèmes de fabrication dans le cadre du Lean Manufacturing (Manufacturing system design décomposition (MSDD)). Ainsi, ils ont proposé un domaine supplémentaire : indicateur de performance qui permet de faire le lien entre les activités de conception et les solutions physiques pour l'évaluation des indicateurs de performance.

Puis en troisième temps, ils ont développé une approche algorithmique, cette algorithmique permet de faire la liaison entre les fonctions que l'on souhaite obtenir et la structure qui va nous le permettre, et ainsi parcourir l'ensemble des solutions possibles. Le développement de l'application est fait en VBA et Excel comme interface, cet algorithme est actuellement validé sur 3 pièces tests du domaine de l'automobile.

Enfin, ils ont sélectionné des critères d'évaluation qui sont le coût, le temps, l'étendu de famille de produit et la qualité, et ils ont modélisé les solutions structurelles sous forme de graphes.

En conclusion globale ils ont présenté une synthèse de leurs travaux et permis de proposer des pistes pour des travaux de recherche ultérieurs.

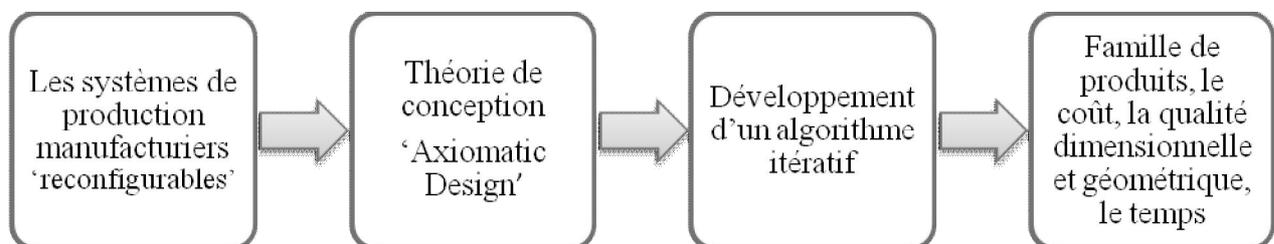


Figure I.6. Co-conception des processus d'usinage et des configurations cinématiques d'un système de production reconfigurable

## I.7. Contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Petri

Vasiliu ANDRA et Hassane ALLA [VA09][VA10][VA11a][VA11b] [Va12], ont réalisé une synthèse sur les contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Petri. Ils ont conçu un modèle de commande et ils l'ont validée par une série de tests en faisant un rappel sur les outils de base pour la commande des systèmes à événements discrets.

Les systèmes à événements discrets sont des systèmes dynamiques fondamentalement asynchrones pour lesquels l'espace d'états est discret. Leur évolution se fait conformément à l'arrivée des événements caractérisant le changement d'état du système. Au lieu de s'intéresser au déroulement continu des phénomènes, les systèmes à événements discrets ne se

---

soucient que des débuts et des fins de ces phénomènes (les événements discrets) et de leur enchaînement logique, dynamique ou temporel.

Il y a maintenant une multitude d'outils permettant l'étude des systèmes à événements discrets, tels que la simulation sur ordinateur, les réseaux de files d'attente, les langages de programmation parallèle / temps réel, les modèles dynamiques algébriques, les chaînes de Markov, les automates et les réseaux de Petri. La chercheuses a rappelée dans cette thèse les approches de modélisation et d'analyse des systèmes à événements discrets principalement impliquées dans la recherche sur la synthèse de contrôleurs.

Pour les systèmes peu complexes, la manière la plus simple de contrôle est la conception directe du modèle supervisé du système. Cependant, quand la complexité du système augmente, cette méthode devient très laborieuse. Il faut donc se tourner vers des méthodes formelles permettant la synthèse de contrôleurs. Ce sont les travaux de Ramadge et Wonham [RW89] qui constituent les bases de la théorie générale de la commande par supervision des systèmes à événements discrets. L'objectif de leur approche est de synthétiser un contrôleur pour un modèle proposé, tel que le fonctionnement du procédé couplé au contrôleur reste toujours compris dans l'ensemble des comportements valides. Cette approche assure l'optimalité du contrôleur pour les systèmes modélisés par des automates à états finis, bien que ce formalisme permette la modélisation d'une large classe de systèmes à événements discrets. Il est peu adapté aux systèmes réels à cause de sa grande sensibilité aux problèmes de l'explosion combinatoire du nombre d'états (même pour les petits systèmes).

C'est pour ces raisons que de nombreuses tentatives ont été faites pour adapter à la théorie générale de la commande des systèmes à événements discrets à d'autres formalismes de modélisation.

Une manière pour dépasser l'inconvénient de l'explosion combinatoire du nombre d'états est l'utilisation des réseaux de Petri. Ce formalisme est caractérisé par des structures de modélisation beaucoup plus riches et offre un net gain d'échelle, les réseaux de Petri sont aussi plus adaptés pour la modélisation des activités distribuées au sein des systèmes complexes.

Ils ont rappelé, la méthode des invariants, la théorie des régions ou le contrôle par retour d'état. La clarté, la simplicité et l'efficacité de calcul du contrôleur ont rendu la

---

méthode des invariants une des méthodes de synthèse les plus utilisées pour les systèmes à événements discrets modélisés par des réseaux de Petri. La méthode impose un ensemble de contraintes linéaires sur le marquage du système. Le problème des états interdits est résolu par l'ajout judicieux de places et d'arcs de contrôle au modèle du procédé, le résultat étant un modèle réseau de Petri du contrôleur qui a le fonctionnement désiré en boucle fermée.

Malheureusement, cette approche ne garantit pas en général une solution optimale dans le cas où la synchronisation entre le procédé et la spécification est réalisée via des transitions incontrôlables. Dans ce travail il a été proposé une solution à ce problème pour le cas des réseaux de Petri ordinaires et généralisés. L'idée centrale est celle de l'équivalence entre l'ensemble d'états interdits et celui des contraintes destinées à bloquer l'accès vers ces états. Cela revient à déterminer un ensemble de contraintes caractérisant de manière bijective le comportement autorisé du système. Le problème peut être résolu en utilisant la théorie de Ramadge et Wonham en conjonction avec le graphe de marquage du modèle. Leur objectif est de remplir le fossé entre le graphe de marquage et le calcul du contrôleur optimal. Ce travail est donc situé en amont de la méthode des invariants, et concerne l'étape de conception des contraintes admissibles pour cette dernière.

Le but de la synthèse de la commande est de construire un contrôleur capable de limiter le fonctionnement d'un procédé donné de telle manière qu'il respecte à tout moment le cahier des charges imposé, pour le contrôle des SED est la théorie générale de la commande par supervision. Dans un premier temps, ils ont considéré le problème pour le cas des RdP saufs.

Par rapport aux méthodes déjà existantes, ils ont aussi pris en compte le cas des réseaux non-conservatifs. Dans ce contexte, ils ont présenté une solution pour la détermination des contraintes équivalentes aux états interdits. Cette équivalence repose sur une première définition des contraintes contenant des marquages complétés. Pour pouvoir appliquer la méthode des invariants, il a été nécessaire d'éliminer les marquages complétés.

Dans un deuxième temps, il a été envisagé la généralisation de cette technique, pour pouvoir l'appliquer à une classe plus grande des systèmes : "les RdP généralisés". Mais, la généralisation directe n'est pas possible, l'approche étant basée sur une opération spécifique aux RdP binaires : "le complément logique". Ils ont utilisé dans un premier temps l'approche

de Ramadge et Wonham pour déterminer les deux ensembles nécessaires et suffisants pour le calcul du contrôleur optimal : le comportement autorisé et l'ensemble des états interdits frontières. À partir de ce point, ils ont déterminé un ensemble des contraintes caractérisant de manière bijective le comportement autorisé. La forme générale de leurs contraintes est formulée à partir d'une analyse spatiale de l'espace d'états du système.

Dans ce contexte, les contraintes sont des inégalités linéaires en nombres entiers dérivées de l'équation d'hyperplans affines qui séparent les régions interdite et autorisée de l'espace d'états. Une méthode d'optimisation est utilisée pour assurer la complexité minimale de chaque contrainte. Ils ont garantis, de cette manière, la minimisation du nombre d'arcs de contrôle. Ils ont également développé un algorithme de minimisation du nombre des contraintes afin d'assurer l'optimalité structurelle de la solution de contrôle obtenue, et construire une méthode de synthèse du contrôleur optimal simple, systématique et facilement implémentable. Les démarches suivies par ces travaux peuvent être résumées selon la figure I.7.

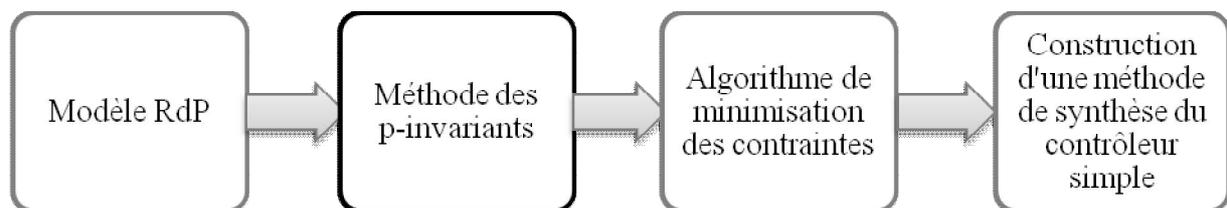


Figure I.7. Synthèse de contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Petri

## **I.8. Algorithmes évolutionnaires et méthodes approchées multicritères pour la génération des processus de fabrication dans un environnement reconfigurable**

Dans les étude de BENSMAÏNE Abderrahmane et all [BDB12] [BDB11c] [BDB11b] [BDB11a] [BDB12] [BDB13d] [BDB13c] [BDB13b] [BDB13a] [BEN13], les chercheurs ont présenté un ensemble de définitions et de concepts de base liés aux systèmes manufacturiers reconfigurables. ils ont été intéressés par les limites des systèmes

---

manufacturiers existants pour illustrer les besoins de mise en place des RMSs( *Reconfigurable Manufacturing Systems*), en détaillerons leur avantages, les caractéristiques et les technologies clés liées aux RMSs.

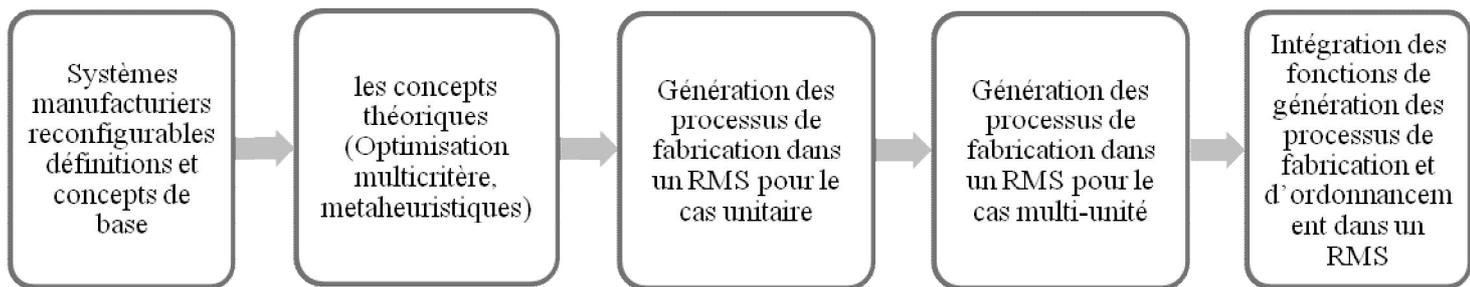
Ensuite, ils ont fait une étude bibliographique sur les RMSs et les problématiques associées, ainsi que les techniques existantes permettant d'avoir les processus de fabrication dans un RMS.

Et, ils ont décrit quelques concepts de base liés à l'optimisation multicritère utilisés dans le cadre de cette thèse. Les méthodes de résolution classiques ainsi que les métaheuristiques les plus performantes (algorithmes génétiques et recuit simulé) sont Présentées avec leurs adaptations multicritère. Par ailleurs, TOPSIS (une méthode d'aide à la décision) est exposée, et servira comme outil d'aide à la sélection de la meilleure solution parmi les solutions obtenues avec les approches multicritère.

Les auteurs ont exposé l'approche adoptée pour la génération des processus de fabrication dans le cas unitaire, un modèle mathématique est proposé permettant la minimisation du coût total et le temps total de réalisation d'une seule unité du produit. Une technique de codage en nombre réel est proposée pour éviter les solutions irréalisables. Un examen d'expériences numériques est présenté et analysé pour illustrer l'utilité de l'approche.

Ils ont proposé une approche pour la génération des processus de fabrication dans le cas multi-unité. L'approche est composée de deux phases, la première phase détermine un ensemble de processus de fabrication optimaux. La seconde phase associe à chaque unité un processus de fabrication. L'identification du meilleur processus de fabrication, unité par unité, est effectuée via une optimisation basée sur la simulation. Ils ont présenté dans un entourage d'une simulation à évènements discrets développée pour un environnement reconfigurable.

Enfin, une approche heuristique pour l'intégration des fonctions de génération des processus de fabrication et d'ordonnancement dans le cas d'un RMS est développée. Cette heuristique repose sur la nature multi-configuration des différentes machines RMT (*Reconfigurable Machine Tools*). Pour illustrer l'applicabilité et l'efficacité de l'heuristique ils ont proposé, un exemple numérique est présenté.



*Figure I.8. Algorithmes évolutionnaires et méthodes approchées multicritères pour la génération des processus de fabrication dans un environnement reconfigurable*

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une courte présentation de l'état de l'art concernant les systèmes à événements discrets, les réseaux de Petri et les systèmes de production. Cela nous a permis d'avoir un bref synopsis sur l'analyse, la modélisation et la commande des systèmes.

# ***Chapitre II***

*SYSTEMES DISCRETS,  
CONTINUS,  
HYBRIDES ET  
MANUFACTURIERS*

### Introduction

Dans le domaine automatique, il y a plusieurs classes des systèmes dynamiques : continus, à événements discrets, hybrides. Pour chacune classe il existe une certaine théorie avec des méthodes et des outils pour résoudre les problèmes du système.

### II.1. Les systèmes dynamiques

Un système dynamique est un ensemble mécanique, physique, économique, environnemental ou de tout autre domaine dont l'état (ensemble de grandeurs suffisant à qualifier le système) évolue en fonction du temps. L'étude de l'évolution d'un système nécessite donc la connaissance de :

- son état initial, c'est-à-dire son état à l'instant  $t_0$  ;
- sa loi d'évolution.

Un système dynamique peut être à temps continu, qui est le plus fréquent, ou bien à temps discret. Il peut également être autonome, si sa loi d'évolution ne dépend pas du temps (la loi est alors dite stationnaire) ou non autonome, si sa loi d'évolution dépend du temps [Je12].

### II.2. Système continu

Ce type de système est caractérisé par une dynamique dépendante du temps. Les grandeurs physiques (température, pression, volume,...) caractérisent l'état du procédé qui est de nature analogique et généralement continu. Le comportement de ce type de système est décrit par des variables (à temps continu / discret), le système est dit continu ou discret (échantillonné). La description de la dynamique du procédé est alors une représentation mathématique fonction des grandeurs physiques données sous forme d'un modèle d'entrée / sortie ou d'espace d'état.

En utilisant la définition générale, le système continu est un système qui possède les propriétés suivantes :

**Définition:** *Un système continu (SC) est un système tel que :*

- $T \in \mathbb{R}$
- $X \subseteq \mathbb{R}^n$  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,

- Le vecteur champ  $\Phi$  est déduit par l'équation différentielle de la forme

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

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

### II.2.1. Outils de modélisation et d'analyse des systèmes continus

Une large classe de systèmes à la propriété de pouvoir être décrite par un nombre fini de grandeurs appelées variables d'état. Ces variables permettent de déterminer les évolutions futures du système à partir des états initiaux et des grandeurs externes d'entrées. La recherche d'un modèle mathématique du système étudié peut être abordée suivant deux approches distinctes. La première suppose qu'il est possible d'obtenir une description complète du système à l'aide d'un ensemble d'équations issues de l'application des lois physiques, la seconde approche suppose que les mécanismes internes régissant le fonctionnement du système soient complètement inconnus. L'attitude consiste alors à rechercher d'un ensemble de relations rendant compte simplement du comportement entrées / sorties du système étudié.

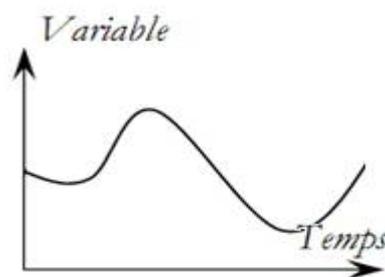


Figure II.1. Evolution d'une variable d'état dans un système continu

### II.2.2. Mise en équations des systèmes dynamiques continus

La représentation d'état des systèmes continus qui régit le comportement d'un système dynamique continu

#### a) Les modèles fondamentaux

La description du fonctionnement normal du système fait appel aux trois modèles [Sta00] :

- **Le modèle comportemental** décrit l'évolution en temps de l'état de système, par suite des entrées de système (des commandes et des perturbations). La trajectoire d'état dépend de la valeur initiale  $x_{(0)}$ . Le modèle le plus proche est un ensemble d'équations différentielles de la forme :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, u, d, \theta)$$

Où  $u \in \mathbb{R}^f$  et  $d \in \mathbb{R}^p$  sont respectivement la commande et les perturbations et  $\theta$  est le vecteur des paramètres du modèle.

➤ **Le modèle de mesure** décrit les mesures qui sont disponibles. Il exprime la manière sous laquelle les capteurs transforment quelques états du processus en signaux de sortie qui peuvent être utilisées pour la commande ou pour la procédure de retour initial (FDI). Une représentation classique du modèle de mesure est donnée par :

$$y(t) = h(x, u, d, \theta, \zeta)$$

Où  $y \in \mathbb{R}^m$  est la sortie et  $\zeta \in \mathbb{R}^m$  est le vecteur du bruit de mesure.

➤ **Le modèle de fonctionnement** définit les valeurs ou la gamme des variables du système sous les conditions de fonctionnement normal. Tandis que les modèles comportementaux et de mesure décrivent le système, le modèle de fonctionnement décrit les choix ou les souhaits des utilisateurs. Une représentation directe est donnée par :

$$g(x, u) \leq \eta$$

Où  $\eta \in \mathbb{R}^k$ . L'équation définit le domaine dans l'espace d'état et de commande dans lequel le système fonctionne sans risque. Un choix rigoureux de ce domaine garantit la sécurité du système et la protection des opérateurs. Ce modèle pourrait être raffiné en définissant deux (ou plus) différents domaines, par exemple un premier dans lequel le système fonctionne sans risque, et un second dans lequel la trajectoire du système peut évoluer en mode dégradé, mais pendant un temps limité avant le mode critique.

### **b) Représentation analytique**

Le modèle le plus couramment utilisé est la représentation d'état linéaire dans le domaine temporel dans lequel le vecteur d'états  $x(t)$ , le vecteur d'entrée  $u(t)$  et le vecteur de sortie  $y(t)$  sont liés par l'intermédiaire des matrices connues A, B, C et D.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) \\ y(t) = C.x(t) + D.u(t) \end{cases}$$

Avec  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^r$ ,  $y \in \mathbb{R}^m$

Ou bien dans le cas discret :

$$\begin{cases} x(k+1) = A.x(k) + B.u(k) \\ y(k) = C.x(k) + D.u(k) \end{cases}$$

Le modèle d'entrée - sortie correspondant est :

$$\begin{aligned} y(s) &= [ C.(sI - A)^{-1} B + D ].u(s) \\ &= [A, B, C, D] = G_u(s).u(s) \end{aligned}$$

Pour l'approche fréquentielle, le modèle d'entrée - sortie utilise

$$y(s) = G_u(s).u(s)$$

Où  $G_u(s)$  ( $G_u(z)$  dans le cas discret) est la matrice de transfert nominale qui est rationnelle propre et de dimension ( $m \times r$ ).

Les procédés ainsi modélisés ne suivent pas toujours une telle représentation. Les principaux aspects à prendre en compte afin de minimiser les erreurs de modélisation sont les suivants [Rip99]:

- Incertitudes sur les paramètres du modèle,
- Modification de la structure du système,
- Non linéarités,
- Perturbations subies par le système,
- Bruit affectant les mesures.

### ***c) Représentation multi modèles***

Un modèle est défini sur un domaine de validité limité. Cette limitation provient, soit des hypothèses simplificatrices, soit des conditions expérimentales nécessaires pour identifier les paramètres du modèle. La structure de représentation simple, linéaire le plus souvent, est valable seulement au voisinage d'un point de fonctionnement.

Pour des domaines de fonctionnement des systèmes larges dans lesquels l'obtention directe d'un modèle global est très difficile en raison de la diversité des comportements dont il doit tenir compte, la représentation nécessite judicieusement une combinaison d'un

ensemble de modèles simples, valables localement (modèles locaux), on définit alors la représentation *multi modèles* [Tos05]

Pour chaque domaine de fonctionnement, on peut définir un modèle local de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f_i(x(t), u(t)) \\ y(t) = h_i(x(t), u(t), t) \end{cases} \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, N$$

Finalement, le système réel compliqué résulte de l'assemblage d'un nombre fini de modèles simples. Un aspect important est que cette approche multi modèle offre la possibilité d'étendre aux systèmes non linéaires les techniques de commande et de diagnostic des systèmes linéaires, ceci à condition d'utiliser une modélisation locale linéaire.

**Exemple:** Considérons le cas de régulation d'une température d'une enceinte par un radiateur commandé par un thermostat. On suppose que quand le radiateur est en arrêt (off), la température,  $x \in \mathbb{R}$ , de la salle diminue exponentiellement vers 0 degrés selon l'équation

$$\dot{x}(t) = -a \cdot x(t) \quad \text{pour } \forall a > 0.$$

Quand le thermostat est en marche (on), la température augmente exponentiellement jusqu'à 30 °C, selon l'équation différentielle

$$\dot{x}(t) = -a(x(t) - 30)$$

Dans cet exemple, le processus (enceinte + thermostat) peut être approché à deux modèles différents qui sont décrits par les deux équations ci-dessous caractérisant son évolution.

### II.2.3. Exemples d'un système continu

On prend l'exemple d'une machine asynchrone qui se présente comme un système dynamique continu non linéaire. Par conséquent, sa commande nécessite la disponibilité d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électrique, magnétique et mécanique. [Ha09]



Figure II.2. Rotor (à gauche) et stator (à droite) d'un moteur asynchrone

La machine asynchrone est de nature triphasée et, à partir des hypothèses mentionnées auparavant, les équations des circuits électriques font intervenir des inductances propres et mutuelles permettant de définir les flux en fonction des courants.

Pour un observateur, les équations en grandeurs de phase sont :

$$u_{s(a,b,c)} = R_s i_{s(a,b,c)} + \frac{d\phi_{s(a,b,c)}}{dt}$$

Pour un observateur lié au rotor, les équations en grandeurs de phase sont :

$$u_{r(a,b,c)} = R_r i_{r(a,b,c)} + \frac{d\phi_{r(a,b,c)}}{dt}$$

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir des différentes inductances, dont certaines dépendent du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique  $\theta$ , position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) du stator.

➤ Modélisation en représentation d'état de la machine asynchrone:

Le modèle de la machine utilisé peut être simplifié à un modèle linéaire d'ordre 4 en prenant la vitesse, qu'on suppose la connaître par mesure, comme un paramètre variable. En choisissant un  $(\alpha, \beta)$  repère lié au stator, le vecteur d'état est le suivant :

$$X = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \phi_{s\alpha} \ \phi_{s\beta}]^T$$

Le modèle d'état est celui d'un système linéaire d'ordre 4 à paramètres variant dans le temps.

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{s\alpha} \\ \frac{d}{dt} i_{s\beta} \\ \frac{d}{dt} \phi_{r\alpha} \\ \frac{d}{dt} \phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_s\sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r\sigma}\right) & 0 & \frac{(1-\sigma)}{T_r L_m \sigma} & \frac{(1-\sigma)}{L_m \sigma} \omega \\ 0 & -\left(\frac{R_s}{L_s\sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r\sigma}\right) & -\frac{(1-\sigma)}{L_m \sigma} \omega & \frac{(1-\sigma)}{T_r L_m \sigma} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Pour le modèle de la machine, les courants statoriques mesurés sont les éléments du vecteur de sortie :  $Y = [i_{s\alpha} i_{s\beta}]^T$ .

	Statoriques	Rotorique	pulsation	$\omega$
courants	$i_s$	$i_r$	inductances	$L_s, L_m$
résistances	$R_s$	$R_r$	Cst temps	$T_r$
Flux mag	$\Phi_s$	$\Phi_r$	coeff	$\sigma$
tensions	$u_s$	$u_r$	tensions	$V_s$

### II.2.4. Système continu échantillonné

On sait que le comportement d'un système continu à l'instant  $t$  peut être résumé par son état qui représente la mémoire minimale du passé nécessaire à la détermination du futur.

Pour les modèles à état continu, l'espace d'état est un continuum composé de tous les vecteurs à  $n$  dimensions à composantes dans l'ensemble des variables réelles.

Dans la description des systèmes échantillonnés avec une période  $T_e$ , généralement constante, la variable réelle  $t$  est remplacée par la variable entière  $k$ . Ces systèmes sont décrits par des équations aux différences. Il est important de noter que la discrétisation du temps n'implique pas la discrétisation de l'espace d'état. L'état peut prendre n'importe quelle valeur dans l'ensemble des nombres réels. On ne distinguera donc pas fondamentalement dans la suite les systèmes décrits par des équations différentielles et par des équations aux différences: ils sont simplement à temps continus ou à temps discrets et la variable temps est une variable naturelle indépendante qui apparaît comme argument de toutes les fonctions d'entrée, d'état ou de sortie.

### II.3. Systèmes à événements discrets

Dans cette catégorie de système, la notion d'évènement est essentielle. Il s'agit des systèmes fondamentalement asynchrones pour lesquels la dynamique est gérée par des évènements et dont les dates d'occurrence n'ont pas une importance fondamentale, seul compte réellement l'ordre de l'occurrence des évènements. Les variables qui le décrivent prennent des valeurs dans un ensemble quantifiable. Ce type de système peut être autonome ou temporisé.

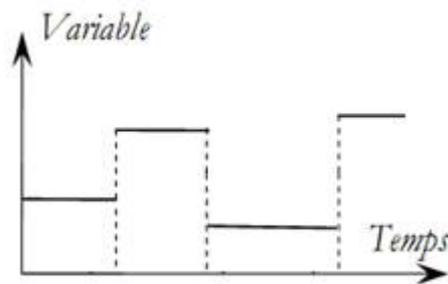


Figure II.3. Evolution d'une variable d'état dans un SEDT

Une grande variété des systèmes physiques peut être représentée par des modèles SED: les systèmes manufacturiers, les systèmes de transport, les systèmes de communication et d'autres dont le comportement est basé sur l'occurrence d'événements asynchrones dans le temps.

Les modèles SED sont différents suivant les communautés de l'automatique et de l'intelligence artificielle (IA) qui y sont intéressés. Dans la première, les problèmes de commande ont été primordiaux et les représentations telle que les réseaux de Pétri et les machines à états finis (FSM) ont été développées. De telles représentations sont devenues les outils les plus adoptés, mais ont toujours quelques inconvénients pour modéliser les processus.

Dans la communauté de l'IA, le paradigme de raisonnement à base de modèle s'est concentré plus sur les aspects de simulation de la modélisation des processus que sur les aspects de commande [Pro03].

Un SED est caractérisé par son comportement dynamique qui se traduit par le changement d'état suite à l'occurrence d'un événement. Les événements peuvent être de deux types : l'événement de temps est un événement uniquement déterminé par rapport à la variable *temps*, l'événement contrôlé dépend des conditions d'évolution du système et s'obtient par des règles, il définit soit un événement d'état ou un événement de commande.

L'instant d'occurrence de l'événement n'est pas a priori connu.

Les modèles les plus classiques permettant d'appréhender les SED sont :

- ❖ Les Réseaux de Pétri,
- ❖ Les automates à états finis,
- ❖ Les statescharts,
- ❖ Les chaînes de Markov,
- ❖ L'algèbre (max, +) ...

Le modèle habituellement utilisé pour représenter les SED est les Réseaux de Pétri.

