

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES
- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيات
الصناعية - عنابة -

Année / 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE
FILIÈRE

GENIE INDUSTRIEL

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

MODILISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION PAR LES
RESEAUX DE PETRI.

Etude de cas : Moulins AMOR BENAMOR -Guelma-

Spécialité

Maintenance et Fiabilité des Systèmes Industriels

Par

SAADOUNE Aicha

SEBIT Sarra

Sous la direction de :

DRISS Imen

Grade

MCB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

ESTI Annaba

Examineurs :

Résumé

Durant la dernière décennie, les systèmes de production ont connu un développement sans précédent, ce qui a conduit à une importante croissance de leur complexité. Pour maîtriser la complexité de tels systèmes, il revient à développer un modèle fiable qui se rapproche le plus possible de la réalité. C'est dans cet objectif que notre travail consiste à modéliser un système de production par les réseaux de Pétri afin de pouvoir mieux comprendre son comportement. Les résultats de la simulation nous ont permis d'analyser le fonctionnement du système réel. Une application est illustrée dans un cas industriel à l'aide de logiciel Sirphyco.

Mots clés : Systèmes de production- Modèle-Réseaux de Pétri- Simulation -Analyser le fonctionnement

Abstract

During the last decade, production systems have experienced unprecedented development, which has led to a significant increase in their complexity. To master the complexity of such systems, it comes down to developing a reliable model the nearest to the reality. It is with this objective our work consists in modeling a production system by Petri nets in order to better understand its behavior. The results of the simulation allowed us to analyze the functioning of the real system. An application is illustrated in an industrial case using Sirphyco software.

Keywords: Production systems- Model- Petri Nets- Simulation -Analyze the functioning

ملخص

خلال العقد الماضي، شهدت أنظمة الإنتاج تطوراً غير مسبوق، مما أدى إلى زيادة كبيرة في تعقيدها. لإتقان تعقيد هذه الأنظمة، فإن ذلك يرجع إلى تطوير نموذج موثوق به أقرب ما يكون إلى الواقع. في ظل هذا الهدف، يتمثل عملنا في نمذجة نظام إنتاج بواسطة شبكات بتري حتى نتأكد من فهم سلوكه بشكل أفضل. سمحت لنا نتائج المحاكات بتحليل أداء النظام الحقيقي. سيتم تقديم تطبيق على حالة صناعية باستخدام برنامج سيرفيكو.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الإنتاج- نموذج- شبكات بتري -المحاكاة- تحليل أداء

REMERCIEMENTS

El hamdo Lilah, nous voudrions remercier tout d'abord ALLAH qui nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'études et la force et la volonté de mener ce travail jusqu'à la fin.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Dr I. Driss pour son encadrement, son aide, ses précieux conseils et le temps qu'elle a consacré à la correction de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à tous l'ensemble du corps professionnel et administratif du département génie industriel ayant contribué à notre formation.

Nos sincères remerciements par avance à l'ensemble des membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Nos vifs remerciements aussi à toute l'équipe des moulins Amor Benamor, Guelma pour leur accueil. Nous tenons plus particulièrement à remercier : monsieur Dali Mehdi pour son aide tout au long de notre stage.

Enfin, nos remerciements vont à nos familles et nos amis qui nous ont toujours encouragés et tous ceux qui ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce présent mémoire tout spécialement à mes adorables parents qui ont toujours eu confiance en moi, pour leurs sacrifices, leurs amours, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chéries sœurs (Ilhem, Sonia, Sabrina, Ahlem, Nardjesse) pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon cher et unique frère Salim, pour son appui et son encouragement, que dieu vous garde pour moi.