### II.3.1. Caractéristiques des Systèmes à événements discrets

Les entreprises cherchent à adopter les outils de production les plus performants. De nouvelles caractéristiques telle que la flexibilité, la réactivité, et la proactivité sont nécessaires dans la conception des systèmes de production :

#### a. Flexibilité

Cette caractéristique définit la capacité d'adaptation aux nouveaux besoins du système. Elle peut être au niveau physique ou décisionnel. Le premier niveau prend en compte la flexibilité opérationnelle alors que le deuxième niveau concerne plus spécialement la reconfiguration du système. Ces deux concepts ne s'opposent pas. En effet, ils doivent être considérés conjointement pendant la phase de conception. Plusieurs types de flexibilité ont été mis en évidence suivant leurs incidences sur l'objectif qui est le produit fini et sur les moyens de production permettant la réalisation de ce produit. On classifie la flexibilité suivant les produits fabriqués, les moyens de production et les opérations : [Kec07]

- La première classe regroupe la flexibilité de produits, la flexibilité de mélange et la flexibilité de quantité : la première offre la possibilité d'une reconfiguration du système pour la prise en compte d'un nouveau produit ou famille de produits permettant ainsi un gain de productivité; alors que la deuxième permet de produire simultanément un ensemble de produits ayant des caractéristiques de base communes; cette flexibilité peut être mesurée par le nombre de produits différents qui peuvent être fabriqués simultanément; lorsqu'il s'agit de la capacité du système à faire face aux fluctuations de la quantité des produits à fabriquer en modifiant les rythmes, ainsi que les temps de passage et d'engagement des outils, on parlera alors de la flexibilité de quantité.
- La seconde classe englobe la flexibilité de routage et la flexibilité des ressources : la première offre au système les moyens d'un aiguillage plus souple, de façon à servir les différents segments de procédés libres ou sous-engagés, alors que la deuxième caractérise la capacité des ressources à effectuer plusieurs tâches élémentaires et de permettre la reprogrammation,
- La dernière classe comporte la flexibilité d'ordre des opérations et la flexibilité d'expansion. La flexibilité d'ordre des opérations permet de changer l'ordre des opérations en cours de production (ce qui suppose l'existence d'une gamme principale

et des gammes secondaires) ou de choisir la destination suivante après chaque opération; alors que la flexibilité d'expansion autorise une extension et une modification de l'architecture du système.

### **b. Réactivité**

Une autre exigence importante que doit satisfaire un SED est d'être réactive. C'est-à-dire capable de répondre rapidement et économiquement à un changement (fabrication multi-produit, introduction d'une commande urgente, modification d'une norme etc.) ou à un aléa. Ces aléas peuvent provenir soit du système de production (défauts d'alimentation, défauts de réalisation d'une tâche, pannes des machines, rebuts) soit de son environnement (approvisionnements des matières premières). La réactivité d'un SED impose alors une vision dynamique des événements qui se passent dans le système.

Elle est définie comme l'aptitude à répondre (réagir) dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe (aléa, situation nouvelle, perturbation, sollicitation, ...) par rapport au régime de fonctionnement.

### **c. Proactivité**

A côté des fonctions d'observation, de surveillance et de correction, nécessaires pour assurer la réactivité d'un système, la proactivité est une quatrième fonction d'enrichissement des connaissances, qui permet d'améliorer les processus d'interprétation et de décision. Elle consiste à anticiper (prévoir et/ou provoquer) les changements d'état, à ajuster en quelques sortes son environnement, à adapter ses règles de fonctionnement et à se réorganiser afin de gérer et maîtriser les aléas néfastes à la performance industrielle.

### **II.3.2. Tour d'horizon des travaux sur les SED**

Les travaux sur les SED sont orientés vers différents axes de recherche que nous regroupons en trois classes principales :

- a.** Modélisation et commande des SED : Dans un souci de tenir compte de manière efficace aussi bien des différentes fonctionnalités du système, que de ses performances, de nombreuses représentations des SED ont été proposées dans la littérature. De plus, il s'avère nécessaire de disposer des structures de commande leur assurant un bon comportement (au sens du respect du cahier des charges) [Bon01].
- b.** Conduite et ordonnancement : Dans [Gh12] et [GSH05], les auteurs présentent une technique de conduite et d'ordonnancement de tâches en temps réel en se basant sur la modélisation par réseaux de Pétri dont le but est d'établir des politiques de priorité, de

routage, etc., destinées à résoudre les problèmes posés par les phénomènes de concurrence.

- c. Surveillance et sûreté de fonctionnement : Les publications traitant la détection et l'identification des défaillances sont présentées soit sous un formalisme algébrique, soit en utilisant un automate à état fini[Kec07].

### II.3.3.Système à événement discret temporisé

Sous l'appellation Systèmes Dynamiques à Evénements Discrets Temporisés (SEDT) sont regroupés les systèmes dont le comportement dynamique ne peut pas être décrit par des équations différentielles ou aux différences. Cette classe de systèmes regroupe aussi bien les systèmes de production (ateliers flexibles, lignes d'assemblage), les réseaux de communication (réseaux informatiques) que les systèmes de transport (routier, ferroviaire ou aérien). L'importance prise par ces systèmes dans notre société a conduit de nombreux chercheurs à proposer des modèles mathématiques permettant de décrire leur comportement afin d'en évaluer les performances et d'optimiser leur conception ou leur pilotage. La diversité de ces systèmes conduit naturellement à différents modèles, ces derniers ne se soucient que des débuts et des fins de ces phénomènes (les événements discrets) et de leur enchaînement logique, dynamique ou temporel.

Formellement, le changement d'état d'un SEDT peut être décrit par un couple (événement, instant d'occurrence). Un ensemble ordonné de tels couples s'appelle une séquence.

#### II.3.3.1.Exemple d'un SEDT

Considérons l'exemple d'une machine qui peut être dans trois états : arrêt, marche et panne. La figure II.4, représente une évolution possible de ce SEDT. [Va12]

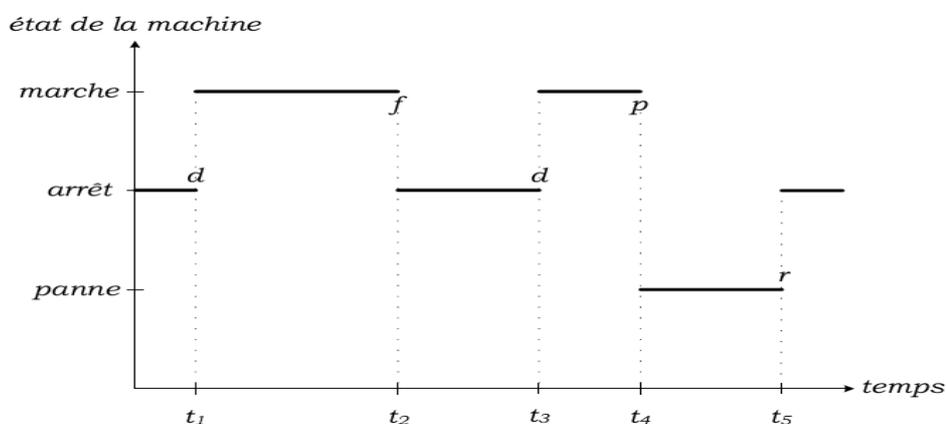


Figure II.4. Chronogramme de l'évolution de l'état d'une machine

Dans l'état initial la machine est supposée être en arrêt. Au moment  $t_1$  une pièce est détectée à l'entrée, l'événement  $d = \text{début de cycle d'usinage se produit}$ , et la machine évolue dans l'état de marche. Il y a deux évolutions possibles, à partir de cet état. Soit le cycle d'usinage est accompli sans erreur et la machine dépose la pièce usinée à la sortie simultanément à l'occurrence de l'événement  $f = \text{fin de cycle d'usinage}$ , soit la machine tombe en panne fait signalé par l'occurrence de l'événement  $p = \text{panne}$ . Depuis l'état de panne, la réparation de la machine événement  $r$  ramène celle-ci à son état initial. La pièce en cours de traitement est supposée perdue pendant la réparation. La machine mène à terme le premier cycle d'usinage au moment  $t_2$  (événement  $f$ ), commence un nouveau cycle au moment  $t_3$  (événement  $d$ ), tombe en panne au moment  $t_4$  (événement  $p$ ) et est réparée au moment  $t_5$  (événement  $r$ ). La séquence décrivant ce fonctionnement est comme suit:

$$S = (d, t_1), (f, t_2), (d, t_3), (p, t_4), (r, t_5).$$

Si le SED est décrit par un modèle logique, seul l'ordre des événements importe. Dans ce cas le temps est omis et nous parlons de séquences d'événements. Dans ce contexte, le fonctionnement de la machine est donné par la séquence d'événements  $S = d, f, d, p, r$ .

En général, dans un SEDT, on peut constater des divers cas :

- un même événement peut conduire à des états différents ;
- des événements différents peuvent conduire à un même état ;
- des événements peuvent se produire et être inactifs pour ce système ;
- la séquence des états et le temps de maintien associé à chaque état caractérisent la trajectoire.

### II.4.Systèmes dynamiques hybrides

Les systèmes hybrides(SDH) décrivent des systèmes où les composants continus et discrets sont en interaction. Ces systèmes ont suscité beaucoup d'attention des communautés d'Automatique et d'Informatique.

En effet, un SDH possède à la fois des variables éléments d'un espace mathématique continu ainsi que des variables faisant partie d'un espace mathématique discret. Ces deux types de variables interagissent entre elles: au sein d'une même phase discrète, les variables continues évoluent d'une manière déterminée et le franchissement d'un seuil par certaines d'entre elles ou par leur dérivée peut provoquer un changement déphasé. Ainsi, ces variables continues et discrètes dépendent de la variable indépendante temps, qui peut être à son tour considérée comme continue ou discrète.

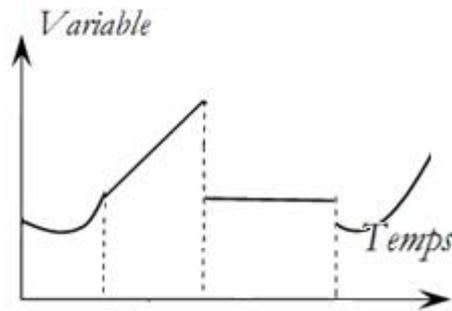


Figure II.5. Evolution d'une variable dans un SDH

On rencontre dans de nombreux domaines des exemples de systèmes abstraits par des SDH, dans l'électronique, la robotique, la production manufacturière, le transport, la communication ou la biologie.

**Définition :** Un système dynamique hybride (**SDH**) est un système tel que :

- $T \in \mathbb{R}$
- $(x, q) \subseteq X \times Q$  représente l'état complet du système hybride.
- $(x_0, q_0)$  est l'ensemble des états initiaux..
- $U_c \cup U_d$  représente l'ensemble des commandes continues et celles discrètes.
- $\Phi: X \times Q \rightarrow \mathbb{R}^n$  définit un sous-ensemble des trajectoires pour chaque état discret.

### II.4.1. Tour d'horizon sur les travaux de modélisation et commande des SDH

L'étude des systèmes hybrides a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs. La réduction de la complexité était et est toujours un motif important de traiter les systèmes hybrides; ceci est accompli en incorporant des modèles des processus dynamiques ayant différents niveaux d'abstraction afin d'éviter de traiter directement un ensemble d'équations non linéaires, on peut choisir de manipuler un ensemble d'équations plus simples (par exemple linéaire) avec une commutation entre les modèles.

Bien que l'étude des systèmes hybrides comme un domaine à part de l'automatique soit relativement nouvelle, plusieurs types de systèmes qui appartiennent à cette catégorie ont été déjà étudiés comme des systèmes purement continus ou discrets. Les premières démarches sur les systèmes hybrides sont apparues dans les travaux de Witsenhausen et Johnson

[Witsenhausen, A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems, 66; Johnson, Analytic models of multistage processes, 81]. Plus tard, d'autres travaux ont motivé la communauté scientifique de l'importance de cet axe de recherche.

Plusieurs études sont orientées ensuite vers divers thème de recherche telles que la modélisation [Ta87], la vérification [MP92], l'analyse [AKZ98]. De façon générale, les approches diffèrent selon l'importance attachée au problème, suivant la complexité de la dynamique continue et discrète et les objectifs visés (modélisation, analyse, commande ...).

### **II.4.2. Formalisme de modélisation des SDH**

Quand les dynamiques continues et discrètes coexistent et interagissent entre elles, il est important de développer les modèles qui décrivent exactement le comportement dynamique de tels systèmes, c'est-à-dire qui modélisent non seulement les aspects continus, les dynamiques discrètes mais aussi ces interactions. Dans un processus de production par exemple, des pièces peuvent être traitées par une machine particulière mais seulement l'arrivée d'une pièce déclenche le processus; c'est-à-dire, le processus de fabrication se compose d'une dynamique entraînée par les événements des pièces se déplaçant parmi les différentes machines et d'une dynamique provoquée par le temps des processus dans les machines particulières.

Fréquemment dans les systèmes hybrides, la dynamique entraînée par les événements a été autrefois étudiée séparément de la dynamique provoquée par le temps, le premier via des modèles d'automates ou de réseaux de Pétri et le deuxième par l'intermédiaire des équations différentielles ou de différence. Pour comprendre entièrement le comportement du système et assurer des performances élevées, on doit modéliser toutes les dynamiques ainsi que leurs interactions, et c'est le plus important quand il y a des interactions fortes entre les parties du système. Il y a naturellement des processus où les dynamiques continues et discrètes ne sont pas fortement liées (couplées) et où les exigences vis-à-vis des performances du système ne sont pas difficiles à déterminer, dans ces cas, on considère des modèles plus simples séparés pour des phénomènes différents [AK01]. Cependant des modèles hybrides doivent être utilisés quand il y a une interaction forte entre les parties continues et discrètes. Le formalisme des systèmes hybrides est très général et englobe une grande gamme d'applications industrielle [Lyg04].

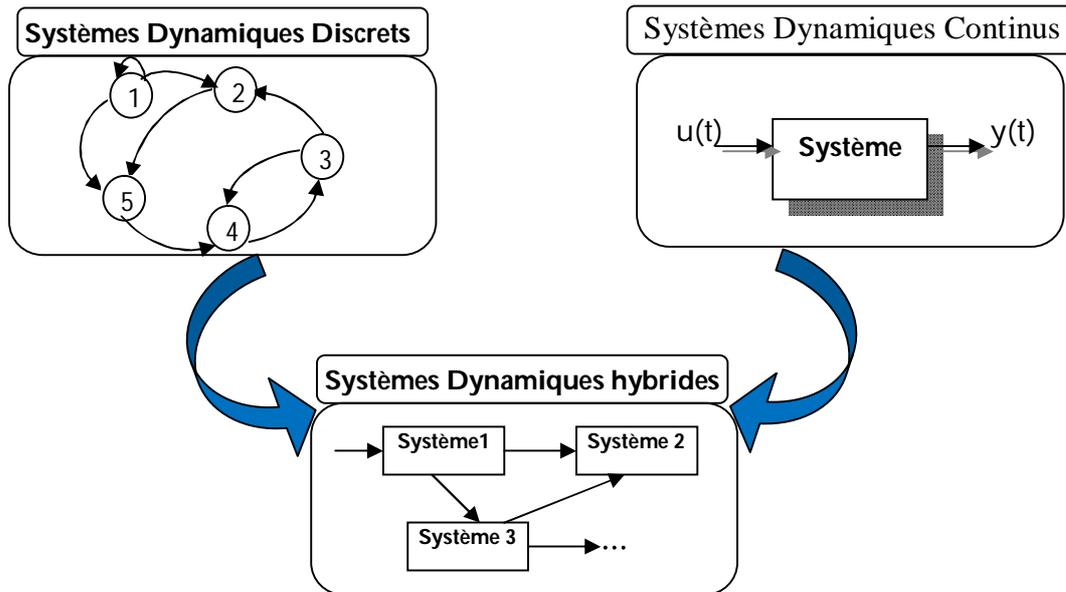


Figure II.6 Le système hybride se réfère au couplage essentiel des phénomènes continus et discrets au sein d'un système [Tho04] et[Mig02]

### II.4.3. Les types des systèmes dynamiques

Les SDH comportent des composants « discrets » (commutateurs, vannes, ordinateurs, etc.) présentant les changements instantanés et des composants « continus » (charge des condensateurs, des réactions chimiques, etc...) présentant l'évolution continue.

➤ **Systèmes dynamiques impulsionnels.**

Ce sont des systèmes comportant des discontinuités, résultant d'une partition de l'espace d'état, système linéaire par morceaux, soit par un changement des paramètres du système selon un signe donné [Gir04] et [EIM05].

**Exemple :** Une balle en rebondissement.

➤ **Systèmes dynamiques par morceaux**

Cette catégorie de systèmes inclue les éléments de commutation où la dynamique hybride du système est provoquée par des éléments à caractéristiques continues (condensateur...) et des éléments à caractéristiques discrètes (relais, diode...).

**Exemple :** le circuit électrique comportant une diode.

➤ **Systèmes dynamiques à commutation**

Dans ces systèmes, les variables discrètes sont vues comme des variables de contrôle ou de commande. Ainsi, l'évolution de l'état discret n'est pas toujours contrainte par des gardes qui sont gouvernés par la variable continue mais elle peut être donnée par l'opérateur.

**Exemple :** Boite de vitesse (automatique) d'un véhicule.

➤ **Systèmes avec modèles de pannes**

Dans le cas des défauts brusques ou passagers, l'occurrence d'un défaut dans un système peut être modélisée comme un signal de commutation. Le système peut alors être considéré comme système hybride.

### II.4.4. Classification des SDH

Une proposition de classification des phénomènes physiques considérés comme hybrides en quatre catégories a été réalisée par Branicky [Bra95] [BBM98]. Il s'agit de

- Commutations autonomes (avec continuité de l'état) caractérisées par un changement de  $\dot{x}$  lorsque l'état continu  $x$  atteint certains domaines dans l'espace des états continus. Ce domaine constitue les valeurs limites imposées pour une variable continue dans un processus technologique. Exemple d'un circuit électrique comportant une diode.
- Saut autonome où la variable d'état  $x$  change de façon discontinue, lorsqu'elle atteint une certaine région de l'espace d'état. La balle en rebondissement est un exemple illustratif de ce phénomène.
- Commutations contrôlées où la variable d'état  $x$  change instantanément en réponse à une entrée externe (commande). La détermination de l'état discret du processus est réalisée en tenant compte des événements de contrôle du processus et des événements physiques du processus issus du générateur d'événement. Le système constitué d'un réservoir avec une vanne d'alimentation et une vanne d'évacuation présente clairement un cas de système à commutation commandée.
- Sauts commandés où la valeur de  $x$  change de façon discontinue sous l'influence d'une action extérieure. Les systèmes électrotechniques avec des entrées impulsionnelles illustrent un cas du saut commandé.

#### II.4.4.2. Exemples d'un Système de bacs [Gho12]

Les exemples des SDH 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 un exemple de SDH, c'est un système de bacs où l'état (discret) de la vanne contrôle le flux (continu) du liquide.

Soit le système de bacs schématisé en figure II.7 ci-contre. Ce système comporte deux bacs qui sont vidés en permanence (sauf dans le cas où les bacs sont vides) à un débit 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 de ces variables est contrôlé par la variable discrète ; position de la vanne.

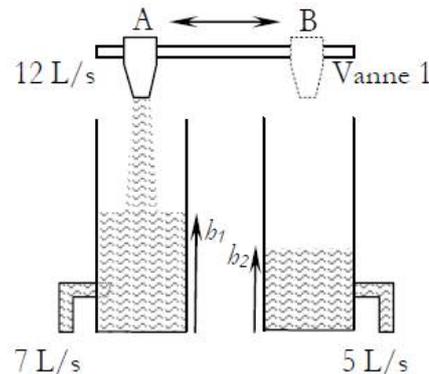


Figure II.7. Système de bacs

### II.4.5. Les Systèmes manufacturiers

#### II.4.5.1. Systèmes manufacturiers dédiés (DML)

Les Systèmes Manufacturiers dédiés (SMD) (*Dedicated Manufacturing Lines - DML*) ou les Lignes Transfert dédiées (LTD) ont été développés dans le secteur de l'automobile (production de masse) où la rationalisation de la fabrication répond à un objectif de productivité. Chaque ligne dédiée est typiquement destinée à produire une pièce unique à un haut rythme de productivité. Chaque station de la ligne est spécialisée pour faire une opération d'usinage toujours identique et toujours au même endroit sur la pièce (perçage, fraisage, lamage...). Les DML sont devenus moins pertinents par rapport à l'évolution du marché. Ils sont économiquement viables quand la demande de produit est importante et fixe.

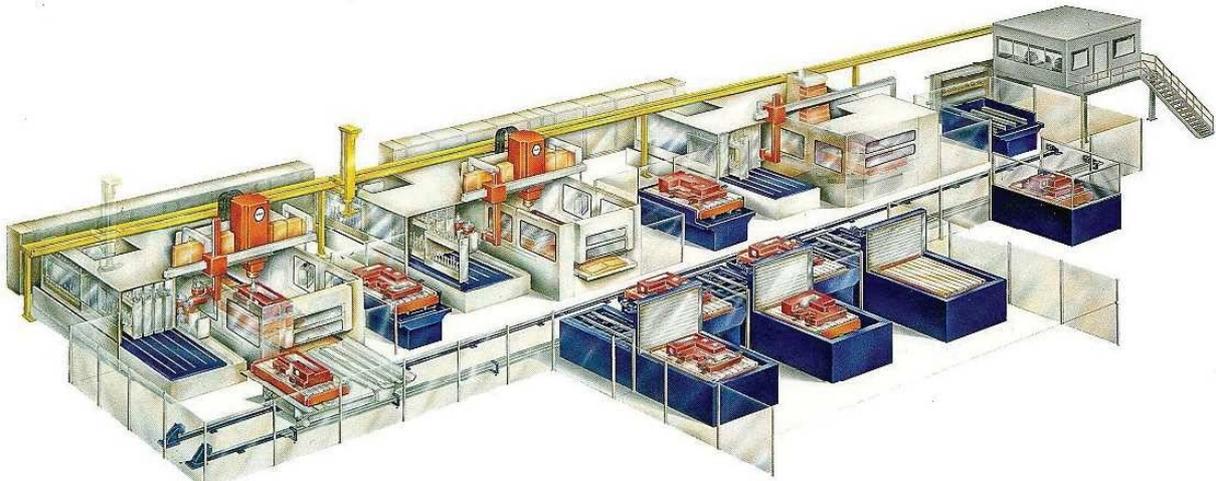
#### II.4.5.2. Systèmes manufacturiers flexibles (FMS)

Les Systèmes Manufacturiers Flexibles FMS ont été introduits dans les années 1980 [MeMKU02]. C'est une technologie qui vise à rendre flexible l'ensemble de l'outil de production permettant de préparer, de s'adapter aux divers changements de son environnement, sans qu'il y ait besoin d'engager de nouveaux investissements en biens

d'équipement, ou d'engendrer de longues pertes de temps. Les FMS peuvent être un ensemble des modules ayant plusieurs directeurs de commande, ou un seul système de production flexible (*Figure II.8*). Les FMS ont été spécialement développés pour répondre à la fois aux contraintes de productivité et de flexibilité. Malheureusement, ils présentent un certain nombre d'inconvénients :

- très haut cout initial, l'investissement et les charges financières de ces équipements (hardwares, softwares),
- bas taux de production à cause de non simultanété des opérations,
- leurs capacités de production sont souvent fixes et très inférieures aux objectifs visés.

Selon [MeMKU02], les entreprises industrielles mettant en place des FMS constatent le plus souvent que le niveau de flexibilité n'est pas conforme aux objectifs visés. De plus, la productivité des FMS est largement inférieure aux DML avec des coûts d'investissement initiaux et de fonctionnement plus importants. Pour répondre à ces exigences et difficultés, les RMS sont proposées.



*Figure II.8. Exemple de structure de fabrication flexible comportant plusieurs cellules d'usinage*  
[MeMKU02]

### II.4.5.3. Systèmes manufacturiers reconfigurable (RMS)

La définition générale des RMS a été donnée par Y. Koren [Ko99]. « Le système de fabrication reconfigurable est un système qui est conçu au départ pour le changement rapide de structure, aussi bien des composants et que des logiciels. Il peut être ajusté rapidement à la capacité et à la fonctionnalité de production, pour une famille de pièce, en réponse aux changements rapides du marché ou des conditions de normalisation ».

L'objectif du RMS est de répondre à des exigences variables et d'assurer une fonctionnalité ajustable avec une forte productivité et des temps d'installation minimaux [Ab06(a)].

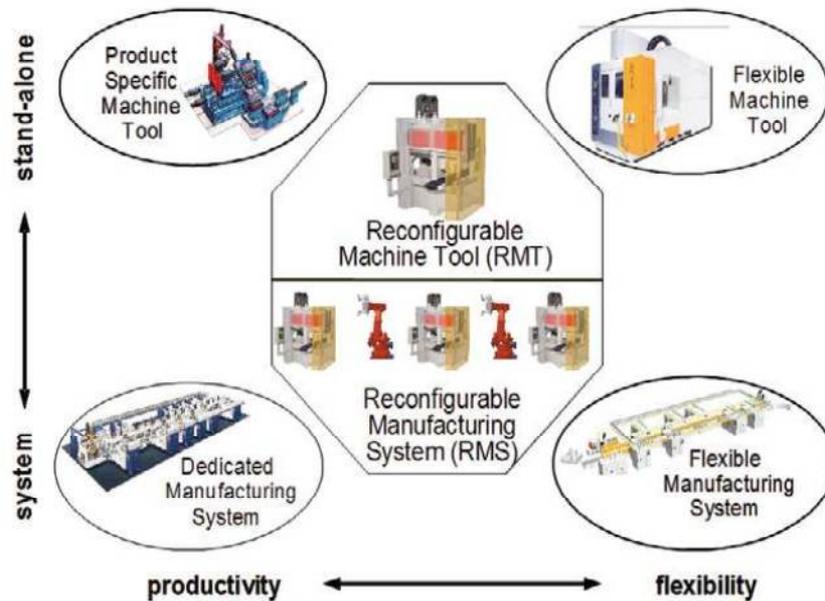


Figure II.9. Classification des systèmes de fabrication [Ab06(a)].

#### II.4.5.4. exemple d'un système de production manufacturier [Gho12]

La figure II.10 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 ci-après. 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 :

- l'état de la machine 3, qui peut prendre deux valeurs : arrêt et marche ;
- l'état de la demande qui prend deux valeurs 15 pièces/min et 0 pièces/min.

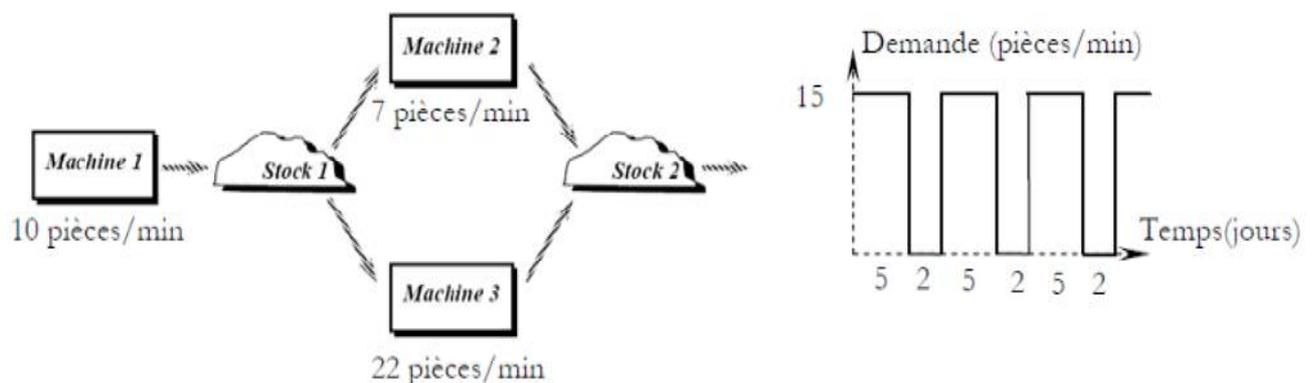


Figure II.10. Système manufacturier

La production est un ensemble des transformations successives passant d'une matière première à un produit fini [Da66]. Chacune de ces transformations correspond à des modifications physiques ou chimiques des matières traitées. Selon El-Maraghy [EIM05], les systèmes de production peuvent être classifiés en trois groupes basés sur leur productivité et flexibilité :

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des différents types des systèmes dynamiques. Nous avons commencé par systèmes continus, puis nous sommes passés aux systèmes à événements discrets pour arriver ensuite aux systèmes dynamiques hybrides, plus profondément les systèmes manufacturiers. Des notions fondamentales relatives à ces systèmes étaient introduites.

Le suivant chapitre sera consacré pour développer les principaux formalismes de modélisation des ces systèmes.

# ***Chapitre III***

*OUTILS DE  
MODELISATION DES  
SYSTEMES A  
EVENEMENTS  
DISCRETS*

## Introduction

Il existe une multitude d'outils permettant l'étude des systèmes à événements discrets, tels que la simulation sur ordinateur, les réseaux de files d'attente, les langages de programmation parallèle / temps réel, les modèles dynamiques algébriques, les automates et les réseaux de Petri. Nous allons présenter dans ce chapitre les outils de modélisation et d'analyse des systèmes à événements discrets, où cette dernière nous permet d'étudier des phénomènes réels et de prédire des résultats à un niveau d'approximation donné. Les modèles mathématiques peuvent être complexes et difficiles à interpréter. Pour cette raison, plusieurs outils graphiques ont été développés, parmi lesquels on peut trouver: les schémas blocs, les graphes de fluence, le Graphe Informationnel Causal (GIC), les Bond Graphs (BG), le Grafcet et les Réseaux de Pétri.

### III.1. Bond Graph

Le Bond Graph est une technique graphique utilisée pour modéliser les systèmes avec un langage unifié pour tous les domaines des sciences physiques. Le Bond Graph que l'on peut traduire par « graphe à liens » ou « graphe de liaisons » a été créé il y a un peu plus d'un demi-siècle. En avril 1955, le « père fondateur » des Bond Graphs, Henry M. Paynter de Boston (Etats-Unis), fit sa première conférence sur les Bond Graphs. Six ans plus tard, il publia son premier ouvrage. Le Bond Graph fût formalisé par la suite dans les années 1970 par deux de ces doctorants, Dean C. Karnopp et Ronald C. Rosenberg, et par Jean U. Thoma. Vers la fin des années 1970, le Bond Graph arriva au Pays Bas à l'université de Twente et en France dans la société Alstom. De nos jours de nombreuses entreprises et de nombreux établissements universitaires utilisent ce langage graphique de type « réseau ».

Le Bond Graph permet de représenter graphiquement les transferts énergétiques au sein d'un système physique entre les composantes de celui-ci. La « puissance » de cet outil réside dans un langage unique, fondé sur la notion d'analogie, qui se veut multi physique (mécanique, électrique, hydraulique, thermodynamique...). Des systèmes physiques de natures différentes peuvent ainsi être représentés par une même méthode. Grâce à sa multidisciplinarité, de nombreux travaux d'études telles que l'analyse des systèmes ont été réalisés. Les applications phares de cet outil sont de type mécanique. Dans le domaine du génie électrique, quelques applications électromécaniques, surtout lié à une modélisation fine ou à de la conception, ont été développées. Le Bond Graph a donc été créé plus dans le but d'une conception et d'une modélisation que dans un objectif de contrôle. À ce jour, aucune commande n'a été clairement

définie à l'aide de cet outil graphique. Le Bond Graph peut toutefois mener à un modèle d'état qui peut lui-même mener à une loi de commande globale. [LHW07]

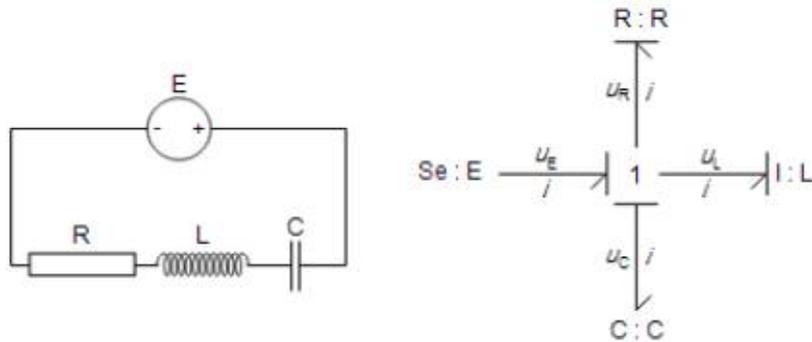


Figure III.1 exemple d'un model bond graph pour un circuit RLC

### III.2. Graphe fonctionnel de commande des étapes et transitions

Le graphe fonctionnel de commande des étapes et transitions (GRAFCET) est un outil graphique qui a été élaboré par l'AF CET (Association Française pour la Cybernétique Économique et Technique) en 1977, il permet de décrire le fonctionnement d'un automatisme séquentiel. Il peut être utilisé pour représenter l'automatisme dans toutes les phases de la conception, la définition du cahier des charges, à la mise en œuvre (programmation d'un automate programmable industriel, utilisation de séquenceurs ou autres technologies) en passant par l'étude des modes de marches et d'arrêts.

Le Grafcet repose sur l'utilisation d'instructions précises, l'emploi d'un vocabulaire bien défini, le respect d'une syntaxe rigoureuse et l'utilisation de règles d'évolutions. Il permet, entre autre, d'adopter une démarche progressive dans l'élaboration de l'automatisme. Il décrit les relations entre les sorties et les entrées booléennes du système de commande. Le Grafcet est une représentation alternée d'étapes et de transitions. Une seule transition doit séparer deux étapes.

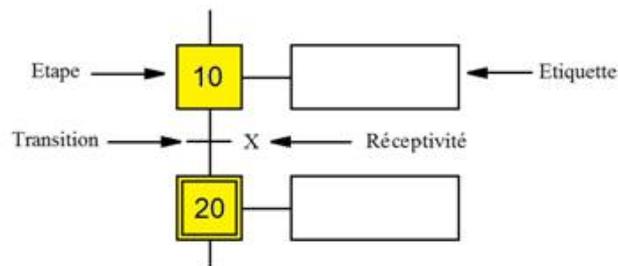


Figure III.2. Les éléments d'un Grafcet

Une étape correspond à une situation dans laquelle les variables de sorties conservent leur état. Les actions associées aux étapes sont inscrites dans les étiquettes. Une transition indique la possibilité d'évolution entre deux étapes successives. A chaque transition est associée une condition logique appelée réceptivité

### III.3. Les réseaux de Petri

Les réseaux de Pétri ont connu depuis leur invention en 1962 par Carl Adams Pétri [Pet62] un réel succès en raison de leur simplicité mathématique, des avantages de leur représentation graphique et de leur compacité. C'est l'un des outils les plus populaires pour la modélisation de systèmes à événements discrets et ses domaines d'applications sont très vastes, on peut citer: l'évaluation des performances des systèmes discrets, les protocoles de communication, la commande des ateliers de production, la conception de logiciels temps- réel et /ou distribués, les systèmes d'information (organisation des entreprises) et les interfaces homme-machine Une littérature très nombreuse existe sur les réseaux de Pétri, leurs fondements théoriques et leurs applications pratiques.

#### III.3.1. Réseaux de pétri autonomes [Gh12]

D'une manière informelle, un RdP est un graphe biparti, c'est-à-dire avec deux types de nœuds, les places (représentées par des cercles) et les transitions (représentées par des barres), des arcs permettent de relier une place à une transition ou une transition à une place. Un poids (nombre entier strictement positif) est affecté à chaque arc, ce poids vaut 1 quand ce n'est pas précisé. Le RdP est dit ordinaire si les valeurs de tous ses poids valent 1, et il est dit généralisé dans le cas contraire. L'ensemble des places ainsi que l'ensemble des transitions sont finis et non vides. Chaque place contient un nombre entier (qui peut être nul) de jetons ou marques, c'est le mouvement de ces jetons entre les places qui décrit la dynamique du système. Le marquage d'un RdP est un vecteur dont la dimension est égale au nombre de places et dont les composantes sont des entiers positifs ou nuls.

#### Définition

Mathématiquement un RdP peut être représenté par le quadruplet :

$$R = (P, T, \alpha, \beta)$$

Où :

- P : ensemble fini non vide des places.

- $T$  : ensemble fini non vide des transitions.
- $\alpha \subseteq P * T$  : relation d'entrée,  $(P_i, T_j) \in \alpha$  s'il existe un arc orienté de  $P_i$  vers  $T_j$ .
- $\beta \subseteq P * T$  : relation de sortie  $(T_j, P_i) \in \beta$  s'il existe un arc orienté de  $T_j$  vers  $P_i$ .

Un vecteur marquage  $m$  peut être associé au graphe  $R$ . Le RdP obtenu est appelé RdP marqué et peut être caractérisé par :

$$RM = (P, T, \alpha, \beta, M).$$

$M(p)$  est le nombre de marques (jetons) contenus dans la place  $p$  du réseau.

### Exemple

Dans le réseau de la figure III.3, les vecteurs places, transitions et marquages sont respectivement :  $P = \{P1, P2, P3\}$ ,  $T = \{T1, T2, T3\}$  et  $M = \{1,0,0\}$ .

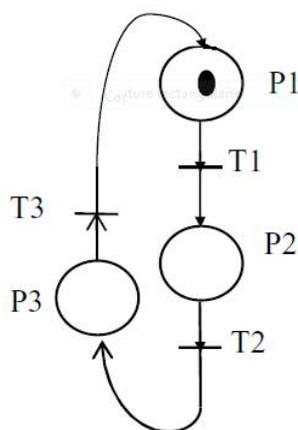


Figure III.3 : Exemple de réseau de pétri marqué

### III.3.2. Réseaux de Petri temporisés

Dans les automatismes industriels décrits par les RdP, le fonctionnement dépend généralement du temps. Par exemple, dans un système de production ou d'assemblage, toutes les opérations demandent un certain délai de réalisation. Le paramètre «temps» a été introduit de différentes manières dans les modèles basés sur les RdP. Ramchandani fut le premier à introduire les réseaux de pétri temporisés. Selon les besoins de l'interprétation, le « temps » est associé soit aux places, soit aux transitions du RdP. On l'appellera respectivement, RdP P-temporisé ou RdP T-temporisé. Plus explicitement, si une place représente une action en cours, la temporisation associée à cette place rendra compte de la durée de l'action correspondante.

Les RdP temporisés sont essentiellement utilisés pour l'évaluation des performances des systèmes de production, telles que le délai de réalisation, les temps de cycle, les temps d'oisiveté des machines... .

### III.3.2.1. Les RdP P-temporisés [Gh12]

A chaque place  $p_i$  est associée une temporisation  $d_i$ , qui peut être constante ou variable, positive ou nulle. Le fonctionnement d'un RdP P-temporisé est d'habitude, lorsqu'un jeton arrive dans une place  $p_i$ , en amont d'une transition  $t_j$ , cette dernière est validée et devient instantanément franchissable. Dans RdP p-temporisé, le jeton doit séjourner dans la place  $p_i$  au moins pendant un temps  $d_i$ . Temps pendant lequel le jeton est indisponible, la transition est validée mais nonfranchissable. Lorsque  $d_i$  est écoulé, le jeton devient disponible et la transition est franchissable.

#### Exemple

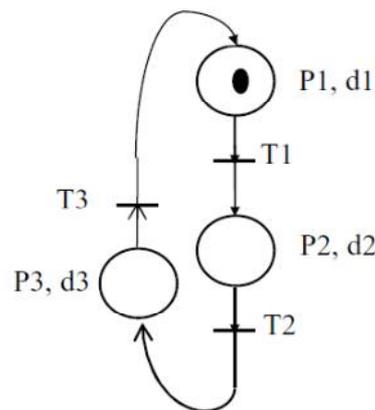


Figure III.4: Exemple de RdP P-temporisé

Le jeton du marquage initial  $M_0=(1,0,0)$  est disponible. Donc à  $t=0$ ,  $d_1=0$  et  $T_1$  est franchie, Un jeton est alors déposé dans  $P_2$ .

- À  $0 < t < d_2$ , le jeton est emprisonné dans  $P_2$ , il est indisponible,  $T_2$  est validée mais non franchissable.
- À  $t = d_2$ , le jeton devient disponible,  $T_2$  est Franchissable et franchie aussitôt. Un jeton est déposé dans  $P_3$ .
- À  $d_2 < t < d_3$ , le jeton est emprisonné dans  $P_3$ , il est indisponible,  $T_3$  est validée mais non franchissable.

- À  $t = d_3$ , le jeton devient disponible,  $T_3$  est franchissable et franchie aussitôt. Le jeton revient à  $P_1$ .

### III.3.2.2. RdP T-temporisés [Gh12]

Dans ce type de RdP, les temporisations sont associées aux transitions. Dans l'exemple suivant, nous allons montrer l'équivalence entre les RdP P-temporisés et les RdP T-temporisés:

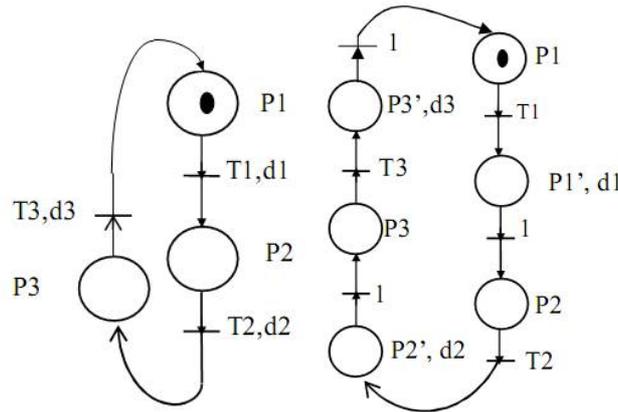


Figure III.5: Transformation d'un RdP T-temporisé en RdP P-temporisé

1. Le passage assez facile du modèle T-temporisé au modèle P-temporisé permet l'utilisation de tous les calculs et les définitions précédentes sans trop de peine.
2. La définition du réseau de pétri précise que le franchissement d'une transition est instantané, le modèle RdP P-temporisé serait donc le plus proche du concept de base.

### III.3.3.1. Les réseaux de Petri T-temporels [Gho12]

Les RdP T-temporels (Time Pétri nets) ont été introduits par Merlin dans sa thèse [Mer74]. L'idée fondatrice des RdP T-temporels est d'associer un intervalle de temps  $[\alpha_j, \beta_j]$  à chaque transition  $T_j$ . Si cette dernière est validée de façon continue pendant au moins  $\alpha_j$  unités de temps, elle peut être franchie. De plus si elle est validée pendant  $\beta_j - \alpha_j$  unités de temps de manière continue, elle doit être franchie. On trouve ici les notions de délais minimum et maximum dans un état au lieu de durée d'un état dans les modèles temporisés.

#### Définition

Un RdP T-temporel  $PN_T$  est un couple  $PN_T = (PN, SIM)$  tel que :

- $PN$  est un RdP autonome marqué
- $SIM : T \rightarrow Q^+ \times (Q^+ \cup \{\infty\})$

➤  $T_j \rightarrow [\alpha_{js}, \beta_{js}]$

$[\alpha_{js}, \beta_{js}]$  est l'intervalle statique de franchissement de la transition  $T_j$

SIM, la fonction d'intervalle statique (Static Interval Mapping), associe à chaque transition un intervalle statique de franchissement. Cet intervalle est dit statique car pendant l'évolution d'un tel RdP, des occurrences d'intervalles de franchissement dynamiques (qui évoluent avec le temps) apparaissent, ces derniers sont notés  $[\alpha_j, \beta_j]$ .

### Exemple

La figure III.6 représente une station de travail comportant une machine, précédée d'un stock de capacité 3 dans lequel les pièces arrivent une à une et attendent la disponibilité de la machine si nécessaire. Considérons les contraintes temporelles suivantes sur le fonctionnement du système.

- Le temps opératoire de la machine prend ses valeurs dans l'intervalle [2, 3]
- La période entre deux arrivées successives de deux pièces varie entre 2 et 5 unités de temps.

Dans cet exemple un indéterminisme est associé aux dates d'occurrence des événements. Le comportement de ce système est modélisé par le RdP T-temporel de la figure III.6.b.

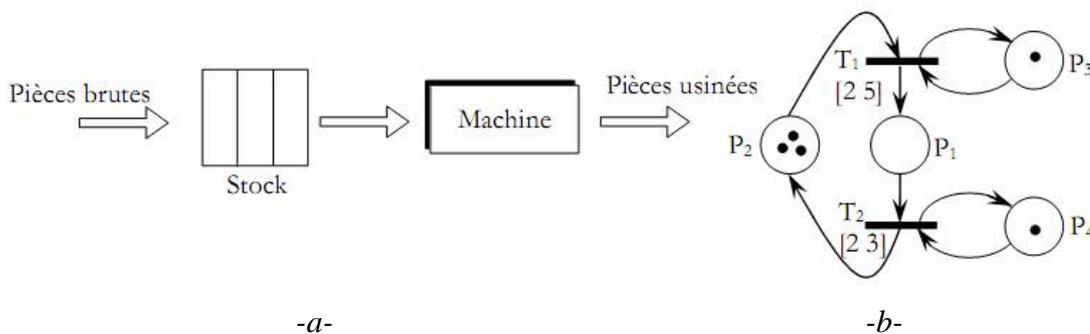


Figure III.6. a. Système manufacturier simple. b. RdP T-temporel modélisant le système manufacturier

### III.3.3.2. Les réseaux de Pétri P-temporels [Med06]

L'intervalle de temps est associé aux places. Chaque jeton doit rester au moins  $d_i$  min unités de temps dans la place  $P_i$  et doit être consommé par un franchissement de transition avant  $d_i$  max au plus tard. La durée pendant laquelle le jeton restera dans la place peut prendre n'importe quelle valeur du domaine temporel  $[d_i \text{ min } (P_i), d_i \text{ max } (P_i)]$ . Avant  $d_i$  min, le jeton est indisponible pour toutes les transitions de sorties de la place  $P_i$ . Une transition de sortie de la

place  $P_i$  peut être franchie en consommant ce jeton pendant sa fenêtre de visibilité. Elle ne sera plus franchissable en consommant ce jeton lorsque la durée écoulée est supérieure à  $d_i \max$  : le jeton est dit mort et cela symbolise un viol de contraintes temporelles. Il y a en fait une horloge par jeton du marquage courant.

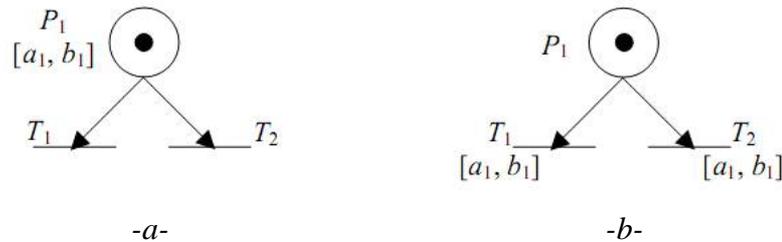


Figure III.7. a. Modèle RdP  $p$ -temporel .b. RdP  $t$ -temporel équivalent

### III.4. Les réseaux de Pétri continus

René David et Hassane Alla [DA87] ont définis les RdP continus, en fluidifiant les marques. Une place d'un RdP continu est dite place continue ou C-place. Son marquage est un nombre réel positif ou nul. De même, une transition dans un RdP continu est dite transition continue, ou C-transition, elle est validée si toutes ses places d'entrée sont marquées. Une C-transition est franchie continument dans le temps contrairement aux RdP discrets où le franchissement d'une transition est un événement instantané.

Les RdP continus sont un outil de modélisation des systèmes dynamiques où toutes les variables d'état sont continuées et positives.

#### III.4.1. Le RdP continu à vitesse constante [DA87]

Il y a quatre modèles RdP continu, celui à vitesse constante (RdPCC) a été le premier à être défini. C'est aussi le plus simple et le plus aisé à comprendre sur le plan intuitif. Une vitesse de franchissement maximale est associée à chaque transition  $T_j$ . Tant que la place d'entrée de la transition n'est pas vide, la transition est franchie selon sa vitesse maximale. Si la place d'entrée est vide mais qu'elle est alimentée en amont par une autre transition  $T_k$ , alors la vitesse de franchissement est le minimum des vitesses maximales des deux transitions  $T_j$  et  $T_k$ .

#### Définition

Un RdPCC est un couple  $PNcc = (PNc, V)$  tel que :

- $PNc$  est RdP continu autonome
- $V:T \rightarrow R^+$
- $T_j \rightarrow V_j$  la vitesse de franchissement maximale de la transition  $T_j$

Le fonctionnement de ce modèle est clairement exprimé à travers l'équation fondamentale d'un RdP. L'équation fondamentale du RdP discret qui est :  $M' = M + W \cdot \bar{S}$

Deviens pour un RdPCC :  $\dot{M} = W \cdot \bar{S}$

Où  $W$  est la matrice d'incidence du RdP continu et  $v(t)$  est le vecteur des vitesses de franchissements instantanées des transitions. A titre d'illustration considérons l'exemple suivant :

### Exemple

Considérons un système constitué de deux réservoirs et de trois vannes, comme illustré dans la figure III.8.a. Les vannes sont caractérisées par leur débit  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  (litres/seconde), et sont supposées être ouvertes en permanence.

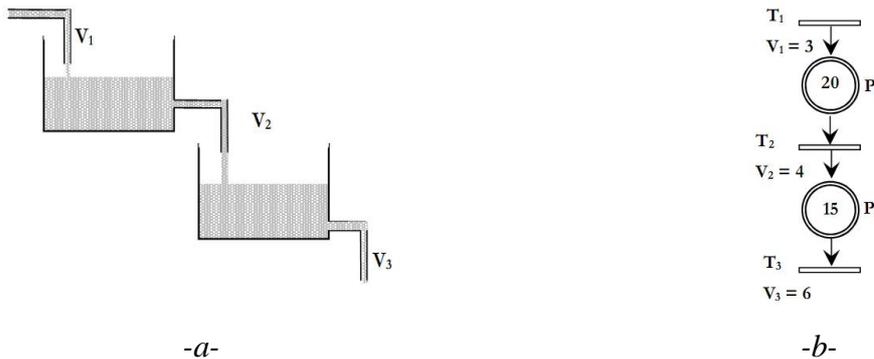


Figure III.8. -a-Système hydraulique.-b- RdPCC modèle des systèmes en figures a

A l'instant initial, les trois transitions sont fortement validées, une transition est dite fortement validée si toutes ses places d'entrée sont marquées, et elles sont franchies à leurs vitesses maximales. Le marquage des places  $P_1$  et  $P_2$  évolue suivant les équations suivantes :

$$m_1(t + dt) = m_1(t) + (V_1 - V_2) \cdot dt$$

$$m_2(t + dt) = m_2(t) + (V_2 - V_3) \cdot dt$$

$$\text{Puisque } M_0 = [20 \ 15]^T \Rightarrow \begin{cases} m_1(t) = 20 - t \\ m_2(t) = 15 - 2 \cdot t \end{cases}$$

### III.4.2. Le RdP continu à Vitesses Variables [DA92]

Dans ce modèle la vitesse maximale de franchissement d'une transition dépend du marquage des places en amont de la transition et d'une valeur constante associée à la transition.

Les marquages et les vitesses sont donc des fonctions continues du temps, alors que dans le RdP continu à vitesse constante cette propriété est vraie pour les marquages mais pas pour les vitesses qui sont simplement constantes par morceaux. Ce modèle fournit une meilleure approximation du RdP discret, en particulier lorsque le nombre de marques est petit, mais les simulations sont plus longues. Ici, le comportement événementiel est perdu, il faut discrétiser le temps pour faire une simulation.

### **III.4.3. Le RdP continu Asymptotique [Gho12]**

Il est possible de distinguer plusieurs phases d'évolution du marquage. Chaque phase est caractérisée par une période durant laquelle le vecteur des vitesses de franchissement est constant. La vitesse de franchissement d'une transition est alors constante par morceaux, et l'évolution du marquage est donc composée de plusieurs phases de fonctionnement. Il s'agit de l'approximation du RdP Continu à Vitesses Variables, mais la simulation est facilitée.

### **III.4.4. Le RdP continu à Vitesses Fonction du Temps [Gho12]**

Cette extension des RdP continus temporisés permet de prendre en compte l'environnement du système modélisé comme par exemple la fluctuation de l'approvisionnement d'un atelier ou l'influence d'une commande extérieure. La vitesse maximale de franchissement d'une transition est soit une fonction continue du temps, soit une fonction constante par morceaux.

### **III.4.5. Les RdP continus temporisés [DA 87]**

Dans ce qui suit, tous les RdP temporisés fonctionnent à vitesse maximale, et chaque transition possède une place de réentrance qui interdit deux franchissements simultanés de la même transition.

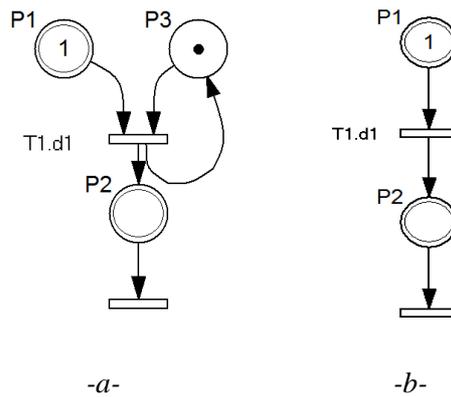


Figure III.9: RdP T-temporisé, -a- Modélisation explicite,  
-b- Modélisation implicite (limitation implicite)

### III.5. Les réseaux de Pétri hybrides [Gho12]

Un RdP hybride (RdPH) est un modèle combinant un RdP discret et un autre continu, aucune condition n'est imposée sur la nature des RdP discret et continu, en effet ces derniers peuvent être de n'importe quelle nature. Toutefois le modèle RdPH de base combine un RdPCC et un RdP discret T-temporisé, et c'est le modèle défini comme suit.

#### Définition

Un RdP hybride est une structure  $PN_H = (P, T, h, E, \Sigma, Pré, Post, Tempo, V, M_0)$ , tel que:

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble de n places,  $P = P^C \cup P^D$  avec :
  - $P^C = \{P_1, P_2, \dots, P_{n_C}\}$  est l'ensemble fini de places continues (ou C-places)
  - $P^D = \{P_{n_C+1}, \dots, P_n\}$  est l'ensemble fini de places discrètes (ou D-places)
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble de m transitions,  $T = T^C \cup T^D$  avec :
  - $T^C = \{T_1, T_2, \dots, T_{m_C}\}$  est l'ensemble fini de transitions continues (ou C-transitions)
  - $T^D = \{T_{m_C+1}, \dots, T_m\}$  est l'ensemble fini de transitions discrètes (ou D-transitions)
- $h : P \cup T \rightarrow \{D, C\}$  est une application qui désigne les nœuds discrets,  $h(x) = D$ , et les nœuds continus,  $h(x) = C$
- $E$  est un ensemble fini d'événements
- $\Sigma : T^D \rightarrow E$  est une fonction qui associe à chaque transition discrète un événement de  $E$
- $Pré$  et  $Post$  désignent respectivement les applications d'incidence avant et arrière ;

Ces applications doivent satisfaire la condition suivante :

$$\forall (P_i, T_j) \in P^D \times T^C : Pré(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$$

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

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

**Notation :**

Un RdP hybride contient des places et des transitions discrètes (D-places et D-transitions), et des places et des transitions continues (C-places et C-transitions).

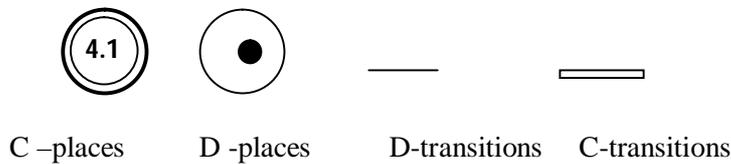


Figure III.10: Nœuds d'un RdP hybride

**Exemple d'évolution d'un RdP hybride**

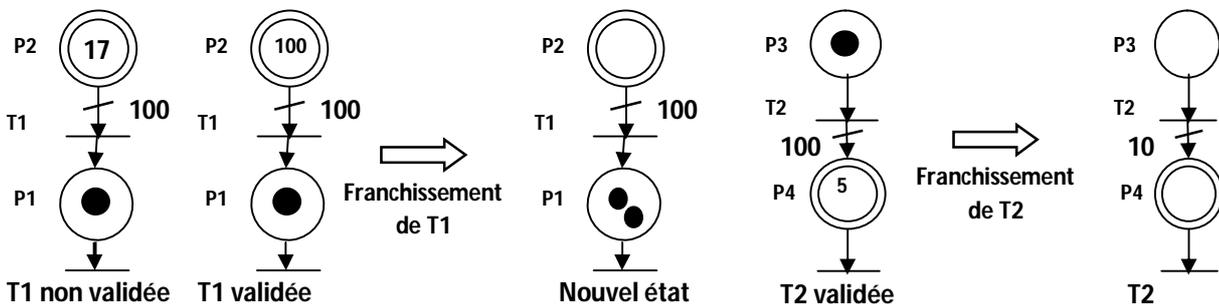


Figure III.11: Transformation de marques continues en m

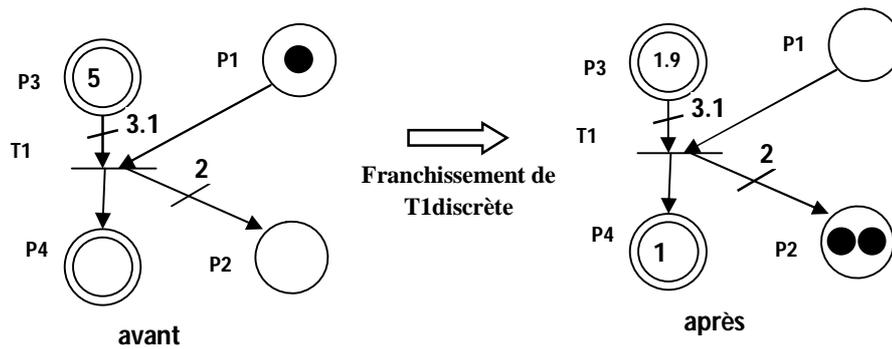


Figure III.12. Franchissement de transition discrète

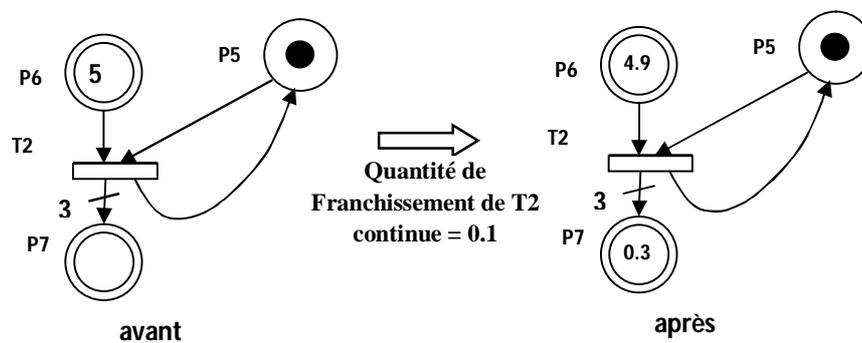


Figure III.13. Franchissement de transition continue  
Marques discret

### III.5.1. Les réseaux de Petri hybrides élémentaire [Gh12]

C'est un RdP hybride tel que pour toute paire  $(P_i, T_j)$  telle que  $P_i$  est une C-place et  $T_j$  est une D-transition, la relation  $Pré(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$  est vérifiée. Il n'y a aucune transformation de marques lors de l'évolution du réseau. C'est un système complètement découplé.