A mes amies et toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

Sarra

A mes chers parents,

Pour tout ce qu'ils ont fait pour moi

Pour tous leurs sacrifices, leur amour,

Leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A tous les êtres chers dont le soutien m'a été indispensable

Aicha

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

Abréviation	Désignation
SdP(s)	Système(s) de Production
RdP(s)	Réseau(x) de Pétri
Pré	Prédécesseur
Post	Postérieur
RDG	Réseau de Pétri généralisé
RDO	Réseau de Pétri ordinaire
RdPC	Réseau de Pétri coloré
RDPS	Réseaux de Pétri stochastiques
MAB	Moulins Amor Benamor
MP	Matière première
SBS	Machine d’emballage en film
PF	Produit Finis
RW	Matière à réutiliser
SIRPHYCO	Simulation des réseaux de pétri hybrides et continus

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure I. 1 : Les problèmes liés au système de production	4
Figure I. 2 : Schéma d'un SdP	7
Figure I.3 : La procédure de la modélisation	12
Figure II.1 : Une représentation d'un RDP	19
Figure II.2 : Exemple de franchissement	22
Figure II.3 : Structure du Parallélisme	24
Figure II.4 : Synchronisation Mutuelle	25
Figure II.5 : Synchronisation par Sémaphore	26
Figure II .6: Structure de Partage de Ressources	27
Figure II.7 : Synchronisation par Mémoire	27
Figure III.1 : Les moulins Amor Benamor -d'El-Fedjoudj – Guelma	30
Figure III.2 : Processus de fabrication de couscous	33
Figure III.3 : Les étapes de conditionnement des pâtes alimentaires	35
Figure III.4 : Processus de production des pâtes alimentaires	37
Figure III.5 : Diagramme de flux du processus de production des pâtes courtes	40
Figure III.6 : Modélisation de la ligne des pâtes courtes au niveau des moulins AMOR BENAMOR, Guelma par les réseaux de Pétri	42
Figure III.7 : Modélisation de la partie séchage et refroidissement des pâtes courtes au niveau des moulins AMOR BENAMOR, Guelma par les réseaux de Pétri	48
Figure III.8 : Scénario 1	49
Figure III.9 : Scénario 2	50
Figure III.10 : Scénario 3	51
Figure III.11 : Scénario 4	52
Figure III.12 : Scénario 5	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau III.1 : La capacité actuelle de production d'entreprise	31
Tableau III.2 : Description des places	44
Tableau III.3 : Description des transitions	45

TABLE DE MATIERE

ACRONYMES ET ABREVIATIONS	I
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES TABLEAUX	III
TABLE DE MATIERE	IV
Introduction générale.....	1
 CHAPITRE 1 :Généralités sur les Systèmes deProduction.....	3
Introduction	4
I- Le système de production dans l'entreprise :	5
I-1 Définitions :	5
I-2 Décomposition du système de production :.....	6
I-2-1 Partie opérative	6
I-2-2 Partie pilotage	6
I-3 Les caractéristiques et les performances de système de production :	7
I-4 Les typologies de systèmes de production :	8
II- Modélisation des systèmes de production :.....	9
II-1 Définitions :	9
II-2 Choix de modélisation :	10
II-3 Les objectifs de la modélisation :	11
II-4 Procédure de la modélisation :	11
II-5 Les outils de modélisation des systèmes de production :	12
II-5-1 La modélisation mathématique :.....	13
II-5-2 La modélisation informatique :.....	13
III- La simulation des systèmes de production :	14
III-1 Définition de la simulation	14
III-2 Les limites de la simulation :.....	15
III-3 Le rôle de la simulation dans les systèmes de production :.....	15
Conclusion :.....	16
 CHAPITRE 2 :Les réseaux de Pétri	17

Introduction :	18
I-Historique :	18
II-Concepts de base :	19
III- Les propriétés des réseaux de Pétri :	20
III-1-Les Propriétés Structurelles	20
III-2- Les Propriétés Comportementales	21
IV-Principe de fonctionnement :	22
V- Les types des réseaux de Pétri :	23
VI-Modélisation des systèmes par les réseaux de Pétri :	24
VI-1- Parallélisme :	24
VI-2-Synchronisation :	25
VI-3-Partage de ressources :	26
VI-4- Mémorisation :	27
Conclusion :	28
 CHAPITRE3 :Etude de cas	 29
Introduction	30
I- Présentation de l'entreprise.....	30
I-1 Historique.....	30
I-2 La mission de l'unité.....	31
I-3 Processus de fabrication.....	31
I-3-1 Processus de fabrication de couscous :	32
I-3-2 Processus de fabrication des pâtes alimentaires :	33
I-3-2-1 Description de la ligne de production des pâtes courtes.....	37
II-Modélisation du système de production des pâtes courtes par les RdP	41
II-1 Présentation du modèle par les réseaux de Pétri :	41
II-2 Description du modèle.....	43
III- La simulation du modèle.....	47
III-1 Présentation de logiciel	47
III-2 Résultats de la simulation :	47
III-2-1 Présentation des scénarios :	48
III-2-2 Analyse des résultats.....	54
Conclusion :	54