### III.5.2. IB-état d'un réseau de Pétri hybrides [Gh12]

Un IB-état d'un RdPH est un intervalle de temps pendant lequel :

- Le marquage des D-places est constant
- Les dérivés des marquages des C-places sont constants

Le comportement d'un RdPH est généralement modélisé par un graphe d'évolution dont les nœuds représentent les IB-états et les arcs sont étiquetés par les événements (dont

l'occurrence fait changer d'IB-état) avec leurs dates d'occurrence. Le graphe d'évolution du RdPH élémentaire IB-états comme présenté en *figure III.14*.

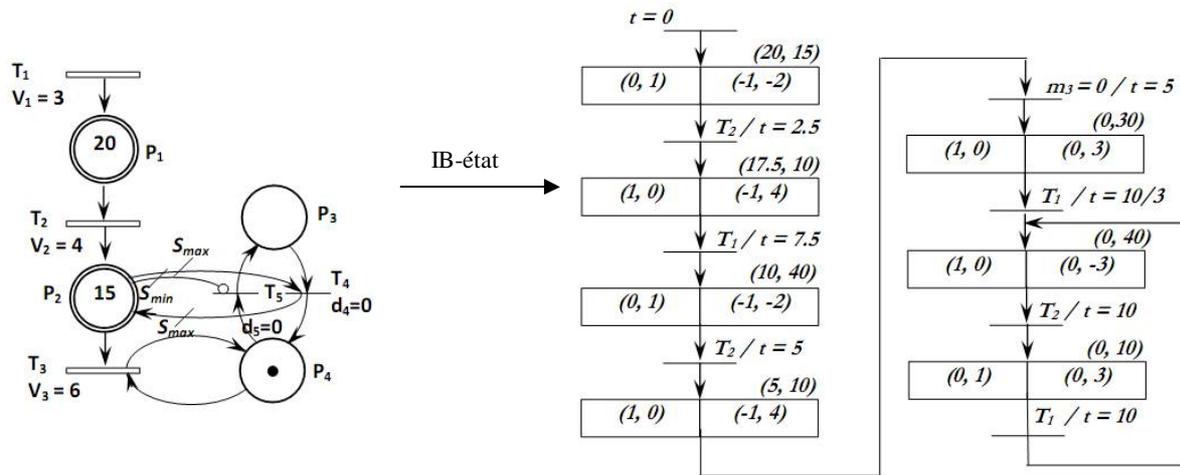


Figure III.14: Graphe d'évolution du RdPH élémentaire

### III.5.3. Les réseaux de Pétri hybrides D-élémentaires [Gho12]

Les RdPH D-élémentaires est la combinaison d'un RdP continu et d'un RdP T-temporel. Le fait que la partie discrète est représentée par un RdP T-temporel confère au modèle hybride un comportement non-déterministe. Rappelons que, pour un RdP T-temporel, les dates de franchissement des transitions ne sont pas déterministes mais prises dans des intervalles de franchissement.

De plus dans un RdPH D-élémentaire la partie discrète évolue de manière indépendante par rapport à la partie continue qu'elle contrôle.

#### Définition

Un RdP hybride D-élémentaire est une structure

$$PN_{HD} = (P, T, h, E, \Sigma, Pre, Post, U, V, M_0).$$

Les définitions des paramètres  $P, T, h, E, \Sigma, V, M_0$ , sont identiques à celles du RdP hybride et :

- $Pre$  et  $Post$  sont les applications d'incidence avant et arrière. Ces applications sont telles que :

$$\forall (P_i, T_j) \in P^C \times T^D, Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j) = 0 \quad (1)$$

$$\text{et } \forall (P_i, T_j) \in P^D \times T^C, Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j) \quad (2)$$

➤  $U: T^D \rightarrow R^+ \times (R^+ \cup \{\infty\})$  associée à chaque D-transition  $T_j$  son intervalle de franchissement  $[\alpha_j, \beta_j]$ .

Les conditions (1) et (2) sur les applications d'incidence avant et arrière signifient qu'aucun arc ne relie une place continue à une transition discrète. Et si un arc relie une place discrète  $P_i$  à une transition continue  $T_j$ , l'arc connectant  $T_j$  à  $P_i$  doit exister. Ceci apparaît graphiquement comme des boucles connectant des places discrètes à des transitions continues. Physiquement ceci signifie que le RdP discret évolue indépendamment du RdP continu, mais contrôle l'évolution de ce dernier.

**Exemple :**

Reprenons le système de bacs représenté dans la *figure III.8.a*. Ce système est modélisé par le RdPH D-élémentaire en *figure III.15.b*, avec les hypothèses nouvelles suivantes: A partir de l'instant où on décide de changer la position de la vanne, cette opération prend 3 unités de temps, les débits des Vanne 1, Vanne 2 et Vanne 3 sont respectivement de 8, 7 et 5 litres/secondes. La partie discrète du RdPH D-élémentaire modélise l'état de la vanne 1. Les D-transitions  $T_5$  et  $T_6$  modélisent le changement de position de la vanne, et les D-places  $P_3$  et  $P_4$  commandent le franchissement des C-transitions  $T_1$  et  $T_3$  respectivement.

Comme un RdPH D-élémentaire combine un RdP discret et un RdP continu, son état à l'instant  $t$  est donné par l'état des deux sous-modèles. Le couplage fort entre des RdP discret et continu rend difficile l'analyse du modèle hybride. Sa traduction en automate hybride permet de combiner la puissance de modélisation des RdP discrets à la puissance d'analyse des automates hybrides.

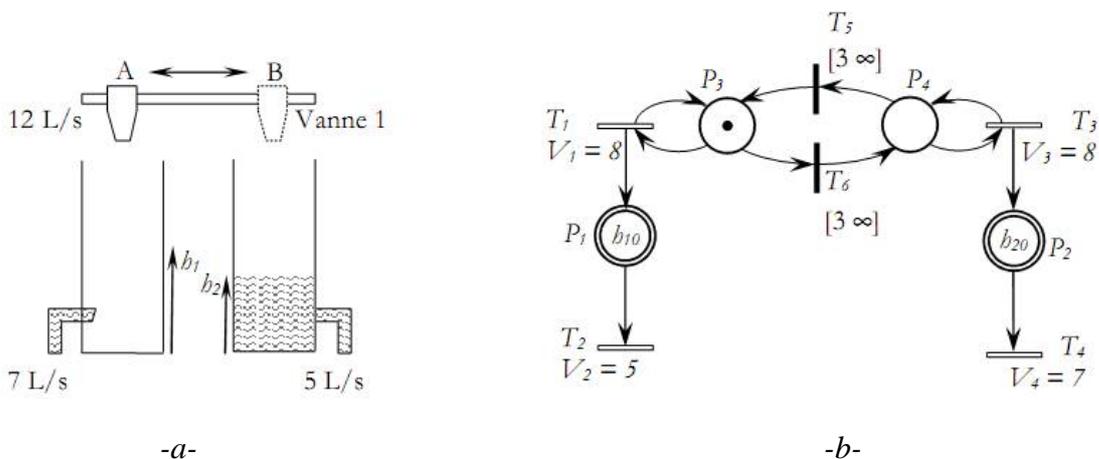


Figure III.15. a. Système de bacs, b. RdPH D-élémentaire modélisant le système de bacs

### III.6. Les Réseaux de Petri de haut niveau [Dho05]

Dans certains cas, les RdP autonomes et même les RdP temporisés s'avèrent limités dès la phase de modélisation. On fait alors appel aux réseaux dits de haut niveau. Ils présentent un outil de modélisation privilégié, susceptible de résoudre aussi bien les problèmes de spécification, validation ou analyse des systèmes. Dans un réseau de haut niveau, le marquage est défini comme une expression d'un langage de premier ordre. De plus, une distinction est faite entre les différents jetons dans une même place (le marquage est un multi-ensemble).

Citons l'exemple de la modélisation des procédés de fabrication où la conformité d'une unité fabriquée dépend essentiellement de la valeur du poids qui doit être comprise entre un minimum et un maximum. Ce type de contrainte ne peut être spécifié par les RdP de bas niveau.

#### Définition:

Un RdP de haut niveau est une structure  $(S, T, C, F, Pré, Post, M_0)$

Avec :

- $S$  est un ensemble fini de places
- $T$  est un ensemble fini de transitions :  $S \cap T = \emptyset$
- $C$  est un ensemble non vide de déclarations
- $F : S \cup T \rightarrow C$  est une fonction qui détermine chaque type de place et chaque mode de transition.

Mode d'une Transition : c'est l'assignation de valeurs pour les variables associées à la transition de telle façon que la condition de franchissement soit satisfaite.

Type de Place : c'est un ensemble non vide d'éléments associés à une place. Cet ensemble décrit une structure complexe et arbitraire.

- $Pré, Post : Trans \rightarrow \mu Place$  sont
 
$$Tran = \{(t, m) / t \in T, m \in C(t)\}$$

$$Place = \{(s, g) / s \in S, g \in C(s)\}$$
- $M_0 \in \mu Place$  est un multi-ensemble nommé marquage initial.

#### III.6.1. Les RdP de Hauts niveau à Marquages Abstraits (RdPHMA) [Dho05]

Dans un RdP de haut niveau, un jeton a une couleur bien définie dont la valeur appartient à un ensemble fini. Nous allons maintenant utiliser le concept d'abstraction pour la couleur des jetons.

Un RdP de haut niveau contenant un marquage à couleur partielle sera appelé un RdP de haut niveau à marquage abstrait.

### Définition

Un marquage à couleur partielle dans un RdP de haut-niveau est un couple  $(M, \psi)$  où :

- $M$  est une application qui associe à chaque place une somme de jetons dont la couleur est un  $n$ - symbolique potentiellement non close.
- $\psi$  est une formule satisfaisable
- $M$  et  $\psi$ , n'ont aucune variable en commun avec les annotations du Réseau

## III.6. Les RdP à Intervalles [COL 03]

Les RdP à intervalles ont été introduits pour étendre le champ d'application des RdP P-temporels par une abstraction fonctionnelle sur le paramètre associé aux places [COL 03]. Il serait donc logique de retrouver rigoureusement la même définition mathématique de l'outil. Cependant, la restriction des intervalles associés aux places à des rationnels positifs se justifie quand la signification du paramètre associé est une durée. Par contre, elle n'a plus de raison d'être pour une variation d'un poids ou d'une position par exemple qui peut bien évidemment être positive ou négative.

### Définition:

Un RdP à intervalles est un tuple  $\langle R, m, IS, D, Val, Val_0, X, X_0 \rangle$  dans lequel :

- $R$  est un RdP non marqué,
- $m$  une application qui affecte un marquage au réseau telle que :

Soit  $Va$  un ensemble de variables à valeur dans  $Q$ .

Soit  $V$  un ensemble non vide de formules utilisant des variables de  $Va$ .

Soit  $\mu V$  un multi ensemble défini sur l'ensemble  $V$ .

$$m : P \rightarrow \mu V$$

$$p \in P \rightarrow m(p)$$

Où  $m(p)$  est le marquage d'une place.

On note  $M$  l'application qui à chaque place associe le cardinal de son marquage.

$M : P \rightarrow N$  (Ensemble des entiers positifs).

$$p \rightarrow card(m(p))$$

- $IS : P \rightarrow Q \cup \{-\infty, +\infty\} \times Q \cup \{-\infty, +\infty\}$  définit les intervalles associés aux places du réseau.

$$p_i \rightarrow IS_i = [a_i, b_i] \text{ avec } 0 \leq a_i \leq b_i$$

- $D$  est une application qui associe à chaque couple (place, marque) une valeur rationnelle  $q$  qui doit être inférieure au égale à  $b_i$ . Cette grandeur correspond à la modification de la valeur associée au jeton qui est intervenue sur la place  $p_i$ .

$$D: m(p) \times P \rightarrow Va$$

$$\forall i, 1 \leq i \leq n, n = \text{Card}(P)$$

$$\text{Soit } k \text{ un jeton, } k \in m(p_i)$$

$$k \rightarrow q_i \mid a_i \leq q_i \leq b_i$$

Où  $a_i, b_i$  sont les valeurs rationnelles fixées par IS.

- $X$  est une application qui assigne à chaque variable une valeur.

$$X : Va \rightarrow Q$$

$$va \rightarrow u \in Q$$

En fixant une valeur à chaque variable,  $X$  fixe les  $q_i$ .

- $X_0$  définit les valeurs initiales des variables.
- $Val$  associe à chaque jeton une formule à valeur dans  $Q$  dont la signification physique est volontairement non définie.

$Val$  est une application de l'ensemble des marques  $m(P)$  dans  $V$  :

$$m(P) \rightarrow V$$

$$(k \in m(p)) \rightarrow v \in V$$

Où  $k$  est une marque.

- $Val_0$  définit les formules initiales associées aux jetons

Une marque  $k$  dans la place  $P_i$  participe à la validation de ses transitions de sortie seulement si  $q_i(k)$  a acquis la valeur minimale  $a_i$  de cette place. Elle doit quitter la place  $P_i$ , au plus tard quand  $q_i(k)$  atteint la valeur maximale  $b_i$ . Dans le cas contraire, nous disons que la marque devient morte, après le franchissement d'une transition, des jetons sont générés dans les places de sorties et leurs variables associées sont égales à :

$$Val(k) + qi(k).$$

Les significations physiques des paramètres  $q$  et  $Val(k)$  sont volontairement non définies. On introduit ainsi une abstraction fonctionnelle.

Bien plus, si nous envisageons l'existence d'une relation entre l'évolution des variables associées aux couples (place, jeton), nous ne la fixons pas dans la définition du modèle. Par exemple, dans les RdP p-temporels, nous trouvons la relation :

$$\forall q, dq/dt = 1$$

Où  $t$  est le temps.

Dans un RdP à intervalles l'application  $X$  n'est pas mathématiquement imposée.

### III.6.1. Définition d'un état [DHO 05b]

L'état est défini par un quadruplet  $E = \langle m, D, Val, X \rangle$

Où :

- $m$  affecte un marquage au réseau,
- $D$  et  $X$  s'associent pour assigner à chaque marque  $k$  dans la place  $p_i$  un nombre rationnel  $q_i(k)$ .

Le  $q_i(k)$  associé à une marque  $k$  dans la place  $p_i$  doit être inférieur ou égal à  $b_i$  où  $[a_i, b_i]$  est l'intervalle statique associé à la place  $P_i$ . La marque  $k$  dans la place  $P_i$  peut participer à la validation de ses transitions de sortie quand sa valeur est supérieure ou égale à  $a_i$ . Elle meurt quand sa valeur associée devient supérieure à  $b_i$ .

$Val$  associe une utilisant des variables rationnelles à chaque jeton. La valeur effective de ces variables formule rentre dans la définition de l'état (c'est  $X$  qui les fixe indirectement).

La fixation de valeur est donc possible quand l'évolution des variables associées aux couples (place, jeton) est parfaitement définie. Dans le cas contraire, il existe cependant une possibilité de faire évoluer le modèle et d'en extraire des propriétés. Une abstraction mathématique pourra être utilisée.

#### Définition

Une abstraction sur un ensemble de la forme  $\{x: A \bullet \psi\}$  est interprétée comme l'ensemble des valeurs du domaine associé à la formule  $A$  dont l'équation à  $x$  satisfait la formule  $\psi$ .

Nous spécifions donc les paramètres associés au jeton, sans que l'application  $X$  soit définie :

- $A = \sum q_j$ , Où l'indice  $j$  définit la suite des places en entrées des transitions successivement tirées pour amener à la création du jeton  $x = \{q_j\}$
- $\psi = \prod (a_j \geq q_i) \wedge (q_j \leq b_i)$

De cette façon, les conditions mathématiques pour le franchissement seront considérées, sans que les valeurs définitives des  $q$  ne soient fixées. Cette dernière technique sera particulièrement utile pour faire de la spécification.

### III.6.2. Calcul de l'état suivant [DHO 05b]

D'après la notion d'état nous constatons qu'un nombre infini d'états peut être atteint à partir d'un état donné. Il existe deux possibilités pour avoir un nouvel état à partir d'un état donné, l'évolution des variables associées et le franchissement d'une transition franchissable. Les deux définitions qui suivent donnent l'état suivant pour chacune de ces deux évolutions.

#### Définition

L'état  $E'(m', D', Val', X')$  est un état accessible à partir de l'état  $E(m, D, Val, X)$  par évolution des variables associées si et seulement si :

- 1-  $m' = m$

- 2-  $\forall j$  une marque dans la place  $p_i$ :

$$q'_i(j) = q_i(j) + \Delta q_i(j), \quad a_i \leq q'_i(j) \leq b_i$$

Où  $a_i$  et  $b_i$  sont les valeurs associées minimum et maximum dans la place  $p_i$ .

#### Définition

L'état  $E'(m', D', Val', X')$  est un état atteignable depuis l'état  $E(m, D, Val, X)$  par le franchissement d'une transition  $t_i$  si et seulement si :

- 1-  $t_i$  est franchissable à partir de  $E$

- 2-  $\forall p \in P, m'(p) = m(p) - Pré(p, t_i) + Post(p, t_i)$

- 3- Les marques qui restent dans la même place, gardent la même valeur associée dans  $E$  et  $E'$ .

Les marques qui sont créées prennent la valeur zéro pour le compteur  $q$  associé à leurs nouvelles places d'accueil, la valeur associée au jeton  $k'$  par  $Val$  est :

$$Val(k') = Val(k) + q(k)$$

Où  $k$  est un jeton qui était dans une place  $p_j$  d'entrée de  $t_i$  et qui a été utilisé pour le tir de  $t_i$ .

La règle de tir précédente permet de calculer les états et les relations d'accessibilité entre eux.

L'ensemble des séquences de tir réalisables depuis l'état initial caractérise le comportement du RdP de la même manière que l'ensemble des marquages accessibles ou les séquences de tir réalisables pour les RdP autonomes.

### III.9.3. Structures de fonctionnement

**Théorème :** un RdP à intervalles dont l'application assignant une valeur aux compteurs locaux n'est pas définie peut être modélisé par un RdPHNMA [COL03].

Procédure de modélisation :

Nous considérerons trois structures de bases.

La séquence peut être modélisée par une variable libre associée à l'arc d'entrée d'une transition.

La contrainte sur la valeur ajoutée pour le franchissement de la transition est introduite sur la garde de la transition par une double inégalité de la forme :  $a \leq q \leq b$

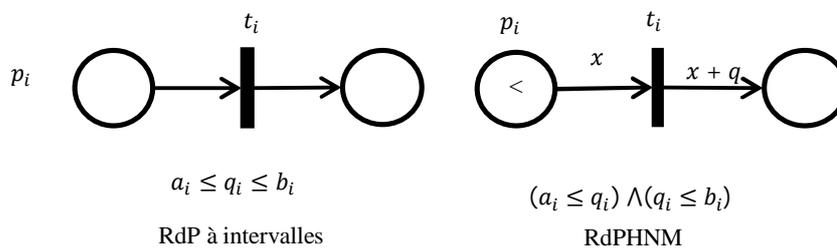


Figure III.16. Modèles équivalents

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents outils de modélisation des systèmes à événement discret. Nous avons vu les différents types de réseaux de Petri : discret qui est le formalisme de base, ensuite nous avons fait une synthèse rapide des RdP temporisés, temporels, continus, hybrides, et enfin nous avons décrits brièvement les réseaux de Petri à intervalle que nous avons utilisé dans notre étude pour modéliser le système manufacturier.

# ***Chapitre IV***

*LOGIQUE FLOUE*

## Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons succinctement les contrôleurs flous. Nous commençons par les principes de base de la logique floue et plus précisément les valeurs floues adaptées à l'aspect culinaire de l'être humain. Puis, nous allons voir la logique floue type-2, où son concept nous a rapprochés au système reconfigurable. Et finalement logique floue TAKAGI SEGENO pour une sortie constante ajustée convenablement à notre étude.

Puisqu'il s'agit de produit alimentaire, la logique floue est plus proche aux traditions culinaires et aux consommations des humains où les variables et les valeurs de discussion sont plutôt linguistiques et basée sur l'appréciation approximatives des paramètres culinaires du produit alimentaire.

### IV.1. Concept d'ensemble flou [WN15]

La théorie de la logique floue est basée sur des ensembles flous qui sont une extension naturelle de la théorie des ensembles classiques. Un ensemble pointu (également appelé ensemble crisp) est défini par une fonction de vérité bivalente qui n'accepte que les valeurs 0 et 1, ce qui signifie qu'un élément appartient entièrement ou pas du tout à un ensemble, alors qu'un ensemble flou est déterminé par la fonction de membre qui accepte toutes les valeurs intermédiaires comprises entre 0 et 1.

#### Définition .1.

Un ensemble flou est construit à partir d'un ensemble de référence appelé univers du discours. L'ensemble de référence n'est jamais flou. Supposons que  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  est l'univers de discours, puis un ensemble flou  $A$  dans  $U$  ( $A \subset U$ ) est défini comme un ensemble de paires ordonnées

$$\{(x_i, \mu_A(x_i))\}$$

Où  $x_i \in U$ ,  $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$  est la fonction d'appartenance de  $A$  et  $\mu_A(x) \in [0, 1]$  Est le degré d'appartenance de  $x$  à  $A$ .

#### Exemple

Considérons l'univers de discours  $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Puis un ensemble flou  $A$  la notion de «grand nombre» peut être représenté comme

$$A = \{(1, 0), (2, 0), (3, 0.2), (4, 0.5), (5, 0.8), (6, 1)\}$$

Avec l'univers considéré, les nombres 1 et 2 ne sont pas des «grands nombres», c'est-à-dire que le nombre de membres est égal à 0. Les numéros 3 à 5 appartiennent en partie au concept numéro avec un degré de membre de 0.2, 0.5 et 0.8. Enfin le numéro 6 est un grand numéro avec un statut de membre à part entière.

Il est important de noter que la définition des degrés de membre est subjective et dépendant du contexte, ce qui signifie que chaque personne a sa propre perception de la notion de «grand nombre» et que l'interprétation dépend de l'univers de discours et le contexte dans lequel l'ensemble flou est utilisé. Dans l'exemple précédant, par exemple, les degrés d'appartenance des éléments seraient très différents si l'univers de discours contenait des nombres allant jusqu'à 100 voire même 1000. De la même manière, le concept «Grand profit» aurait une signification distincte pour une petite et une grande entreprise. Les ensembles flous sont généralement représentés par une fonction d'appartenance. En fonction, dépendamment sur l'ensemble de référence, les fonctions d'appartenance sont discrètes ou continues. La Figure.IV.1 montre la fonction de vérité d'un ensemble pointu par rapport à la composition fonctions d'un ensemble flou et d'un flou continu. En général, plusieurs ensembles flous sont définis sur le même ensemble de références, formant ainsi un ensemble flou. Partition de l'univers. Une expression linguistique du langage naturel peut étiqueter les ensembles flous pour exprimer leur sémantique. Dans le cas de l'exemple donnez, l'ensemble de référence peut contenir les concepts de «jeune», «d'âge moyen» et «vieux» au même moment. Temps permettant une transition continue entre eux (voir Figure. IV.1). Cette construction est essentielle dans la théorie de la logique floue et est appelée une variable linguistique. Une linguistique variable est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases au lieu de valeurs numériques [134, 135, 136]. Ces valeurs sont appelées termes (également linguistiques ou verbaux) et sont représentés par des ensembles flous.

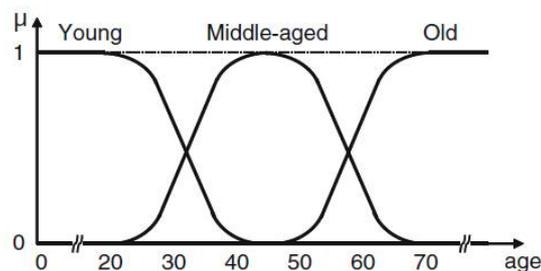


Figure. IV.1. Partition floue du jeu de références avec les jeux flous étiquetés

### Définition .2.

Une variable linguistique est caractérisée par un quintuple

$$(X, T, U, G, M)$$

Où  $X$  est le nom de la variable,  $T$  est l'ensemble des termes de  $X$ ,  $U$  est l'univers du discours,  $G$  est une règle syntaxique pour générer le nom des termes et  $M$  est un règle sémantique pour associer chaque terme à sa signification, c'est-à-dire un ensemble flou défini sur  $U$  [134, 135, 136].

### Exemple

La variable linguistique représentée à la Figure. IV.1 est définie par le quintuple  $(X, T, U, G, M)$

Où  $X$  est *l'âge*,  $T$  est l'ensemble  $\{jeune, d'âge\ moyen, vieux\}$  généré par  $G$  et  $M$  spécifie pour chaque terme un ensemble flou correspondant sur le univers  $U = [0, 100]$ .

La possibilité de donner une appartenance partielle aux éléments permet une continuité transition entre les ensembles flous au lieu d'avoir des limites nettement définies. Par ici, il est possible de mieux refléter la réalité où tout n'est pas noir ou blanc mais souvent différenciée par les valeurs de gris. La définition d'un ensemble flou peut donc convenablement exprimer la subjectivité et l'imprécision de la pensée humaine. En outre, le concept de variable linguistique est la base pour représenter le savoir humain dans le cadre de règles ou de requêtes orientées vers l'homme pouvant être traitées par des ordinateurs.

## IV.2. Propriétés des ensembles flous [WN15]

La théorie des ensembles flous étant une extension de la théorie des ensembles classique, les ensembles nets sont un cas spécifiques des ensembles flous. Pour cette raison, les propriétés existantes des ensembles classiques doivent être étendues et de nouvelles propriétés sont introduites. Parmi les étendues les propriétés des ensembles classiques sont les définitions de vide, d'égalité, d'inclusion et cardinalité. Afin de tenir compte de la portée plus large des ensembles flous, la définition de convexité, support, coupe  $\alpha$ , noyau, largeur, hauteur et normalisation ont été introduites. Un ensemble flou est considéré comme vide si les degrés d'appartenance de tous les éléments de l'univers sont égaux à zéro.

### Définition .1.

Un ensemble flou  $A$ , défini sur un ensemble de référence  $U$ , est vide

$$si A = \mu_A(x) = 0, \forall x \in U$$

Deux ensembles flous sont égaux si leurs diplômes de membre sont égaux pour tous les éléments c'est-à-dire si les deux ensembles flous ont la même fonction d'appartenance.

**Définition .2.**

Deux ensembles flous  $A$  et  $B$  définis sur un ensemble de référence  $U$  sont égaux si

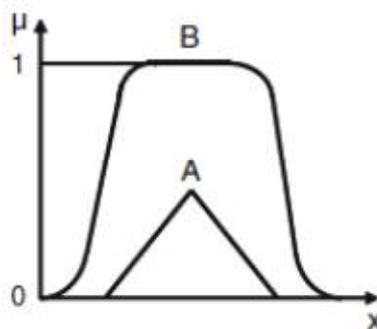
$$A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x), \quad x \in U$$

Un ensemble flou  $A$  est inclus dans un ensemble flou  $B$  si les degrés d'appartenance de  $A$  sont plus petit ou égal aux degrés d'appartenance de  $B$  pour tous les éléments de l'univers (voir *Figure. IV.2.*).

**Définition .3.**

Soit  $A$  et  $B$  deux ensembles flous définis sur un ensemble de référence  $U$ ,  $A$  étant inclus dans  $B$  si  $A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x), x \in U$

La cardinalité d'un ensemble croustillant est égale au nombre d'éléments qu'il contient. Dans un flou définir les éléments peut avoir une appartenance partielle, donc la cardinalité est la somme des degrés d'appartenance des éléments de l'ensemble de référence. Si le jeu de références est infini, *Figure IV.2* inclusion du ensemble flou  $A$  dans l'ensemble flou  $B$  une intégrale sur l'univers est utilisée à la place de l'addition. Il est également possible de dériver la cardinalité relative d'un ensemble flou en divisant la cardinalité du flou fixé par la cardinalité de l'univers. La cardinalité relative permet aux ensembles flous d'être comparés s'ils sont basés sur le même univers.



*Figure. IV.2. Inclusion de l'ensemble flou  $A$  dans l'ensemble flou  $B$*

**Définition.4.**

La cardinalité et la cardinalité relative d'un ensemble flou  $A$ , définies sur un univers fini  $U$ , sont définis comme

$$Card(A) = |A| = \sum_{x \in U} \mu_A(x)$$

$$RelCard(A) = \|A\| = \frac{|A|}{|U|}$$

**Exemple**

Considérons l'ensemble flou  $A$  de l'exemple précédant

$$A = \{(1, 0), (2, 0), (3, 0,2), (4, 0,5), (5, 0,8), (6, 1)\}$$

Alors la cardinalité et la cardinalité relative de  $A$  sont

$$Carte(A) = 0 + 0 + 0,2 + 0,5 + 0,8 + 1 = 2,5$$

$$RelCard(A) = \frac{2,5}{6} \approx 0.417$$

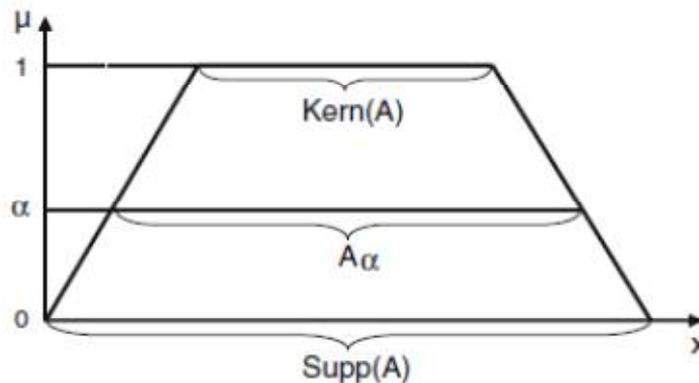


Figure IV.3. Support, coupe  $\alpha$  et noyau d'un ensemble flou

**Définition .5.**

Le noyau d'un ensemble flou  $A$  défini sur un ensemble de référence  $U$  est un sous-ensemble de  $U$  qui est conforme

$$Kern(A) = \{x \in U, \mu_A(x) = 1\}$$

La largeur d'un ensemble flou convexe est la longueur du support qui, dans le cas d'un ensemble flou convexe est un intervalle.

**Définition .6.**

La largeur d'un ensemble flou convexe  $A$  avec support  $Supp(A)$ , définie sur un ensemble de références bornées, est défini comme

$$Largeur(A) = \max(Supp(A)) - \min(Supp(A))$$

La hauteur d'un ensemble flou est le degré maximum d'appartenance de tous les éléments de l'univers.

**Définition .7.**

La hauteur d'un ensemble flou  $A$  défini sur un ensemble de références bornées  $U$  est définie comme

$$Hgt(A) = \max_{x \in U} (\mu_A(x))$$

Un ensemble flou est dit normalisé si au moins un élément de l'univers a un degré d'adhésion égal à 1.

**Définition.8.**

Un ensemble flou  $A$  défini sur un ensemble de référence  $U$  est normalisé si et seulement si

$$\exists x \in U, \mu_A(x) = Hgt(A) = 1$$

**IV.3. Théorie du contrôle flou [WN15]**

L'une des raisons pour lesquelles la communauté scientifique s'est intéressée à la théorie de la logique floue c'est le succès financier du contrôle flou des appareils électroménagers dans l'industrie japonaise. En 1990, le marché des produits de consommation utilisant des contrôleurs flous était estimé à 2 milliards de dollars. Il est intéressant de noter que L.A. Zadeh est un contributeur majeur de la théorie du contrôle moderne. La théorie du contrôle est une approche très précise et stricte afin de modéliser des systèmes ou des phénomènes. Comme tous les aspects du modèle doivent être spécifiés, la modélisation d'un système compliqué est une opération de grande envergure.

Par exemple, une application pourrait être utilisée pour prédire la trajectoire d'un ouragan, mais s'il doit être développé à partir de zéro, l'ouragan aura disparu avant que l'application soit prête à être utilisée. Dans la théorie du contrôle, le nombre de processus à implémenter augmente exponentiellement par rapport au nombre de variables définissant le système. Cette raison pour laquelle certains systèmes ne peuvent pas être modélisés, même par des ordinateurs à grande vitesse. Une solution à cette problématique est de définir grossièrement les systèmes à l'aide de la théorie de logique floue.

Le contrôle flou est basé sur le raisonnement approximatif qui offre une meilleure cadre réaliste pour le raisonnement humain que la logique à deux valeurs. Le principal avantage du contrôle flou par rapport à la théorie du contrôle classique est sa capacité en mettant en œuvre des connaissances expertes humaines, ses méthodes de modélage de systèmes non linéaires et un délai plus court pour le développement du marché, dans la théorie du contrôle, les systèmes sont

caractérisés par des variables d'entrée et de sortie ainsi que d'un ensemble de règles. Ces règles définissent le comportement du système. Le résultat des variables sont ensuite calculées par inférence en fonction des variables d'entrée et de la donnée règles. Une inférence est la construction «A implique B, B implique C puis A implique C». Quand la prémisse «X implique Y» est vraie alors Y est vrai si X est vrai et inversement X est faux si Y est faux. C'est ce qu'on appelle un syllogisme et un exemple célèbre est: implication: tous les hommes sont mortels  
prémisse: Socrate est un homme conclusion: Socrate est mortel dans la théorie du contrôle, les prémisses sont définies par des règles de la forme «If Then».

Zadeh a introduit en 1973 la règle de composition d'inférence. La théorie des ensembles flous qui étend le mécanisme d'inférence afin de prendre en compte le flou. Dans 1993, Fullér et Zimmermann ont démontré la propriété de stabilité de la conclusion en utilisant la règle de composition d'inférence qui stipule qu'une conclusion dépend en permanence sur les lieux lorsque la norme  $t$  définissant la composition et la fonction d'appartenance de la prémisse est continue. Cette propriété garantit que de petits changements dans la fonction d'appartenance de la prémisse, éventuellement en raison d'erreurs, ne peut impliquer qu'un petit écart dans la conclusion. Les règles floues peuvent ensuite être exprimées en langage naturel par l'utilisation de variables linguistique. Exemple d'inférence floue de Zadeh où les conditions sont exprimées au moyen de mots est une implication: Si une tomate est rouge, elle est mûre, prémisse: cette tomate est très rouge, Conclusion: cette tomate est très mûre, ces mots permettent aux règles floues d'intégrer la sémantique de la connaissance humaine et peuvent être représentés comme des ensembles flous. Le processus d'évaluation du flou, l'inférence diffère également de la théorie du contrôle classique en ce sens que toutes les règles impliquant une variable de sortie donnée sont calculées simultanément et leurs résultats sont puis fusionnés afin de dériver la valeur de la variable de sortie. C'est un majeur avantage sur la théorie du contrôle classique car il implique un mécanisme de compensation entre les règles impliquées. En conséquence, un ensemble de règles beaucoup plus réduit est nécessaire pour modéliser un système comme les valeurs intermédiaires des variables d'entrée sont dynamiquement interpolées à partir des règles existantes. Cela implique également une tolérance de panne inhérente; considérer qu'une règle a été implémentée par erreur ou qu'un défaut matériel est renvoyé résultats erronés, la valeur de la variable de sortie peut être compensée par d'autres règles définir cette variable. De nombreuses applications concrètes utilisant le contrôle flou peuvent être trouvées. Le plus connu l'un est l'ouverture en 1988 d'un réseau de métro dans la ville de Sendai (Japon) utilisant le contrôle flou pour accélérer et freiner les trains plus en douceur qu'un conducteur. Par rapport au contrôle conventionnel, cette nouvelle approche a apporté des améliorations significatives dans les

domaines de la sécurité, du confort de conduite, de la précision de la butée, de la durée consommation d'énergie. On trouve d'autres applications concrètes dans le secteur domestique, tels que la machines à laver et aspirateurs, dans des systèmes visuels tels que caméras mise au point automatique et photocopieurs, dans des systèmes embarqués tels que le freinage antiblocage systèmes de transmission, le régulateur de vitesse et la climatisation.

#### IV.4. Logique flou type-2

Le concept d'un ensemble flou de type-2 a été introduit par le professeur Zadeh [LAZ75] en 1975. Un ensemble flou de type-2 est défini par les MF comme indiqué à la *Figure IV.4*. La note floue de ceci est un jeu flou dans l'intervalle fermé  $[0, 1]$  plutôt qu'un point dans  $[0, 1]$ . Un ensemble flou de type-2, noté comme  $\tilde{A}$ , est caractérisé par un type-2 MF  $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$

Où  $x \in X$  et  $u \in J_x \subseteq [0, 1]$ .

C'est-à-dire,

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\}$$

Où  $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$

A peut aussi être exprimé comme suit [MJ02]:

$$A = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_A(x, u) / (x, u) \quad J_x \in [0, 1]$$

Où  $\int$  désigne l'union de tous les  $x$  et  $u$  admissibles.  $J_x$  est appelé membre principal de  $x$ , où  $J_x \in [0, 1]$  pour  $\forall x \in X$  [MJ02]. Incertitude dans le primaire appartenant à un ensemble flou de type-2, se compose d'une région délimitée appelée l'empreinte d'incertitude (FOU). C'est l'union de tous membres primaires.

##### IV.4. 1. Contrôleurs floue (FLC) de type 2

Un FLC de type 2 comprend cinq composants, qui sont fuzzifier, base de connaissances (KB) composée de base de règles (RB) et base de données (DB), inférence floue moteur, réducteur de type et défuzzifiant tels que décrits dans *Figure. IV.4*.

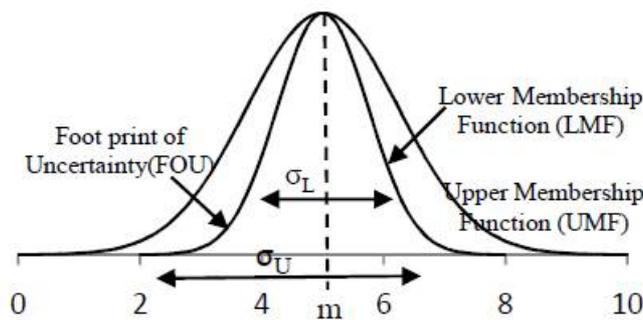


Figure. IV.4. Ensemble flou à intervalle gaussien de type 2, où  $\sigma_L$  et  $\sigma_u$  sont les largeurs résultantes minimale et maximale respectivement [MJ02]

### 1. Fuzzifier

Puisque l'entrée est dans des valeurs normalisées précises, l'opérateur de fuzzification est utilisé pour le fuzzifier dans forme floue. Le fuzzifier est un vecteur d'entrée net avec  $p$  entrées

$$x = (x_1, \dots, \dots, x_p)^T \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p \equiv X$$

Ensembles flous d'entrée,  $\tilde{A}_x$  [LK00] [JME01]. Cependant, nous utiliserons plus fréquemment la méthode de singleton pour la fuzzification car elle est rapide à calculer et donc est adapté au fonctionnement en temps réel. Dans la fuzzification singleton, l'ensemble flou  $\tilde{A}$  n'a qu'un seul point d'adhésion non nul avec support  $x_i$  où  $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$  pour  $x = x_i$  et  $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 0$  pour  $x \neq x_i$  ou mesure d'entrée  $x$  est parfaitement nette.

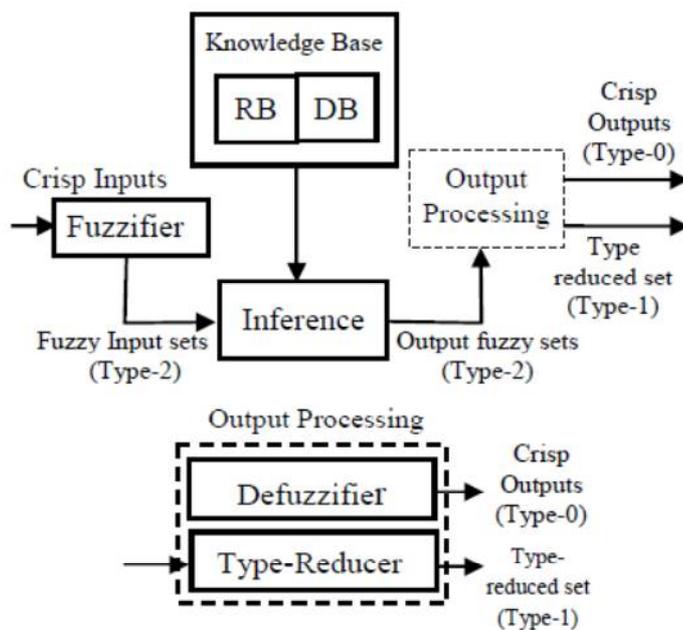


Figure .IV.5. FLC d'intervalle de type 2[MJ02]

## 2. Règles de base

Les règles resteront les mêmes que dans les FLC de type-1 mais les antécédents et les conséquences seront représentés par des ensembles flous de type-2 deux d'intervalle [JME01]. Comme la plupart des FLC [JCY00].

## 3. type de réduction

Les type de réduction c'est lorsqu'un intervalle des ensembles flous type-2 sont réduits à un type-1 à valeurs d'intervalle ensemble flou, puis ces types réduits ensembles sont défuzzifié pour obtenir des sorties nettes. Dans cet article, nous utilisons une réduction de type centroïde en raison de complexité de calcul. Pour le type centroïde processus de réduction, combine d'abord le type de sortie 2 ensembles flous utilisant l'union [JME01] (norme t minimale),

$$\tilde{B} = \bigcup_{l=1}^M \tilde{B}^l, \text{ comme :}$$

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \prod_{l=1}^M \mu_{\tilde{B}^l}(y) \quad \forall y \in Y$$

Où  $\mu_{\tilde{B}^l}(y)$  est la fonction d'appartenance secondaire pour la première règle et cela dépend de rejoindre et rencontrer opération. La réduction de type centroïde calcule le centroïde de  $\tilde{B}$ . Le type réduit en utilisant le La réduction de type centroïde peut être exprimée comme suit:

$$y_{c \rightarrow}^{(x)} = \frac{\int_{\theta_1 \in J_{y_1}} \int_{\theta_N \in J_{y_N}} [f_{y_1}(\theta_1) * \dots * f_{y_N}(\theta_N)] \frac{\sum_{i=1}^N y_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}}{\sum_{i=1}^N \theta_i}$$

Où  $i = 1, \dots, N$ . Pour calculer ce processus, au début  $y$  le domaine est discrétisé en  $N$  points puis  $J_{y_i}$  est discrétisé en  $T_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ) points. Nombre total des calculs est  $\prod_{i=1}^N T_i$ .

## 4. Defuzzification

Après l'étape de réduction de type, Defuzzify le tapez intervalle réduit set  $y_{c \rightarrow}^{(x)}$  déterminé par son a laissé le plus  $y_l$  et le plus à droite  $y_k$  en utilisant le moyenne de  $y_l$  et  $y_k$ .

$$\text{D'où le crisp défuzzifié la sortie est } Y_{\rightarrow}^{(x)} = \frac{y_l + y_r}{2}$$

## IV.5. Systèmes flous de modèles TAKAGI-SUGENO

Les systèmes flous de modèles Takagi-Sugeno (T-S) [TS85] sont devenus une méthode efficace pour représenter un système non linéaire par des ensembles flous et un raisonnement flou. Dans [ECT05] ont présenté certains aspects importants concernant l'analyse et la mise en

œuvre d'un modèle flou linéaire par morceaux (PWL) avec une capacité d'approximation universelle. Référence [SWK10] ont présenté une combinaison d'un modèle fuzzy de Sugeno et de réseaux de neurones. Dans [GELDKB10], nous avons présenté une nouvelle technique permettant de contrôler et de stabiliser un contrôleur de compensation distribuée parallèle (PDC) basé sur un modèle d'erreur de suivi en résolvant par les conditions LMI du modèle d'erreur de suivi.

Les systèmes flous ont été introduits pour la première fois par Zadeh. Le degré d'appartenance d'un ensemble flou de type 1 est une valeur nette, mais il est TFS dans les ensembles flous de type 2. Les chercheurs ont montré que T1FLS avait du mal à modéliser et à minimiser les effets des incertitudes [Zed75].

Dans [BMM10], les limites d'incertitude de WuMendel [WHM01] permettent de concevoir des systèmes de commande à logique floue TSK de type 2 à intervalle stable (IT2 TSK FLCS). Méthodes d'inférence proposées pour les FLCS IT2 TSK dans [MB01]. Dans [RQBB11], IT2 TSK FLS a analysé la sensibilité des sorties d'un système flou TSK de type 2 et discuté des capacités d'approximation de FLS TSK de type 2 et de son homologue de type 1. Dans [WT04], l'étude est conduite en utilisant un FLC de type 2, développé par un algorithme génétique (GA), pour contrôler un processus au niveau du liquide. L'algorithme proposé pour l'intervalle de type 2 TSK FLS a été utilisé dans la modélisation floue et la prévision de l'incertitude dans la fabrication de haute précision.

#### IV.4.1. Modèle flou Takagi-sugeno

Un modèle fuzzy T-S dynamique est décrit par un ensemble de règles fuzzy (si alors) avec des ensembles flous dans les antécédents et des systèmes dynamiques linéaires invariants dans les conséquences. Une règle générique de plante T-S peut être écrite comme suit [DAC95] :

$$IF x_1(t) \text{ est } M_{i1} \dots, x_n(t) \text{ est } M_{in} \text{ alors } \dot{x} = A_i x + B_i u,$$

Où  $x_{n \times 1}$  est le vecteur d'état,  $r$  le nombre de règles,  $M_{ij}$  sont des ensembles flous d'entrée,  $u_{m \times 1}$  est l'entrée et  $A_{n \times n}$ ,  $B_{n \times m}$  sont la matrice d'état et la matrice d'entrée, respectivement. En utilisant le fuzzifier singleton, l'inférence max-produit et le défuzzifier moyen, nous pouvons écrire le modèle flou agrégé comme suit:

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(x)(A_i x + B_i u)}{\sum_{i=1}^r w_i(x)}$$

Où  $w_i$  est défini par :

$$w_i(x) = \prod_{j=1}^n u_{ij}(x_j)$$

où  $u_{ij}$  est la fonction d'appartenance du  $j$ ème ensemble flou de la règle. Définir les coefficients  $\alpha_i$  comme suit :

$$\alpha_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^r w_i}$$

Et nous pouvons écrire:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \alpha_i(x)(A_i x + B_i u), i = 1, \dots, r \quad (1)$$

où  $\alpha_i > 0$  et  $\sum_{i=1}^r \alpha_i(x) = 1$ .

En utilisant la même méthode pour générer des règles fuzzy T-S pour le contrôleur, nous avons:

$$\text{si } x_1(t) \text{ est } M_1^i \text{ alors } u(t) = -K_i x(t), i = 1, \dots, r.$$

Sur tous les contrôleurs serait

$$u = -\sum_{i=1}^r \alpha_i(x) K_i x \quad (2)$$

En remplaçant (2) dans (1), nous obtenons l'équation suivante pour le système en boucle fermée:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \alpha_i(x) \alpha_j(x) (A_i x + B_i u) x$$

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les étapes de développement de la logique floue et les contrôleurs flous. En parallèle avec le développement des systèmes de production en général, pour cela nous avons choisi le contrôleur flou dans notre étude puisque, il répond mieux aux exigences des systèmes de production alimentaire.

# *Chapitre V*

*RESULTATS ET  
SIMULATION*

## Introduction

Pour la mise en valeur de notre travail, nous avons choisi un système de production alimentaire de chocolat.

Dans un premier temps, nous avons modélisé notre système de production par les réseaux de Petri à intervalle puis on a appliqué un contrôleur flou pour la pris de décision.

Deuxièmement nous avons développé notre modèle pour la minimisation des pertes de la matière première, ensuite on a appliqué un contrôleur flou type-2.

### V.1. Présentation du premier système

Pour faire du chocolat, il faut du lait, du cacao, de la matière grasse et des additifs pour le goût.

Les ingrédients doivent être dossés en pourcentage exact pour obtenir une certaine qualité recherchée. Pour cela, le système de production doit respecter minutieusement les différents dosages du lait, du cacao et des matières grasses. Nous avons choisi comme exemple le modèle de chocolat suivant:

Soit une tablette de longueur compris dans l'intervalle [177- 184 mm], d'une largeur de [56- 64 mm] et d'une épaisseur de [7.5- 8.5mm].

La quantité en lait exigé est de [71-72.8ml], la quantité en cacao exigé est de [32- 33.6g] et la quantité en matières grasse exigé est de [5-6g].

La densité de la patte exigée est dans l'intervalle [1-1.2g/cm<sup>3</sup>], ce qui nous donne un poids qui peut aller de 99.8 à 102g.

La tablette fabriquée doit être maintenu dans une température de -1° à -0.5°c, pendant une durée de 14 à 15 min. Après, la tablette est emballé et stocké pour la consommation.

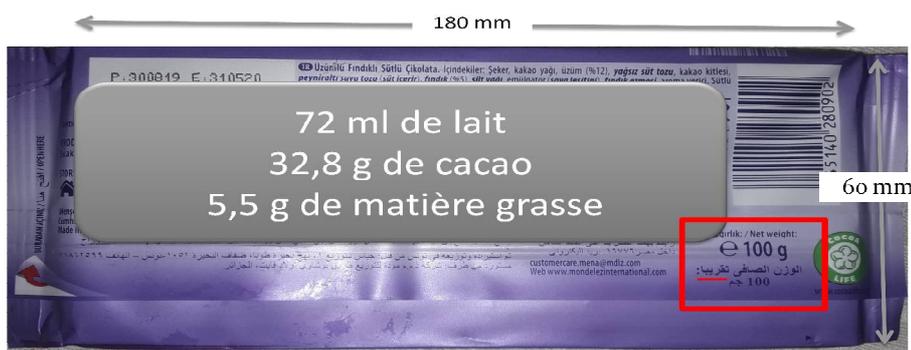




Figure. V.1. les dimensions et dosage de la tablette de chocolat

### V.1.1. Cahier de charge

Tableaux.1.Spécifications

Longueur	Lo min	177 mm
	Lo max	184 mm
largeur	La min	56 mm
	La max	64 mm
L'épaisseur	E min	7.5 mm
	E max	8.5 mm
lait	L min	71 ml
	L max	72.8 ml
Cacao	C min	32 g
	C max	33.6 g
Matière Grasse	M min	5 g
	M max	6 g
Densité	De min	1 g/cm <sup>3</sup>
	De max	1.2 g/cm <sup>3</sup>
poids	P min	99.8 g
	P max	102 g
Température	T min	-1 °
	T max	-0.5 °
Durée	D min	14 min
	D max	15 min

### V.1.2. Modélisation du procédé de fabrication par les RdP à intervalles [AGC15]

La place représentant la quantité de lait, nous l'avons appelé  $P_L$  (Figure. V.2.) est marquée ; ceci modélise la disponibilité de la matière première 'lait' est en cours de versement.

La transition  $T_1$  reste non franchissable jusque l'obtention de la quantité recherchée soit dans l'intervalle [71-72.8 ml] tant que cette quantité n'est pas atteinte la transition reste validée et ne peut pas être franchi. Lorsqu'on atteint la quantité voulue,  $T_1$  est franchi et permet le lancement de l'opération suivante modélisée par  $P_1$ . S'il y a un excès de cette quantité ( $> 72.8$ ), on dit que le jeton est mort, il n'est plus disponible pour la validation de  $T_1$ . Idem pour la suite du modèle.

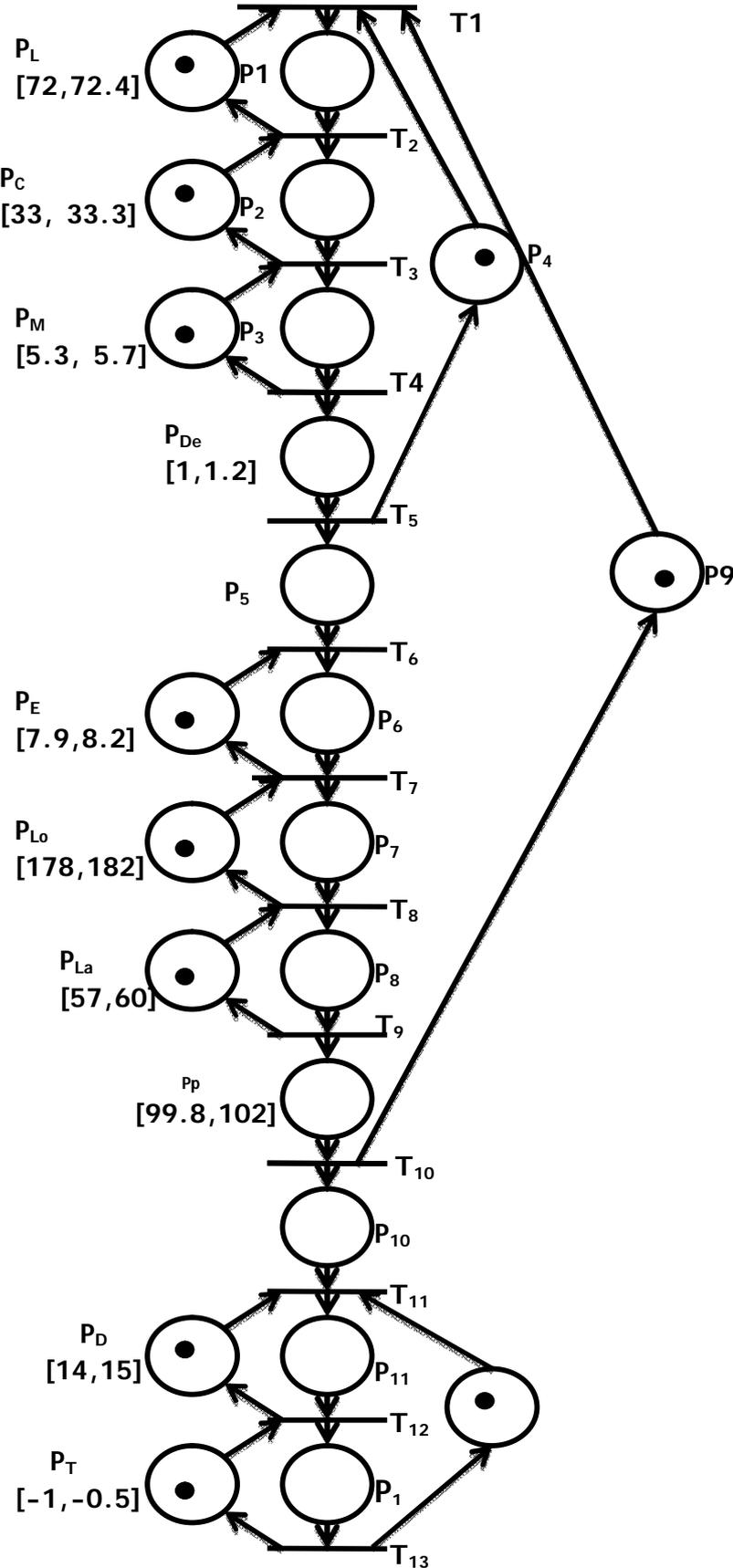


Figure. V.2.modèle du système de production

- $P_L$ : représente le contrôle de la quantité de lait  
 $P_1$ : la quantité de lait est comprise dans l'intervalle [71- 72.8]  
 $P_C$ : représente le contrôle de la quantité de cacao  
 $P_2$ : la quantité de cacao se situe entre l'intervalle [32- 32.6]  
 $P_M$ : représente le contrôle de la quantité de graisse  
 $P_3$ : la quantité de graisse est comprise dans l'intervalle [5- 6]  
 $P_{De}$ : représente le contrôle de la densité  
 $P_4$ : la densité est comprise dans l'intervalle [1-1.2]  
 $P_5$ : autorisation du prochain cycle de contrôle de la densité  
 $P_E$ : représente le contrôle de l'épaisseur  
 $P_6$ : l'épaisseur est comprise entre l'intervalle [7.5- 8.5]  
 $P_{Lo}$ : représente le contrôle de la longueur  
 $P_7$ : la longueur est comprise entre l'intervalle [177- 184]  
 $P_{La}$ : représente le contrôle de largeur  
 $P_8$ : la largeur est comprise entre l'intervalle [56- 64]  
 $P_p$ : représente le contrôle du poids  
 $P_9$ : le poids est compris dans l'intervalle [99.8- 102]  
 $P_{10}$ : autorisation du prochain cycle de production  
 $P_D$ : représente le contrôle de la durée  
 $P_{11}$ : la durée est comprise dans l'intervalle [14-15min]  
 $P_T$ : représente le contrôle de la température  
 $P_{12}$ : la température est comprise entre l'intervalle [-01 °- (-0.5 °)]  
 $P_{13}$ : autorisation du prochain cycle

### V.1.3.La prise de décision

Nous avons donc modélisé notre système par un réseau de Petri à intervalle et pour la prise de décision, nous avons choisi la logique floue en considérant son concept de base, car il ne raisonne pas sur un point de rupture entre deux classes mais sur un passage d'une classe à l'autre. Il est plutôt lisse et repose sur des intervalles et un coefficient d'appartenance non disjoints, ainsi que sur son adaptation au concept de réseau de Petri à intervalle.

Nous associerons un contrôleur flou pour chaque paramètre à contrôler (lait, cacao...).

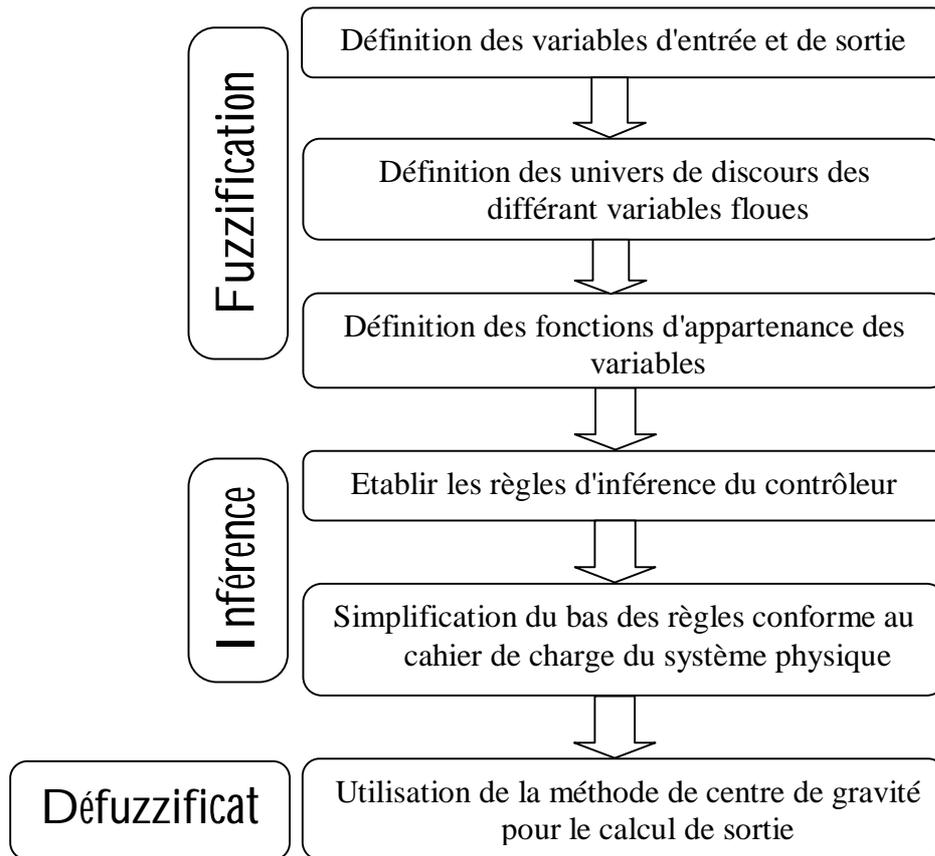


Figure. V.3.les étapes du contrôleur flou

### V.1.3.1. Les contrôleurs flous

Nous avons conçu deux contrôleurs flous [AGC15], le premier pour le contrôle de densité et le second pour le contrôle du poids en utilisant la toolbox Fuzzy de MATLAB version 2010.

#### 1. Pour le contrôle de densité :

##### **Fuzzification**

On a trois variables d'entrées : la quantité de lait, de cacao, de la matière grasse.

- Afin de représenter la quantité de lait on a trois valeurs floues:

La quantité de lait insuffisante de 70 à 72ml

La quantité de lait exacte de 71 à 72.8 ml

La quantité de lait grande de 72.4 à 80 ml

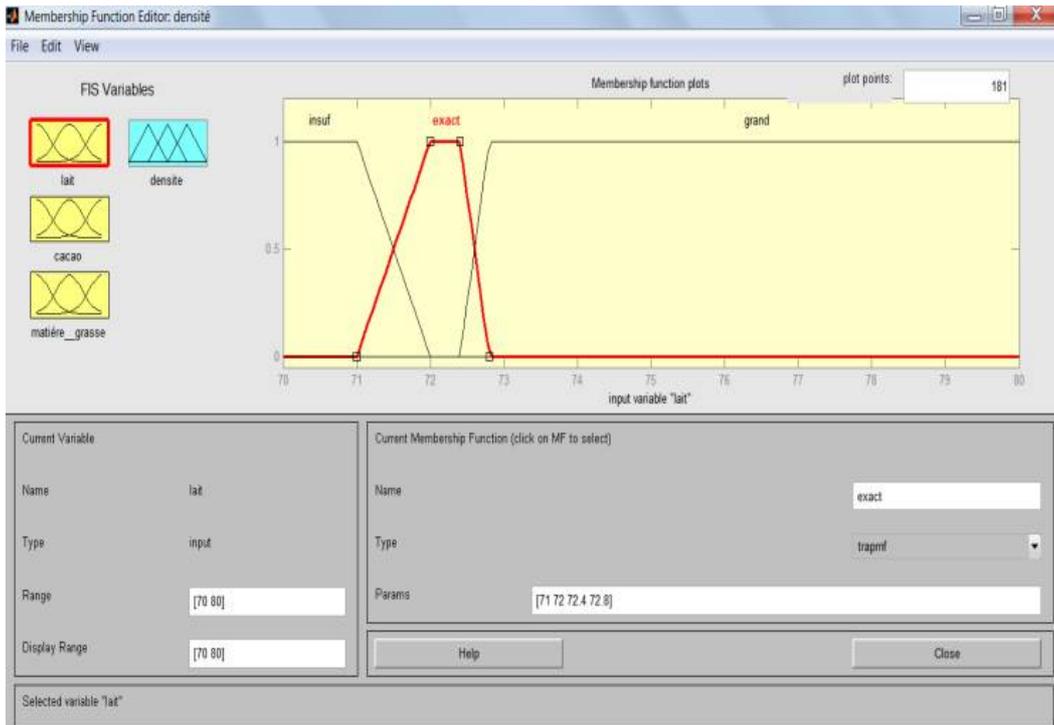


Figure. V.4. the quantité de lait

- On a trois valeurs floues pour représenter la quantité de cacao:

La quantité de cacao insuffisante de 30 à 33 g

La quantité de cacao exacte de 32 à 33.6 g

La quantité de cacao grande de 33.4 à 40 g

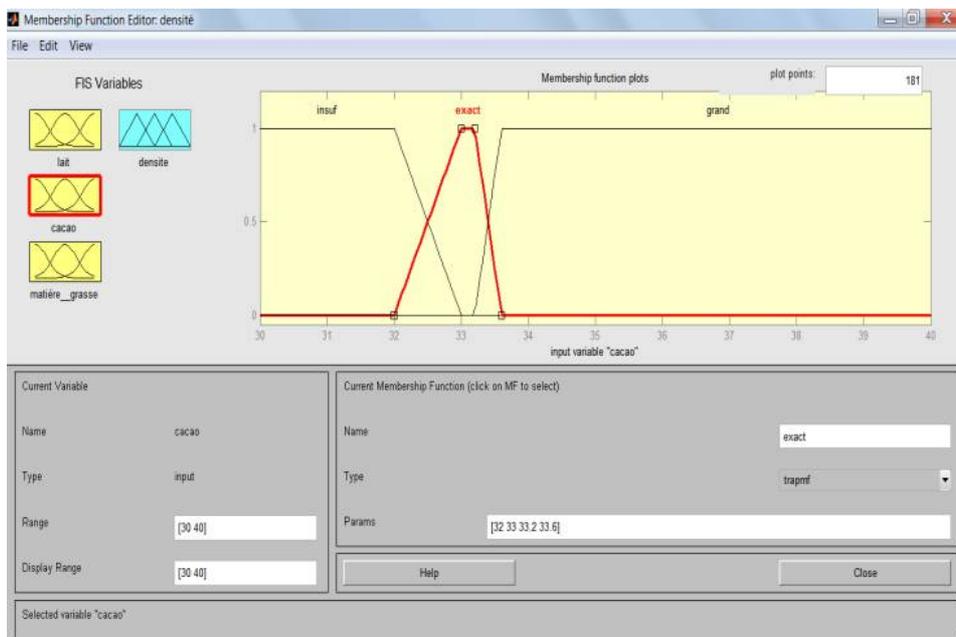


Figure. V.5. the quantité de cacao

- on a aussi trois valeurs floues pour représenter la matière grasse:

La quantité de la matière grasse insuffisante de 4-5 g

La quantité de la matière grasse exacte de 5-6 g

La quantité de la matière grasse grande de 5.7 g

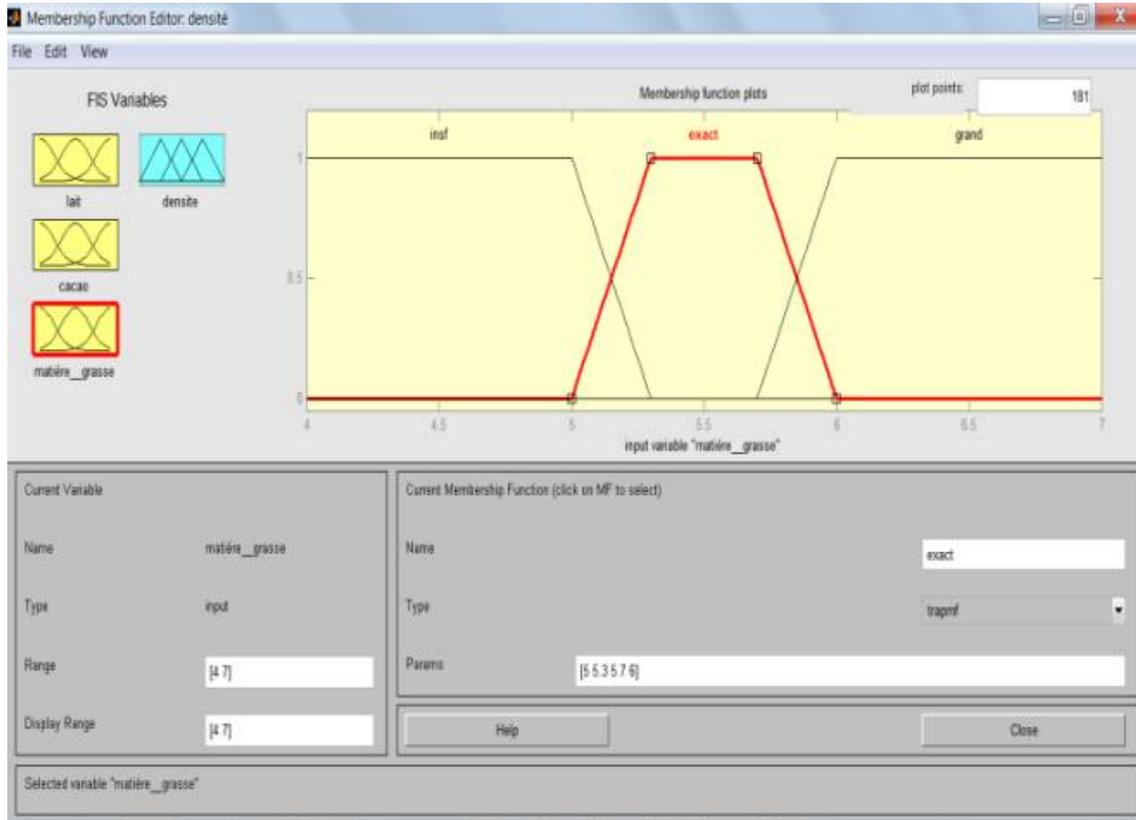


Figure. V.6. la matière grasse

- la variable de sortie est représentée par sept valeurs floues,

Mauvaise densité : 0 à 0.9 g/cm<sup>3</sup>

Moins dense : 0.6 à 01 g/cm<sup>3</sup>

Bonne densité : 0.9 à 1.1 g/cm<sup>3</sup>

Excellente densité : 1 à 1.2 g/cm<sup>3</sup>

Bonne densité : 1.1 à 1.4 g/cm<sup>3</sup>

Moins dense : 1.2 à 1.8 g/cm<sup>3</sup>

Mauvaise densité : 1.4 à 2 g/cm<sup>3</sup>

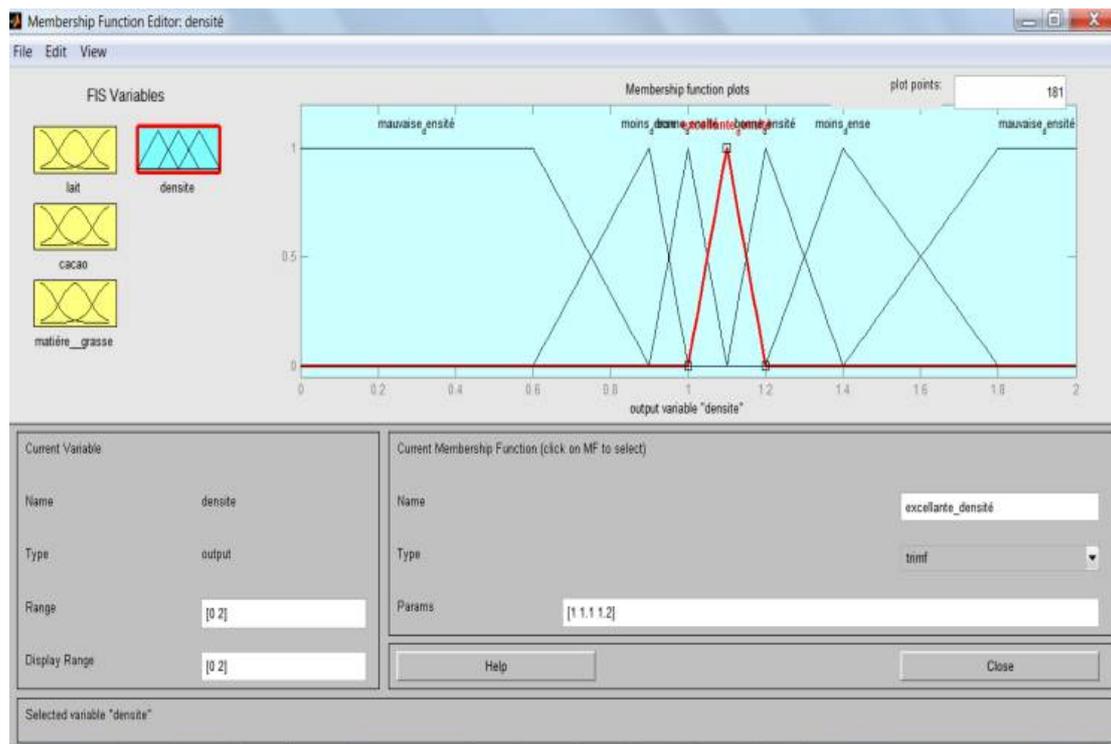


Figure. V.7.la densité

**Inférence(les règles)**

Afin d'arriver au contrôleur flou de densité nous avons posé 21 règles couvrant tous les probabilités possibles de notre système de production, exemple:

- Si La quantité de lait est insuffisante et La quantité de cacao est insuffisante et La quantité de la matière grasse est insuffisante alors mauvaise densité
- Si La quantité de lait est exacte et La quantité de cacao est exacte et La quantité de la matière grasse est exacte alors excellent densité
- Si La quantité de lait est insuffisante et La quantité de cacao est exacte et La quantité de la matière grasse est exacte alors bonne densité

Tableaux. V.2.les règles

La quantité de lait	Et	La quantité de Cacao	Et	La quantité de matière grasse	La densité
1. Insuffisante	Et	Insuffisante	Et	Insuffisante	Mauvaise
2. Insuffisante	Et	Insuffisante	Et	Exacte	Moins
3. Insuffisante	Et	Exacte	Et	Insuffisante	Moins
4. Insuffisante	Et	Insuffisante	Et	Grande	Mauvaise

5.	Insuffisante	Et	Grande	Et	Insuffisante	Mauvaise
6.	Insuffisante	Et	Exacte	Et	Exacte	Bonne
7.	Insuffisante	Et	Grande	Et	Grande	Mauvaise
8.	Exacte	Et	Exacte	Et	Exacte	Excellente
9.	Exacte	Et	Exacte	Et	Grande	Bonne
10.	Exacte	Et	Grande	Et	Exacte	Bonne
11.	Exacte	Et	Exacte	Et	Insuffisante	Bonne
12.	Exacte	Et	Insuffisante	Et	Exacte	Bonne
13.	Exacte	Et	Grande	Et	Grande	Mauvaise
14.	Exacte	Et	Insuffisante	Et	Insuffisante	Mauvaise
15.	Grande	Et	Grande	Et	Grande	Mauvaise
16.	Grande	Et	Grande	Et	Exacte	Moins
17.	Grande	Et	Exacte	Et	Grande	Moins
18.	Grande	Et	Grande	Et	Insuffisante	Mauvaise
19.	Grande	Et	Insuffisante	Et	Grande	Mauvaise
20.	Grande	Et	Insuffisante	Et	Insuffisante	Mauvaise
21.	Grande	Et	Exacte	Et	Exacte	Bonne

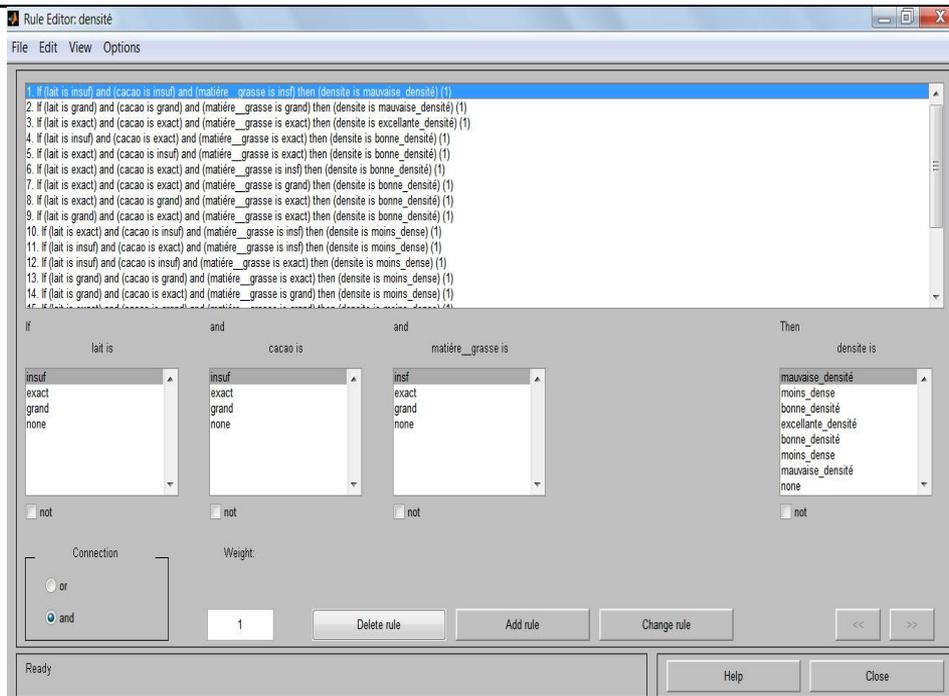
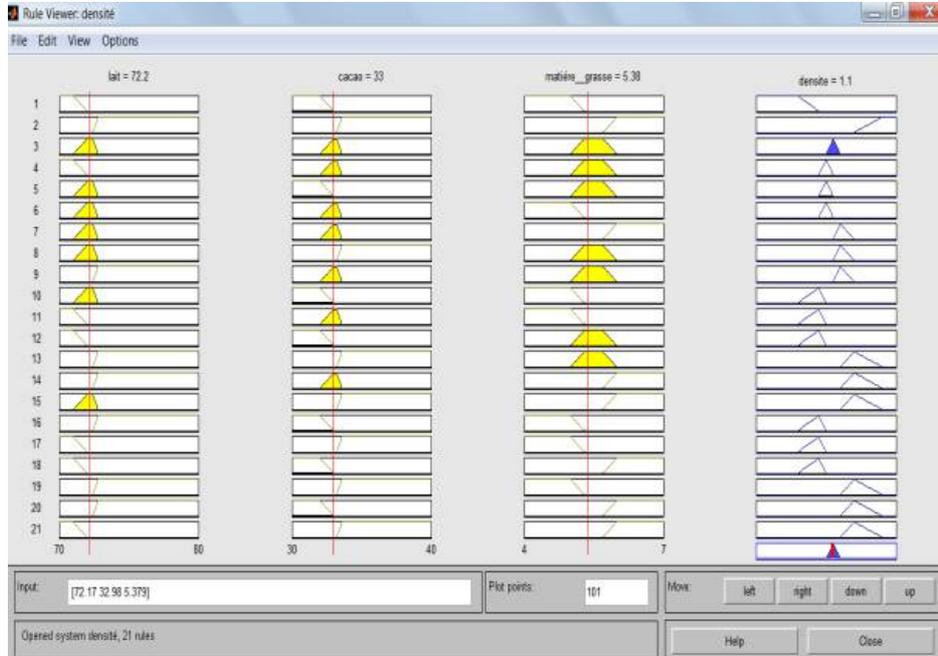


Figure. V.8. les règles

**Défuzzification :**

Dans cette fenêtre nous présentant notre contrôleur ou on a choisi, la quantité de lait exacte (72.4ml) et la quantité de cacao exacte (33.1g) et la quantité de la matière grasse exacte (5.35g) alors on a une excellente densité (1.1 g/cm<sup>3</sup>).



*Figure. V.9.défuzzification*

**Pour le contrôle de poids :****Fuzzification :**

Afin de contrôler le poids on a trois variables d'entrée, la longueur, la largeur et l'épaisseur.

- Pour représenter la longueur on a trois valeurs floues :

Moins longue: 170 à 178 mm

La longueur est exacte: 177 à 184 mm

Plus longue: 182 à 190 mm

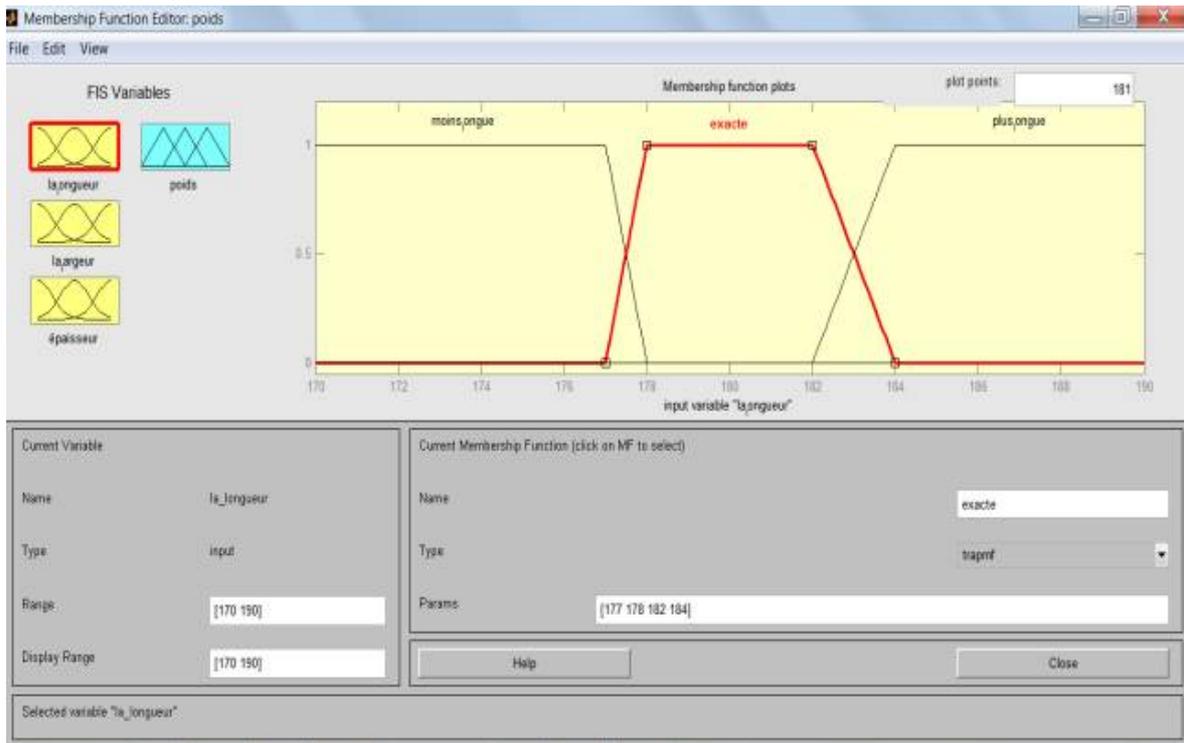


Figure. V.10. la longueur

- Pour représenter la largeur on a trois valeurs floues:

Moins large: 50-57 mm

La largeur est exacte: 56 à 64 mm

Plus large: 62 à 70 mm

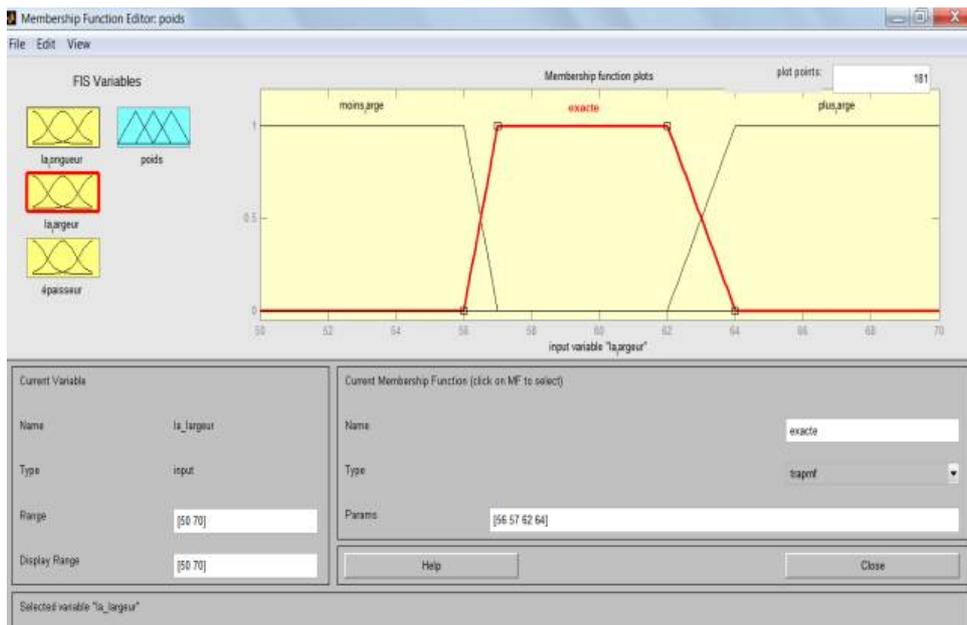


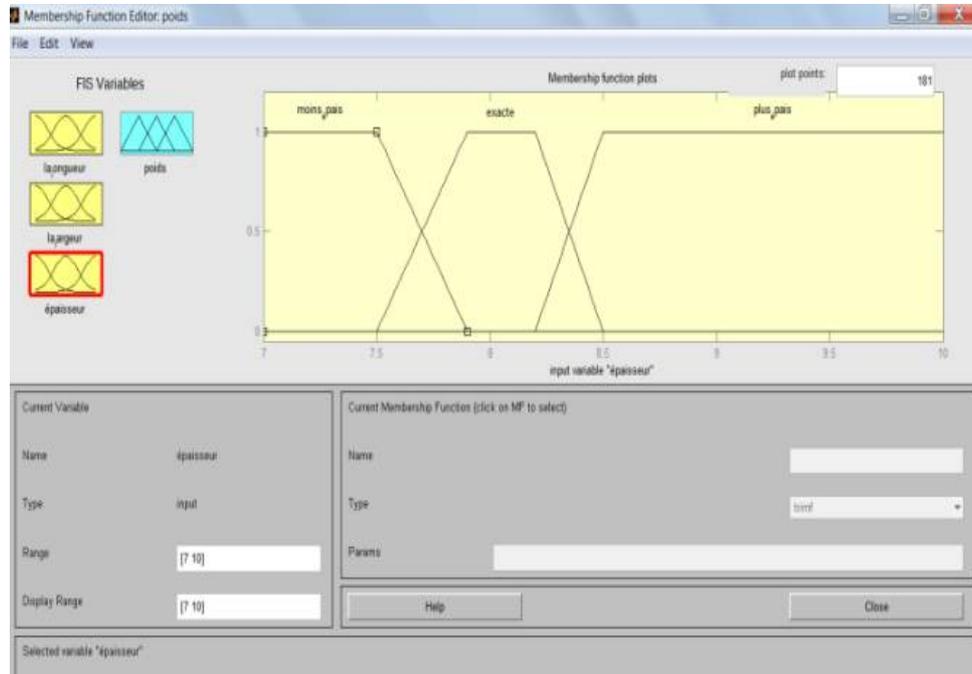
Figure. V.11. la largeur

- Pour représenter l'épaisseur on a trois valeurs floues:

Moins épais : 7 à 7.9 mm

L'épaisseur est exacte : 7.5 à 8.5 mm

Plus épais : 8.2 à 10 mm



*fig.12.l'épaisseur*

- la variable de sortie est représentée par sept valeurs floues,

Poids mauvais: 75 à 88.7 g

Poids inapproprié: 80 à 99.8

Poids approprié: 88.7-100g

Poids très approprié: 99.8-102g

Poids approprié: 100 à 104g

Poids inapproprié: 102-108g

Poids mauvais : 104-108g

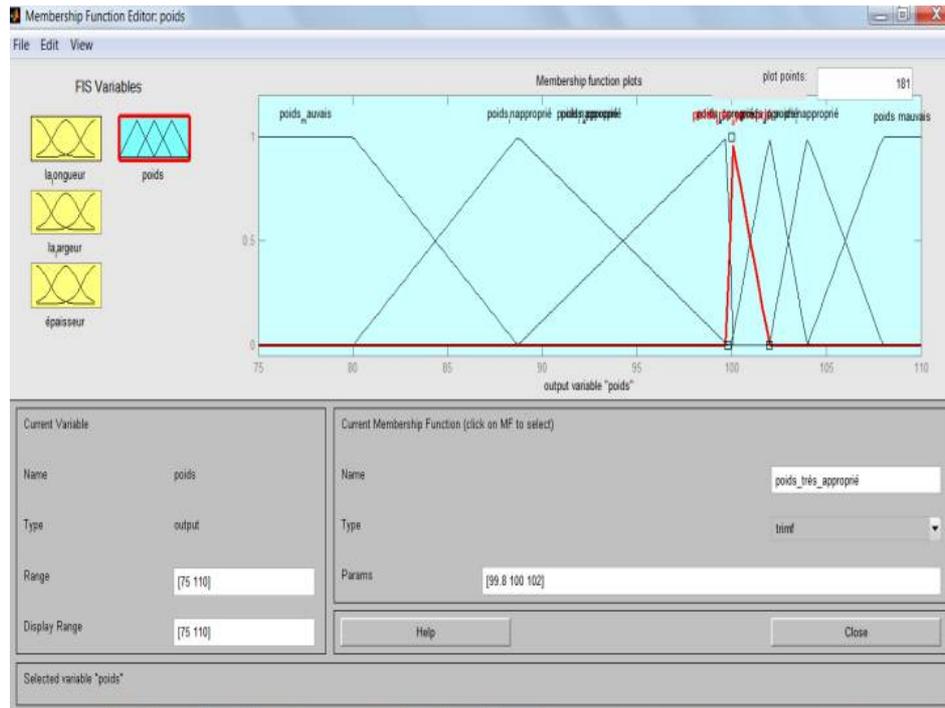


Figure. V.13. le poids

### Inférence(les règles) :

Afin d'arriver au contrôleur flou de poids nous avons posé 21 règles de toutes les probabilités possibles, exemple:

- Si La longueur est exacte et La largeur est exacte et L'épaisseur est exacte alors poids très approprié
- Si La longueur est exacte et La largeur est exacte et L'épaisseur est moins épaisse alors poids approprié
- Si La longueur est exacte et La largeur est moins large et L'épaisseur est moins épaisse alors poids inapproprié

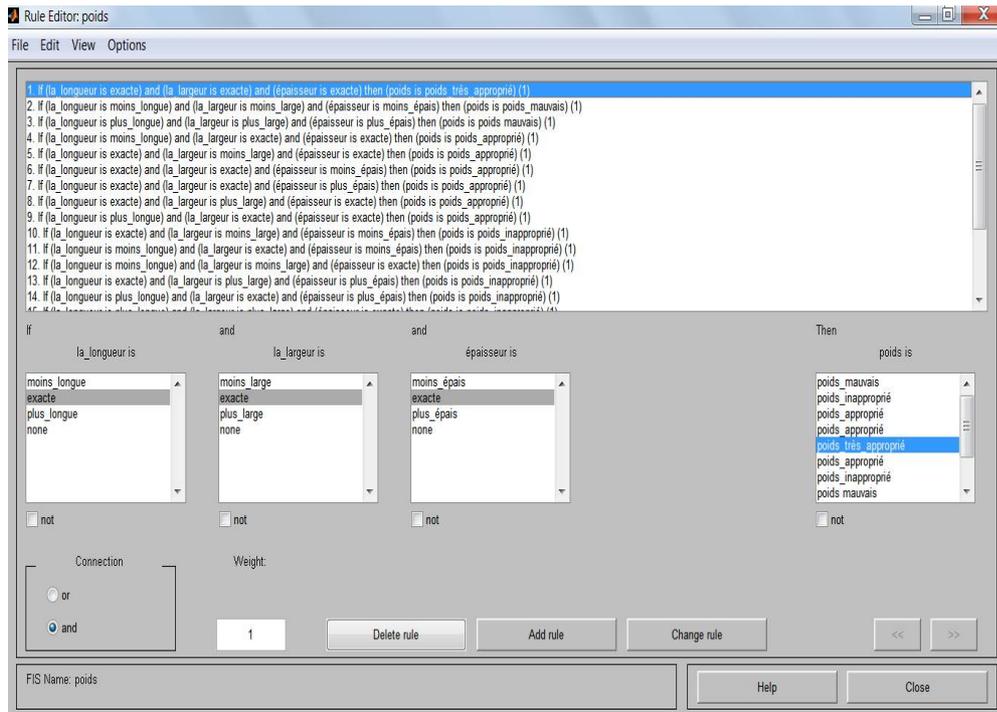


Figure. V.14. les règles

**Défuzzification:**

Dans cette fenêtre nous présentant notre contrôleur de poids ou on a choisi, la longueur exacte (178 mm) et la largeur moins large (56 mm) et l'épaisseur moins épaisse (7.53mm) alors on a un poids inapproprié (89.4 g).

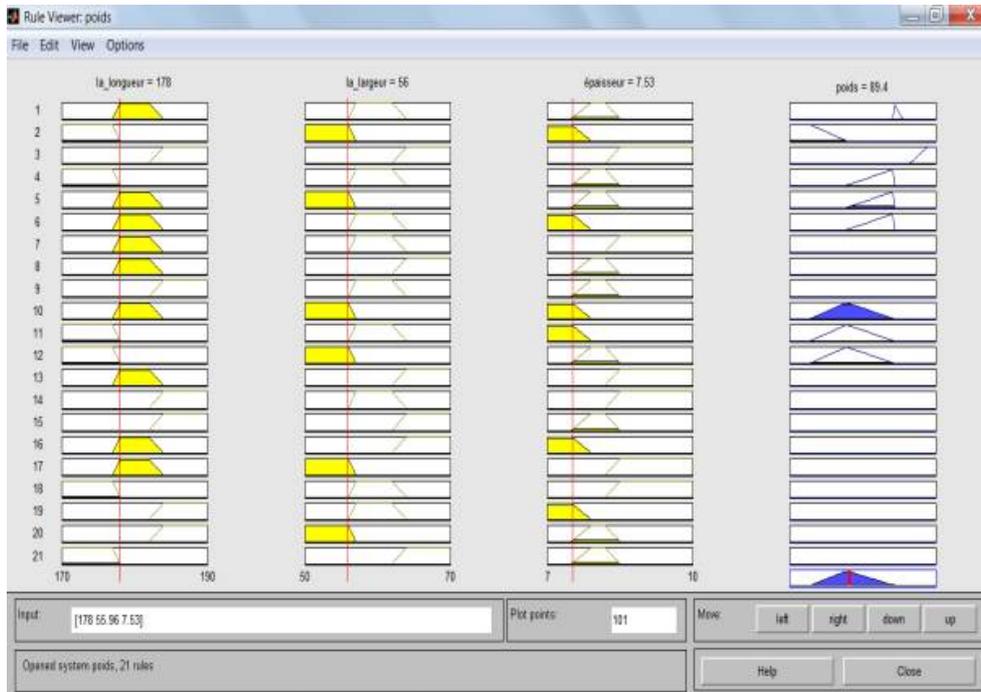
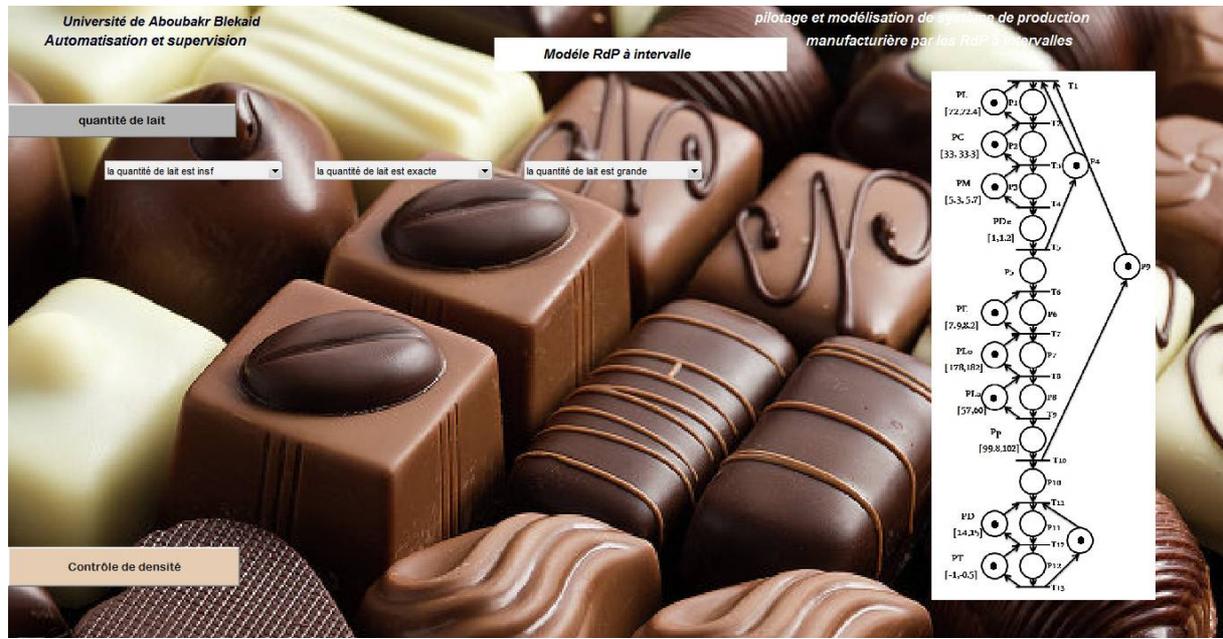


Figure. V.15. Défuzzification

### V.1.4. Interface graphique

MATLAB offre depuis longtemps des fonctionnalités relatives à l'élaboration d'interfaces-utilisateur graphiques (GUI, Graphical User Interface). Et à l'aide ce logiciel, nous avons réalisé une interface graphique.



### V.2. Présentation de deuxième système

Pour faire du chocolat, il faut 60 ml de lait, 31 g de cacao, 5 g de matière grasse et des additifs pour le goût. Les ingrédients doivent être dosés dans des proportions exactes pour atteindre la qualité souhaitée.

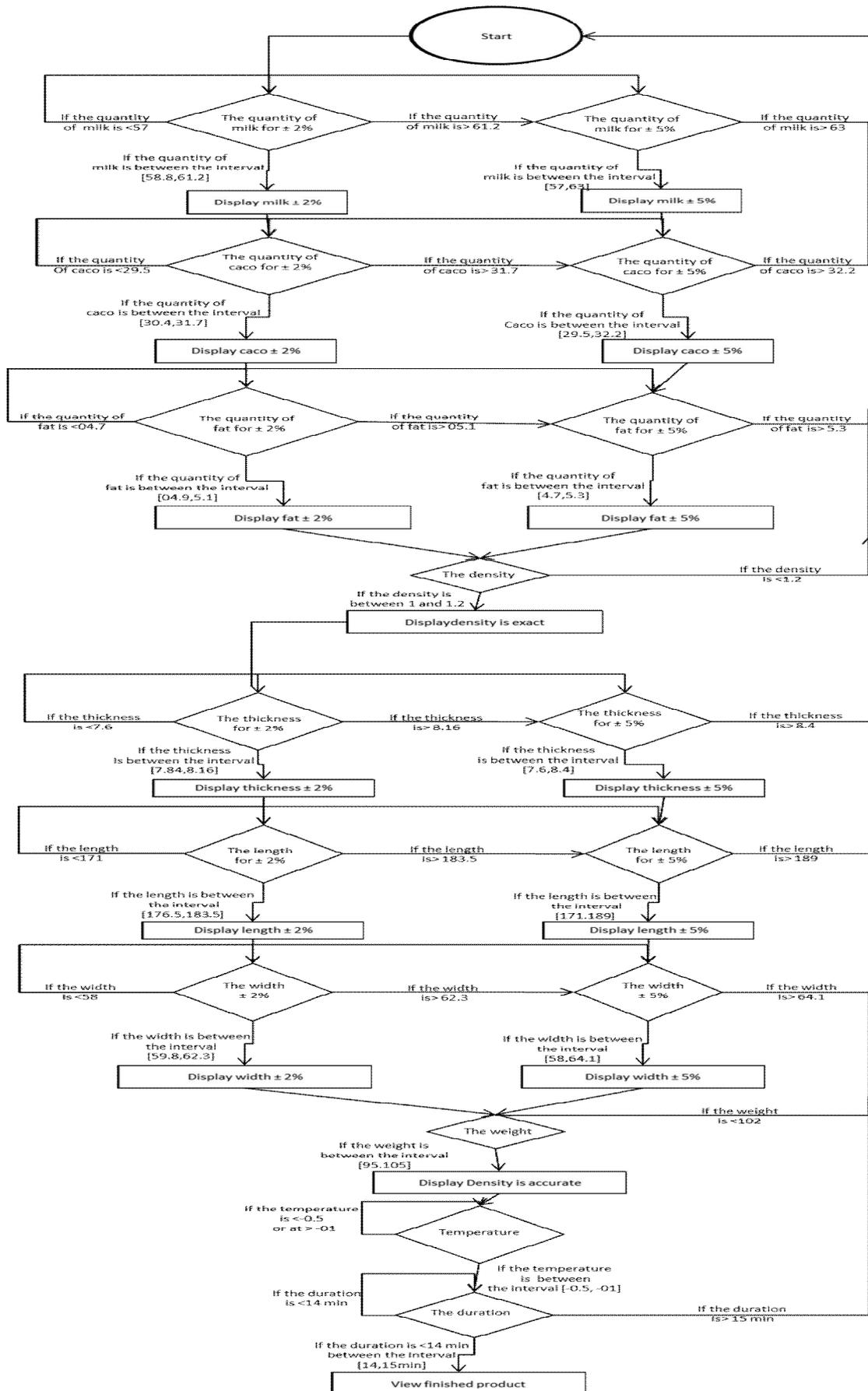
Le système de production doit examiner avec attention les différentes doses de lait, de cacao et de matières grasses. Nous nous autorisons une incertitude de  $\pm 2\%$ , et comme notre système est un système de production industrielle, nous devons prendre toutes les précautions nécessaires pour que notre produit fini avec moins de perte possible pour cela, nous allons tolère une incertitude allant jusqu'à  $\pm 5\%$ , de façon a ne pas influé sur la qualité. En cas de manque de moins de 2% de la matière première, nous n'allons pas arrêter le cycle de production et s'il y a un dépassement de plus de 2% le mélange ne sera pas rejeté.

Nous avons choisi comme exemple une production de barres de chocolat avec les spécifications imposées dans le tableau suivant:

Tableaux. V.3.Spécifications

Longueur	for $\pm 2\%$	$LO_{2min}$	176.5 mm
		$LO_{2max}$	183.5 mm
	for $\pm 5\%$	$LO_{5min}$	171 mm
		$LO_{5max}$	189 mm
Largeur	for $\pm 2\%$	$La_{2min}$	59.8 mm
		$La_{2max}$	62.3 mm
	for $\pm 5\%$	$La_{5min}$	58 mm
		$La_{5max}$	64.1 mm
Epaisseur	for $\pm 2\%$	$E_{2min}$	7.84 mm
		$E_{2max}$	8.16 mm
	for $\pm 5\%$	$E_{5min}$	7.6 mm
		$E_{5max}$	8.4 mm
Lait	for $\pm 2\%$	$L_{2min}$	58.8 ml
		$L_{2max}$	61.2 ml
	for $\pm 5\%$	$L_{5min}$	57 ml
		$L_{5max}$	63 ml
Cacao	for $\pm 2\%$	$C_{2min}$	30.4g
		$C_{2max}$	31.7 g
	for $\pm 5\%$	$C_{5min}$	29.5 g
		$C_{5max}$	32.2 g
Matière grasse	for $\pm 2\%$	$M_{2min}$	04.9 g
		$M_{2max}$	05.1 g
	for $\pm 5\%$	$M_{5min}$	04.7 g
		$M_{5max}$	05.3 g
densité		$De_{min}$	1 g/cm <sup>3</sup>
		$De_{max}$	1.2 g/cm <sup>3</sup>
poids		$P_{min}$	95 g
		$P_{max}$	105 g
Température		$T_{min}$	-1 °
		$T_{max}$	-0.5 °
durée		$D_{min}$	14 min
		$D_{max}$	15 min

V.2.1.ORGANIGRAMME



**V.2.2. Application du réseau petri à intervalle sur le système [AGCS18]**

Compte tenu de cette imprécision tolérée et pour augmente la productivité de la manufacture, nous avons choisi de modélise notre système par les réseaux de Petri à intervalle sont les plus adaptés à la modélisation de ce système compte tenu de leurs caractéristiques définies par des intervalles non temporels.

**V.2.2.1. Le modèle de réseau de Petri à intervalles**

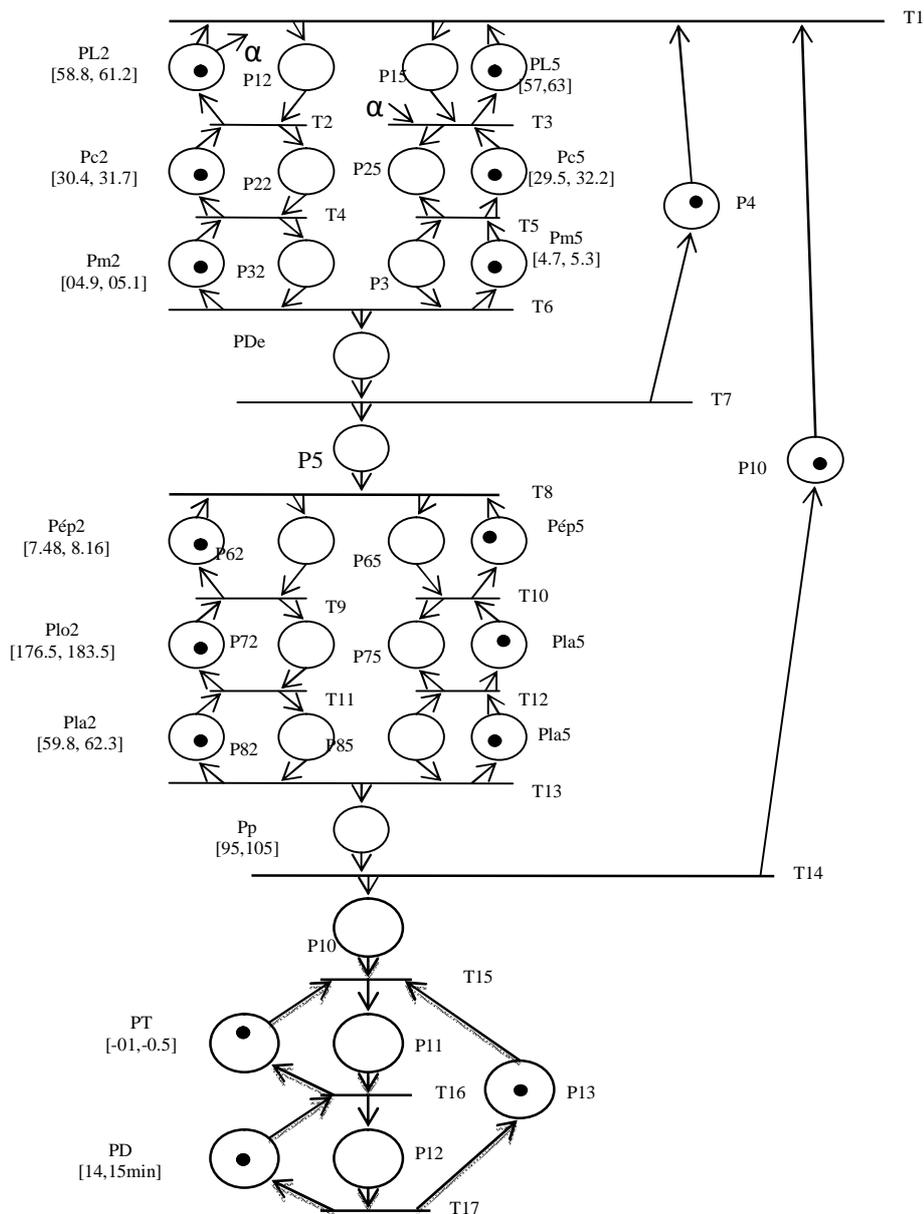


Figure. V.15. le deuxième modèle du système

P12: représente le contrôle de la quantité de lait  $\pm 2\%$   
PL2: la quantité de lait est comprise dans l'intervalle [58.8- 61.2]  
P15: représente le contrôle de la quantité de lait  $\pm 5\%$   
PL5: la quantité de lait est comprise dans l'intervalle [57-63]  
Pc2: représente le contrôle de la quantité de cacao  $\pm 2\%$   
P22 la quantité de cacao se situe entre l'intervalle [30.4-31.7]  
Pc5: représente le contrôle de la quantité de cacao  $\pm 5\%$   
P25 la quantité de cacao est comprise entre l'intervalle [29.5-32.2]  
Pm2: représente le contrôle de la quantité de graisse  $\pm 2\%$   
P32 la quantité de graisse est comprise dans l'intervalle [04.9-05.1]  
Pm5: représente le contrôle de la quantité de graisse  $\pm 5\%$   
P35 la quantité de graisse est comprise entre l'intervalle [4.7-5.3]  
PDe: représente le contrôle de la densité  
P4 la densité est comprise dans l'intervalle [1-1.2]  
P5: autorisation du prochain cycle de contrôle de la densité  
Pép2: représente le contrôle de l'épaisseur  $\pm 2\%$   
P62: l'épaisseur est comprise entre l'intervalle [7.84-8.16]  
Pép5: prendre le contrôle de l'épaisseur  $\pm 5\%$   
P65: l'épaisseur est comprise entre l'intervalle [7.6-8.4]  
Plo2: représente le contrôle de la longueur  $\pm 2\%$   
P72 la longueur est comprise entre l'intervalle [176.5-183.5]  
Plo5: représente le contrôle de la longueur  $\pm 5\%$   
P75: la longueur est comprise dans l'intervalle [171-189]  
Pla2: représente le contrôle de largeur  $\pm 2\%$   
P82 la largeur est comprise entre l'intervalle [59.8-62.3]  
Pla5: représente le contrôle de la largeur  $\pm 5\%$   
P85 la largeur est comprise entre l'intervalle [58-64.1]  
Pp: représente le contrôle du poids  
P9: le poids est compris dans l'intervalle [95-105g]  
P10: autorisation du prochain cycle de production  
Pt: représente le contrôle de la température  
P11: la température est comprise entre l'intervalle [-01 °(-0.5°)]  
Pd: représente le contrôle de la durée

P12: la durée est comprise dans l'intervalle [14-15min]

P13: autorisation du prochain cycle de séchage

### V.2.3.Explication du modèle de réseau de Petri à intervalle contraint

Lors de la première utilisation, les emplacements P04 et P10 doivent être marqués pour indiquer l'absence de cycle en cours.

La place PL2 représente le contrôle de la quantité de 60 ml de lait avec une incertitude  $\pm 2\%$ , qui est dans la trajectoire de versement quand elle est marquée. Lorsque la quantité est comprise entre l'intervalle [58.8-61.2], T1 est franchissable. La place P12 est marquée pour indiquer la quantité de lait comprise dans l'intervalle. Si cette quantité est inférieure à 57 ml en attend, et s'il est inférieur à 58,8 ml en cas de manque de matière première le jeton sera évacué à la place PL5 qui représente le contrôle de la quantité de lait avec une incertitude de  $\pm 5\%$  de l'intervalle 60 ml, donc T1 est franchi alors P15 est marqué, ce qui implique que la quantité de lait se situe entre l'intervalle [57- 63], puis le jeton à la place P12 sera évacué vers le T3 de sorte que le système continue la production avec des valeurs  $\pm 5\%$ . Dans le cas contraire, si la quantité de lait est supérieure à 61.2 ml, le jeton sera évacué de la place PL2 à PL5, s'il est inférieur à 63 ml, T1 sera franchissable et si elle est plus élevée, le jeton est mort en évacuant le produit. Idem pour l'autre place.

### V.2.4.La prise de décision

Nous avons utilisé un contrôleur flous de type 2 pour la prise de décision, car il y a une variation de  $\pm 2\%$  à  $\pm 5\%$ , puisqu'on a des valeurs de sortie constantes, nous avons choisi de travailler avec la logique floue de TAKAGI-SUGENO.

#### V.2.4.1.Les contrôleurs flous

Nous avons conçu deux contrôleurs flous, le premier pour le contrôle de la densité et le second pour le contrôle du poids.

##### **fuzzification**

- Pour le contrôle de la densité, il y a trois variables d'entrée: la quantité de lait, de cacao et de matière grasse avec six valeurs floues pour chacune d'entre elles est indiquée dans le tableau suivant:

Tableaux. V.4. Les variables d'entrée pour le contrôle de la densité

		Les variable d'entées		
		Quantité insuffisante	Quantité exact	Quantité grand
Lait	for±2%	56-60	58.8-61.2	60-65
	for ±5%	56-60.8	57-63	59.3-65
Cacao	for ±2%	28-31	30.4-31.7	31-33
	for ±5%	28-31.3	29.5-32.2	30.7-33
Matière grasse	for ±2%	04.2-05	4.9-5.1	05-06
	for±5%	04.2-5.05	4.7-5.3	4.95-06

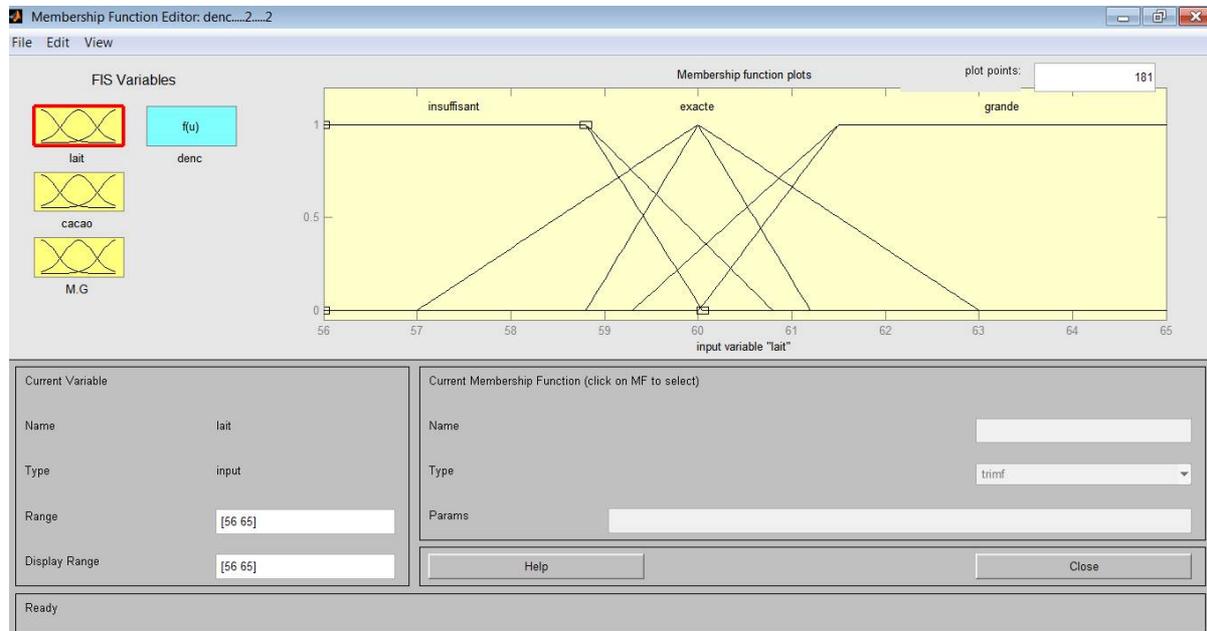


Figure. V.16. exemple de fuzzification(les entrées)

- la variable de sortie est représentée par sept valeurs de constante floue,

Tableaux. V.4. la variable de sortie de la densité

la variable de sortie	La densité						
Les valeurs de sortie	Mauvaise	Moins	Bonne	Excellent	Bonne	Moins	Mauvaise
	0.6 g/cm <sup>3</sup>	0.9 g/cm <sup>3</sup>	1.0 g/cm <sup>3</sup>	1.1 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>	1.3 g/cm <sup>3</sup>	1.4g/cm <sup>3</sup>

**Inférence(les règles) :**

Afin d'arriver au contrôleur flou de densité nous avons posé 63 règles couvrant tous les probabilités possibles de notre système de production, qui sont représenté dans le *Tableaux. V.6*, exemple:

- Si La quantité de lait est insuffisante et La quantité de cacao est insuffisante et La quantité de la matière grasse est insuffisante alors mauvaise densité
- Si La quantité de lait est exacte et La quantité de cacao est exacte et La quantité de la matière grasse est exacte alors excellent densité
- Si La quantité de lait est insuffisante et La quantité de cacao est exacte et La quantité de la matière grasse est exacte alors bonne densité

*Tableaux. V.6.Règles possibles*

<b>La quantité de lait</b>	<b>Et</b>	<b>La quantité de cacao</b>	<b>Et</b>	<b>La quantité de matière grasse</b>	<b>La densité</b>
22. Insuffisante (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Mauvaise
23. Insuffisante (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Exacte (2%)	Moins
24. Insuffisante (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Moins
25. Insuffisante (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Grande (2%)	Mauvaise
26. Insuffisante (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Mauvaise
27. Insuffisante (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Exacte (2%)	Bonne
28. Insuffisante (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Grande (2%)	Mauvaise
29. Insuffisante (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Mauvaise
30. Insuffisante (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Et	Exacte (5%)	Moins

---

31. Insuffisante (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Moins
32. Insuffisante (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Et	Grande (5%)	Mauvaise
33. Insuffisante (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Mauvaise
34. Insuffisante (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Exacte (5%)	Bonne
35. Insuffisante (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Grande (5%)	Mauvaise
36. Exacte (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Exacte (2%)	Excellente
37. Exacte (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Grande (2%)	Bonne
38. Exacte (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Exacte (2%)	Bonne
39. Exacte (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Bonne
40. Exacte (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Exacte (2%)	Bonne
41. Exacte (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Grande (2%)	Mauvaise
42. Exacte (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Mauvaise
43. Exacte (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Exacte (5%)	Excellente
44. Exacte (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Grande (5%)	Bonne
45. Exacte (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Exacte (5%)	Bonne
46. Exacte (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Bonne
47. Exacte	Et	Insuffisante (5%)	Et	Exacte (5%)	Bonne

---

---

(5%)						
48. Exacte (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Mauvaise	
49. Exacte (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Grande (5%)	Mauvaise	
50. Grande (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Grande (2%)	Mauvaise	
51. Grande (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Exacte (2%)	Moins	
52. Grande (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Grande (2%)	Moins	
53. Grande (2%)	Et	Grande (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Mauvaise	
54. Grande (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Grande (2%)	Mauvaise	
55. Grande (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Et	Insuffisante (2%)	Mauvaise	
56. Grande (2%)	Et	Exacte (2%)	Et	Exacte (2%)	Bonne	
57. Grande (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Grande (5%)	Mauvaise	
58. Grande (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Exacte (5%)	Moins	
59. Grande (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Grande (5%)	Moins	
60. Grande (5%)	Et	Grande (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Mauvaise	
61. Grande (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Et	Grande (5%)	Mauvaise	
62. Grande (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Et	Insuffisante (5%)	Mauvaise	
63. Grande (5%)	Et	Exacte (5%)	Et	Exacte 5%)	Bonne	

---

**Défuzzification:**

Dans cette fenêtre, nous présentons notre contrôleur ou on a choisi, la quantité de lait exacte (60.1) et la quantité de cacao exacte (33 g) et la quantité de la matière grasse exacte (5.01g) alors on a une excellente densité (1.1 g/cm<sup>3</sup>).



Figure. V.17. exemple de défuzzification

**Fuzzification:**

Afin de contrôler le poids on a trois variables d'entrées, la longueur, la largeur et l'épaisseur, avec six valeurs floues pour chaque une, sont représentées dans le tableau suivant:

Tableaux. V.7. Les variable d'entées du contrôle de poids

		Les variable d'entées		
		Moins	exacte	plus
La longueur	Pour ±2%	170-180	167.5-183.5	180-190
	Pour ±5%	170-181	171-189	178.7-190
la largeur	Pour ±2%	54-61	59.8-62.3	61-70
	Pour ±5%	54-61.3	58-64.1	60.7-70
l'épaisseur	Pour ±2%	07-08	7.84-8.16	07-08
	Pour ±5%	07-08.1	7.6-8.4	07-08.1

- la variable de sortie est représentée par sept valeurs floues

Tableaux. V.8. la variable de sortie

la variable de sortie	Le poids						
Les valeurs de sortie	Mauvaise	Inapproprié	Approprié	Très approprié	Approprié	Inapproprié	Mauvaise
	78g	89g	95g	100g	105g	107g	109g

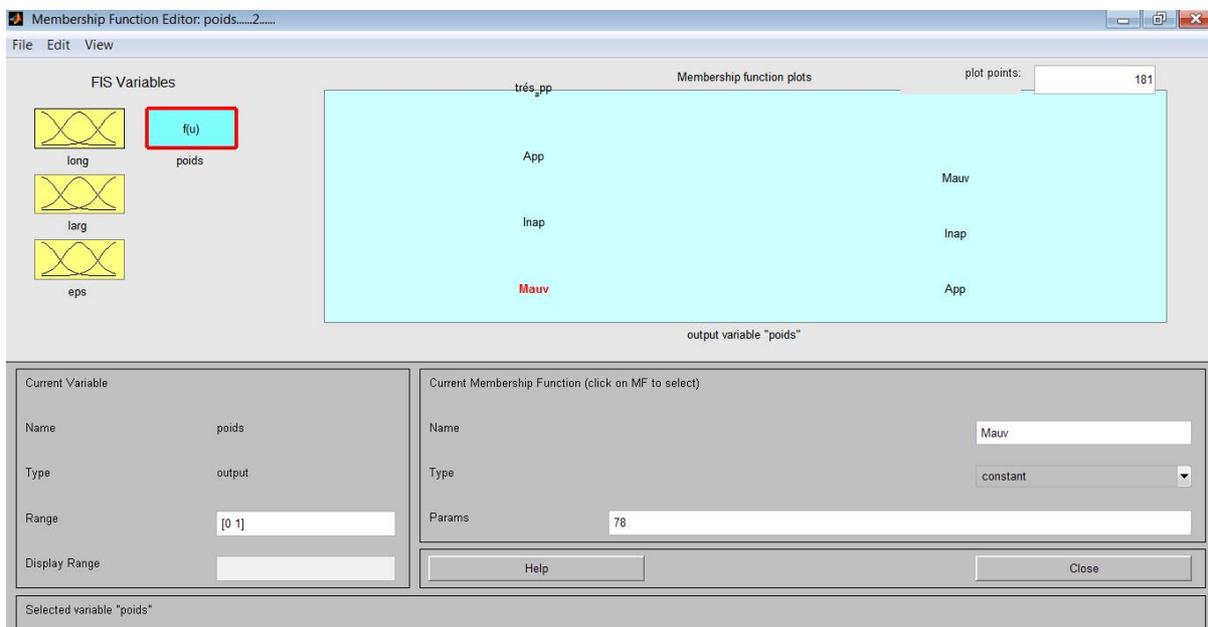


Figure. V.18. exemple de fuzzification(les sorties)

**Inférence(les règles) :**

Afin d'arriver au contrôleur flou de poids nous avons posé 63 règles (avec le même principe que Tableaux. V.6 de tous les probabilités possible, exemple:

- Si La longueur est exacte et La largeur est exacte et L'épaisseur est exacte alors poids très approprié
- Si La longueur est exacte et La largeur est exacte et L'épaisseur est moins épais alors poids approprié
- Si La longueur est exacte et La largeur est moins large et L'épaisseur est moins épais alors poids inapproprié

**Défuzzification:**

Dans cette fenêtre, nous présentons notre contrôleur de poids où on a choisi, la longueur exacte (180 mm) et la largeur exacte (61 mm) et l'épaisseur exacte (8.02 mm) alors on a un poids très approprié (100 g).



Figure. V.19. Exemple de défuzzification

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système de production alimentaire par le réseau de petri à intervalle, puis nous avons appliqué deux contrôleurs flous type-1 et type-2, pour la prise de décision.

Les réseaux de petri à intervalle non temporelle correspondent mieux aux exigences des systèmes à tolérances, en plus le contrôleur flou type-2 minimise les pertes de la matière première que celui de type-1 en comparant les résultats de simulation et permet une bonne prise de décision.

## Conclusion générale

---

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est de développer un outil de modélisation et de commande des systèmes à événements discrets non temporelles, qui permet de répondre aux problèmes industriels dans le cas général.

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé les réseaux de petri à intervalle pour la modalisation du système dont ils nous ont facilité le contrôle et la commande du système.

Vu que nous avons modélisé notre système en séquentiel, donc si une étape est vraie on passe à la suivante, après nous avons amélioré notre système par le principe des systèmes reconfigurables avec deux tolérances possibles  $\pm 2\%$  et  $\pm 5\%$ . Cette tolérance nous a permis de ne pas perdre la matière première et de bien gérer le système en cas de perturbation externe par exemple un manque de  $\pm 2\%$  de la matière.

Par contre, nous avons utilisé la logique floue pour la prise de décision. Logique floue type-2 correspond parfaitement aux deux tolérances utilisées, et logique TAKAGI-SUGENO 'TS' dans laquelle la sortie est sous forme d'une constante. Nous avons adopté cet aspect car notre produit procède une tolérance dont la valeur est plus au moins exacte.

Les perspectives que nous envisageons pour notre travail de recherche sont les suivantes :

1. Une première perspective pour la continuation de notre travail est la généralisation de ces résultats sur le plan de l'analyse, de modélisation et de la synthèse de contrôleur à des systèmes plus complexes en structure et en dynamique.
2. Appliquer notre travail sur un système parallèle.
3. Modéliser un système de production complexe par les réseaux de petri.
4. La modélisation d'un phénomène purement physique ou électronique par un réseau de petri à intervalle.
5. Programmation d'une interface de modalisation et d'analyse par les réseaux de petri.

- [AA98] ALLAM M. et ALLA H. From hybrid petri nets to hybrid automata. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, volume 32, pages 1165-1185, 1998
- [Ab06(a)]. Abele, E., Liebeck, T., Wörn, A., 2006(a), Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, 55/1: 433-440.
- [AL98] ALLAM Mohamed, "Sur l'analyse quantitative des réseaux de petri hybrides une approche basée sur les automate hybride". PhD thesis in gene industrial, Institut national polytechnique de Grenoble, 1998.
- [AGC15] Sarra ADJIM, Rachida HADIBY-GHOUL, Alli CHERMITY, "Fuzzy control of product quality in a manufacturing system modeled with Petri Nets", Conférence internationale sur l'Automatique et la productique CIAM'2015, l'USTO Algerie, 10 et 11 Novembre 2015
- [AGCS18] Sarra ADJIM, Rachida GHOUL HADIBY, Alli CHERMITTI, Abdelkader SLIMANE ,Fuzzy Control of Product Quality in a Manufacturing System Modeled with Interval Constrained Petri Net, *International Journal of Engineering Research in Africa* ISSN: 1663-4144, Vol. 40, pp 151-16, 2018
- [AKZ98] Antsaklis. P , Koutsoukos.X, and VZaytoon, J On Hybrid Control of Complex Systems: A Survey *APII-JESA*, 32(9-10), 1023—1045.1998.
- [BAC, 98] P. Bonhomme, P. Aygalinc, S. Calvez.. "Robust Control Using Margins of Operation Times". *Wodes 98*, Cagliari Italy August 1998, pp. 291-297.
- [BAC, 99/1] P. Bonhomme, P. Aygalinc, S. Calvez. "Transformation rules for P-Time Petri Nets". *IEEE/ETFA 99*, Barcelona, Catalonia Spain, October 18-21, 1999, pp. 251-260.
- [BAC, 99/2] P. Bonhomme, P. Aygalinc, S. Calvez. " "Règles de Réduction pour les Réseaux de Petri P-temporels", *Journées Doctorales d'Automatique (JDA'99)*, Nancy, France, pp. 273-276.
- [BAC, 00] P. Bonhomme, P. Aygalinc, S. Calvez. "Using Robustness Properties for Multi-Products Processing". *IFAC/IFIP/IEEE, 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics, MCPL'2000*, 5-8 July 2000, Grenoble, FRANCE.
- [BAC, 01/1] P. Bonhomme, P. Aygalinc, S. Calvez. "Control and Performances Evaluation using an Enumerative Approach". *5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI 2001*, July 22-25, 2001, Orlando, Florida, U.S.A. (à paraître).
- [BAC, 01/2] P. Bonhomme, P. Aygalinc, S. Calvez. "Towards the Control of Time-Critical Systems". *2001 IEEE Conference on Control Applications, CCA/ISIC*, September 5- 7, 2001, Mexico City, Mexico (à paraître).
- [BAQ10] BAQAI Aamer, "Co-conception des processus d'usinage et des configurations cinématiques d'un système de production reconfigurable" . PhD thesis in

automatic and industrial computing, the higher national school of arts and trades, Paris, 2010.

- [BBM98] Branicky, M. S., V. S. Borkar et S. K. Mitter, A unified framework for hybrid control: model and optimal control theory, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol 43(1), pp 31- 45, 1998
- [BDB13a] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2013), A new heuristic for integrated process planning and scheduling in reconfigurable manufacturing systems, article accepté dans *International Journal of Production Research*.
- [BDB13b] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2013), A non dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 66, Issue 3, Pages 519-524.
- [BDB13c] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2013)., AMOSA based approach for process Plan generation In reconfigurable manufacturing system with machine load balancing, *IEEE international conference on systems, man and cybernetics (IEEE-SMC)* Manchester, UK.
- [BDB13d] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2013), A simulation-based genetic algorithm approach for process plans selection in uncertain reconfigurable environment, *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (IFAC MIM 2013)*, pp. 1961-1966, Saint Petersburg, Russie.
- [BDB12] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2012), Process plan generation in reconfigurable manufacturing systems using AMOSA and TOPSIS, *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (IFAC INCOM 2012)*, pp. 560-565, Bucharest, Roumanie.
- [BDB11a] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2011), Design of reconfigurable manufacturing systems: optimal machines selection using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), *the 41st International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE 2011)*, pp. 110-115, Los Angeles, USA.
- [BDB11b] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2011), Simulation-based NSGA-II approach for multi-unit process plans generation in reconfigurable manufacturing system, *16th IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (IEEE ETFA 2011)*, pp. 1-8, Toulouse, France.
- [BDB11c] Bensmaine A., Benyoucef L., Dahane M. (2011), Process plan generation in reconfigurable manufacturing systems using adapted NSGA-II and AMOSA, *9th IEEE Conference on Industrial Informatics (IEEE INDIN 2011)*, pp. 863-868, Lisbon, Portugal. Conférences internationales sans actes avec comités de lecture
- [BDB12] Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. (2012), An approach combining AMOSA and TOPSIS for process plan generation in reconfigurable manufacturing systems, *International Conference of Metaheuristics and Nature Inspired Computing (META 2012)*, Sousse, Tunisie.

- [BEN13] BENSMAÏNE Abderrahmane, "Algorithmes évolutionnaires et méthodes approchées multicritères pour la génération des processus de fabrication dans un environnement reconfigurable". PhD thesis in automatic, the signal and image processing, computer engineering, the university of Lorraine, 2013.
- [BMM10] Biglarbegan, M., W. W. Melek and J. M. Mendel (2010). On the stability of interval type-2 TSK fuzzy logic control systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, IEEE Transactions on 40(3), 798–818.
- [Bon01] Patrice Bonhomme, Réseaux de Pétri P- temporels : Contributions à la commande robuste. Thèse de Doctorat en Electronique - Electrotechnique-Automatique de l'Université de Savoie, France, 2001.
- [BSDM07] Baqai A., Siadat, A., Dantan, J.-Y. and Martin P. 2007, A Proposed Design Process Framework for a Reconfigurable Manufacturing System, *LT'07: International Workshop on Logistics and Transportation 2007*, Hammamet, Tunisia, November 18–20, 2007.
- [BSDM08] Baqai, A., Dantan, J.-Y., Siadat, A. and Martin P. 2008, Use of a manufacturing ontology and Function–Behavior–Structure approach for the design of a Reconfigurable Machine Tool, *Int. J. of Product Lifecycle Management*, Vol. 3, Nos. 2/3, pp. 132-150.
- [BSDSM09] Baqai A., Schmidt, S., Dantan, J.-Y., Siadat, A., and Martin P. 2009, Algorithmic Design Methodology for Process Plans and Architectural Configurations of Manufacturing Systems", *CIRPMS09, 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Grenoble, June 3–5, 2009.
- [Bra95] M.S. Branicky, *Studies in hybrid systems: modelling, Analysis and control*. Phd thesis, Massachusetts Institute of tech, 1995.
- [COL 03] Collart Dutilleul S., H. Dhouibi, E. Craye, « Internal Robustness of Discret Event System with internal constraints in repetitive functioning mode ». ACS'2003 conference, Miedzyzdroje, Poland.
- [DA92] R. David et H. Alla, "Du Grafset aux Réseaux de Petri", Hermès, 1992.
- [Da66]. Dano, S., *Industrial Production Model*. Vienna, Springer, 1966.
- [DA87] R. David et H. Alla, "Continuous Petri Nets" Dans les proceedings of the eight European workshop on application and theory of Petri nets, Pages 275-294, Zaragoza (Espagne), 1987.
- [DAC95] Dorato, P., C.T . Abdallah and V. Cerone (1995). *Linear Quadratic Control: An Introduction*. PrenticeHall, Englewood Cliffs, NJ.
- [DHO 05] Hedi DHOUBI, " UTILISATION DES RESEAUX DE PETRI A INTERVALLES POUR LA REGULATION D'UNE QUALITE : APPLICATION A UNE MANUFACTURE DE TABAC". Phd thesis in

automatique et informatique industrielle, université des sciences et technologies de lille et par l'école centrale de lille, 2005.

- [DHO 05a] H. Dhouibi, Collart Dutilleul S., L. Nabli, E.Craye., « Utilisation de la simulation pour valider la robustesse d'un système hybride ». MHOSI 05 conférence, Hammamet, Tunisie.
- [DHO 05b] H. Dhouibi, Collart Dutilleul S., E.Craye., L. Nabli "Computing Intervals of Intervals Constrained Petri Net: a tobacco manufacturing application", IMACS 05 conférence, Paris, juillet 05.
- [DHO 05c] H. Dhouibi, Collart Dutilleul S., L. Nabli, E.Craye., « Méthode de surveillance indirecte d'un système de production par la logique floue : cas d'une manufacture de tabac ». JISPME 05, Tozeur-Tunisie, décembre 05.
- [ECT05] Echanobe, J., I. del Campo and J.M. Tarela (2005). Issues concerning the analysis and implementation of a class of fuzzy controllers. *Fuzzy Sets and Systems* 155(2), 252 – 271.
- [EIM05] El Maraghy, H.A, Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems. Special Issue: Reconfigurable Manufacturing Systems*, 17/4: 261-276, 2005.
- [EIM05] Touria El Meziani, Méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides. Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, 2005.
- [Je12] Jean-Louis Pac Dunod, Paris 2012. ISBN 978-2-10-0576636-4.
- [JCY00] J. M. Jou, P. Y. Chen, and S. F. Yang, "An Adaptive Fuzzy Logic Controller: Its VLSI Architecture and Applications," *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol.8, no.1, pp. 52-60, Feb. 2000.
- [JME01] J. Mendel, *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [Ha09] Hamane Bekhada, "Contrôle d'une machine asynchrone par estimation de la vitesse". Magister Option : Analyse et commande des machines électriques, Usto 2008-2009.
- [GELDKB10] Guechi, El-Hadi, Jimmy Lauber, Michel Dambrine, Gregor Klančar and Saso Blažič (2010). PDC control design for non-holonomic wheeled mobile robots with delayed outputs. *J. Intell. Robotics Syst.* 60(3-4), 395–414.
- [Gho12] Ghomri Latéfa, "Synthèse de contrôleur de systèmes hybrides à flux continu par réseaux de Petri hybrides". Thèse de doctorat en productique, Université de Abou-Bekr Belkaïd – Tlemcen, Algérie, 2012.

- [Gh12] Ghoul Hadiby Rachida, «Les systèmes de production automatisée », Ouvrage publié par les éditions universitaires européennes EUE, Décembre 2012. ISBN 978-613-1-50308-5.
- [Gir04] Antoine Girard, Analyse algorithmique des systèmes hybrides, Thèse de Doctorat en Mathématiques Appliquées, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 2004.
- [GSH05] Ghoul Hadiby Rachida, Sihem Kechida, Hicham Tebbikh, "An Hybrid F.M.S Scheduling system based on Petri nets and advanced meta-heuristics". El Azhar University Engineering Journal, AUEJ, Volume 8 – n° 3/ Janvier 2005.
- [Kec07] Sihem Kechida, "Synthèse des générateurs de résidus robustes pour la détection des défauts". Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2007.
- [Kha97] W. Khansa, "Réseaux de Petri p-temporels : contribution à l'étude des systèmes à événements discrets". Thèse de doctorat, Université de Savoie, 1997.
- [Ko99] Koren, Y., Heisel, U., Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of CIRP, Vol 48.2, 527- 540, 1999
- [LAZ75] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I," Inform. Sci., vol.8, pp.199-249, 1975.
- [LAB 02] Labadi K., "Simulation et Optimisation des Systèmes de Production par L'analyse de Perturbations", Ecole Centrale de Nantes, France, Rapport de DEA (AIA), 75 p., Sep. 2002.
- [LAB 03] Labadi K., Mebarki N., et Castagna P., "Dimensionnement d'un système de production flexible par l'analyse de perturbations", Actes de la 4eme conférence francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'03), Toulouse (France) pp. 373- 378, Avril 2003.
- [LAB 04a] Labadi K., Chen H., Amodeo L., "Batch deterministic and stochastic Petri nets: Modelling, Analysis and its Application to Supply Chain", IEEE SMC 2004, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, pp. 4515-4520., October 10-13, 2004.
- [LAB 04b] Labadi K., Chen H., Amodeo L., "Nouvelles propriétés comportementales pour les Réseaux de Petri Lots Déterministes et Stochastiques", Actes de la 2eme conférence de MajecStic'2004. Manifestation des JEunes Chercheurs STIC, Calais France. 13-15, octobre 2004.
- [LAB 05a] Labadi K., Chen H., Amodeo L., "Application des BDSPNs à la Modélisation et à l'Evaluation de Performance des Chaînes Logistiques", JESA - Journal Européen des Systèmes Automatisés, A paraître, 22 pages, Juin 2005.
- [LAB 05b] Labadi K., Chen H., Amodeo L., "Batch Deterministic and Stochastic Petri Nets: Modelling, Analysis and its Application to Inventory Systems", In

Proceedings of the 16th IFAC World Congress in Prague, 6 p., Prague, Czech Republic, 4-8 July 2005.

- [LAB 05c] Labadi K., Chen H., Amodeo L., “Modélisation et évaluation des performances des systèmes de stockage à l’aide des BDSPNs”, Actes du 6eme Congrès International de Génie Industriel, Besançon (France), 10p, 7-10 juin 2005.
- [LAB05] LABADI Karim,"Contribution à la modélisation et l’analyse de performances des systèmes logistiques à l’aide d’un nouveau modèle de RdP stochastiques" . PhD thesis in optimization and safety of systems, University of Troyes,2005.
- [LHW07] LHOMME Walter, ‘Gestion d’énergie de véhicules électriques hybrides basé sur la représentation énergétique macroscopique’, Thèse pour obtenir le grade de Docteur, Ecole Doctorale des Sciences Pour l’ingénieur, l’Université des Sciences et Technologies de Lille, nov, 2007
- [LK00] Q. Liang, N. Karnik, and J. Mendel, “Connection admission control in ATM networks using survey-based type-2 fuzzy logic systems,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, vol. 30, pp. 329–339, Aug. 2000.
- [Lyg04] John Lygeros, Lecture Notes on Hybrid Systems, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Patras Rio, Patras, GR-26500, Greece ENSIETA 2-6/2/2004.
- [MB01] Mohammad, Biglar Begian (2010). Systematic Design of Type-2 Fuzzy Logic Systems for Modeling and Control with Applications to Modular and Reconfigurable Robots. PhD thesis. University of Waterloo.
- [MeMKU02] Mehrabi, M.G., Koren, Y. and Ulsoy, A.G 2002, Trends and perspectives in flexible and reconfigurable Manufacturing Systems, Journal of Intelligent manufacturing, Vol. 13(2), pp. 135-146.
- [Mer74] P.M. Merlin, "A study of recoverability of communication protocols" Ph.D.Thesis, Department of Computer Science, University of California, 1974.
- [Med06] Malika MEDJOU DJ, « Contribution à l’analyse des systèmes pilotés par calculateurs Extraction de scénarios redoutés et vérification de contraintes temporelles », Thèse de docteur de l’Université Paul Sabatier de Toulouse, mars 2006.
- [MJ02] J. Mendel and R. John, “Type-2 fuzzy sets made simple,”IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 10, pp. 117–127, Apr. 2002.
- [Mig02] Domenico Mignone, Control and Estimation of Hybrid Systems with Mathematical Optimization, For the degree of Doctor. Sciences tech. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2002

- [MP92] Z. Manna & A. Pnueli. "The Temporal Logic of Reactive and Concurrent Systems: specification". Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [Pet62] Carl Adams Petri " Communication avec les automates", Université de Darmstad, Allemagne, 1962.
- [Pro03] Gregory Provan, A framework for integrating discrete event system control and diagnosis.
- [Rip99] Patrick Ripoll, Conception d'un système de diagnostic flou appliqué au moteur auto mobile. Thèse de doctorat, En Electronique, Electrotechnique et Automatique, Université de Savoie, France 1999.
- [RQBB11] Ren, Qun, Marek Balazinski and Luc Baron (2011). Type-2 TSK fuzzy logic system and its type-1 counterpart. *International Journal of Computer Applications* 20(6), 8–13. Published by Foundation of Computer Science.
- [SWK10] Sadighi, A. and Won jong Kim (2010). Intelligent sensorless control of a smart-material actuator. In: *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2010 IEEE/ASME International Conference on. pp. 248 –253
- [Ta87] Tavernini.L, "Differential automata and their discrete simulators". *Nonlinear Analysis, Theory. Methods, and Applications*, Vol 11, N° 6, 1987.
- [Tho04] Jean Thomas, Estimation et commande prédictive à horizon glissant des systèmes hybrides., Thèse de Doctorat en Sciences de l'université Paris XI Orsay, 2004
- [TS85] Takagi, T. and M. Sugeno (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics*, IEEE Transactions on SMC-15(1), 116 –132.
- [Tos05] Rosario Toscano, Modélisation, analyse, commande par PID et par retour d'état, diagnostic. TECHNOSUP Ellipses 2005.
- [VA09] Vasiliu. A., Dideban. A. & Alla. H., 2009, 'Control synthesis for manufacturing systems using non-safe Petri nets', *J. of Control Eng. and Applied Informatics* 11(2), 43 – 50.
- [VA10] Vasiliu. A. & Alla.H., 2010, 'Structural optimal control for safe Petri nets', *Int. J. of Control* 83(9), 1810 – 1822.
- [VA11a] Vasiliu. A. & Alla. H., 2011, Border forbidden states and constraints for optimal controller synthesis using generalized Petri nets. *soumission Automatica*.
- [VA11b] Vasiliu. A. & Alla. H., 2011, Control optimality for ordinary Petri nets, *in '18th IFAC World Congress'*, Vol. 18 - 1, Milano, pp. 3599 – 3604.

- [Va12] Andra - Ioana Vasiliu, "Synthèse de contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Pétri". Thèse de Doctorat d'état en Automatique et productique, Université de Grenoble, France, 2012.
- [WHM01] Wu, Hongwei and J.M. Mendel (2001). Introduction to uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems. In: Fuzzy Systems, 2001. The 10th IEEE International Conference on. Vol. 2. pp. 662 – 665 vol.3.
- [WT04] Wu, D. and W.W. Tan (2004). A type-2 fuzzy logic controller for the liquid-level process. In: Fuzzy Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2. pp. 953 – 958 vol.2.
- [WN15] WERRO Nicolas, fuzzy classification of online customers, Springer, 2015, XIII, 141p65, ISBN: 978-3-319-15969-0
- [Zed75] Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - I. InformationSciences 8(3), 199 – 249.
- [ZQ 01] Zaytoon, J. & Quenec'Hdu, Y. "Systèmes dynamiques hybrides, chapter Sur la modélisation des systèmes hybrides". Hermès Science publications, Paris, 2001.

## ملخص

جودة المنتج هي جانب من أهم الجوانب التي تسعى إليها المؤسسات الصغيرة والمتوسطة. في نظام الإنتاج. توجد العديد من المجالات الزمنية و الغير الزمنية التي يجب مثل احترامها، الوزن ونسب المنتج التي تلعب دورا أساسيا في جودة المنتج. تعتمد عملية الإنتاج الصحيحة على نسب معينة من كل مادة أولية. نهجنا في هذه الأطروحة هو نمذجة هذه الأنظمة بشبكة بيتري ذات المجال و لاتخاذ القرار اخترنا التحكم بالمنطق الغامض. لتجسيد عملنا، اخترنا نظام إنتاج الشوكولاتة لشركة صغيرة. لقد قمنا بنمذجة هذا النظام بشبكة بيتري ذات المجال، قمتنا بالتحكم في هذه المجالات بالمنطق غامض النوع الثاني لاتخاذ القرار لان الذوق البشري ليس دقيق تماما. **الكلمات المرشدة:** التحكم الغامض ، ضبط الجودة ، أنظمة التصنيع شبكة بيتري ذات المجال ، المنطق الغامض النوع الثاني، المنطق الغامض "TAKAGI SUGENO".

## Abstract

Product quality is one of the most important aspects of small and medium-sized enterprises. In a production system, several parameters and non-temporal variables must respect very strict Variation intervals, such as weight measurements and product proportions. These parameters also play a fundamental role in the quality of the product. The correct production process is based on a given percentage of each material. Our approach in this thesis is to model these systems by the interval Petri net, and for decision making we associate a fuzzy controller.

To illustrate this approach, we chose a food production system from a small company, producing chocolate. We have modeled this system by an Interval constrained interval Petri net, after applying a type-2 fuzzy controller to these intervals for decision-making assistance taking into account the human culinary aspect which is not all exactly. For this, small variations of assays were allowed around the exact values.

**Keywords:** Fuzzy control, quality control, manufacturing systems, Interval constrained petri net, type-2 fuzzy logic, TAKAGI SUGENO fuzzy logic

## Résumé

La qualité des produits est l'un des principaux aspects des petites et moyennes entreprises. Dans un système de production, plusieurs paramètres et variables non temporelles doivent respecter des intervalles de variation très stricts, tels que les mesures de poids, les proportions des produits. Ces paramètres jouent également un rôle fondamental dans la qualité du produit. Le processus de production correct est basé sur un pourcentage donné de chaque matière. Notre démarche dans ce mémoire consiste à modéliser ces systèmes par le réseau de Pétri à intervalle. Et associé un contrôleur flou pour la prise de décision.

Pour illustrer cette démarche, nous avons choisi un système de production alimentaire d'une petite entreprise, de production de chocolat. Nous avons mobilisé ce système par un réseau de Petri à intervalle, après on a appliqué un contrôleur flou type-2 sur ces intervalles pour une assistance de la prise de décision en tenant compte de l'aspect culinaire humain qui n'est pas tout a fait exact, pour cela, on s'est permis des petites variations de dosages autour des valeurs exacts.

**Mots-clés:** Contrôle flou, contrôle de la qualité, systèmes de fabrication, Réseau de Petri à intervalles, Logique floue type 2, Logique floue TAKAGI SUGENO