Conclusion générale et perspectives	56
Bibliographie	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le développement industriel a conduit à la croissance rapide et la complexité des systèmes de production (SdP). Cette complexité exige la représentation du système de production sous forme de modèle, afin de mieux étudier et analyser son comportement.

La compréhension d'un système réel de production est un point clé pour maîtriser son contrôle, pour cela il faut mettre au point une représentation adéquate du système lui-même, en développant un modèle fiable le plus proche possible de la réalité.

Il est donc fondamental de disposer d'outils efficaces pour la modélisation et l'analyse du comportement dynamique des processus de production industriel. Les réseaux de Pétri sont parmi les outils les plus utilisés dans ce domaine, ils offrent une représentation graphique permettant une description simplifiée du fonctionnement du système, ils permettent aussi de vérifier le blocage et la validité du système modélisé par une simulation fidèle de son comportement.

Dans ce mémoire nous avons abordé comme problématique la modélisation et la simulation du système de production complexe à l'aide des réseaux de pétri.

Notre travail a pour principal objectif de maîtriser la complexité du système de production et l'analyse de son comportement. Ainsi, l'approche utilisée consiste à l'utilisation conjointe de l'outil RdP et le logiciel SIRPYCO afin de générer un modèle permettant l'évaluation du fonctionnement du processus de production.

Pour atteindre ces objectifs avoués, une modélisation et simulation de processus de production des pâtes courtes est réalisé au sien des moulins Amor Benamor.

Dans ce contexte, le mémoire comporte trois chapitres et organisé de la façon suivante : Dans le premier chapitre, nous abordons des généralités sur les systèmes de production, et des notions de modélisation et simulations des SdP.

Dans le deuxième chapitre, nous faisons une étude générale sur les réseaux de Pétri, en commençant par des concepts de base, leurs propriétés, leurs types et nous terminons par la modélisation des systèmes par les réseaux de pétri.

Introduction Générale

Le troisième chapitre présente une application des idées présentées dans ce mémoire à la modélisation et la simulation d'un système réel : ligne de production des pâtes courtes aux moulins Amor Benamor, Guelma. Ce chapitre est devisé en deux parties :

- ✓ La première partie présente une description de l'entreprise et le système de production étudié.
- ✓ La deuxième partie est consacrée à la modélisation de ce système et aux résultats de la simulation par le logiciel SIRPHYCO.

Enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale avec quelques perspectives du travail.

CHAPITRE 1 :
Généralités sur les Systèmes de
Production

Introduction

Le système de production est caractérisé par plusieurs facteurs agissant sur son performance. L'évaluation de la performance d'un système de production nécessite la connaissance de sa structure, sa composition, ses différentes fonctions, sa nature, ses conditions d'exploitation et son environnement.

La complexité sans cesse croissante des systèmes de production a fait de la modélisation et du pilotage un des moyens les plus répandus et, dans certains cas, le seul dont on dispose pour l'étude de ces systèmes. L'utilisation d'un modèle nous permet de mieux observer et comprendre le fonctionnement du système réel sans avoir à le réaliser physiquement, ce qui nous épargne le coût et le temps à dépenser pour matérialiser ce système qui nous sera moins facile à manipuler réellement pour une bonne expérimentation.

Ensuite, par simulation, il est possible de mesurer l'impact relatif de chacune de ces composantes sur la performance globale du système de production.

Nous commencerons ce chapitre par un survol de la littérature sur les SdPs .Puis la modélisation d'un système de production dans l'industrie et les différents outils de la modélisation. Et nous finissons par la simulation des systèmes de production.

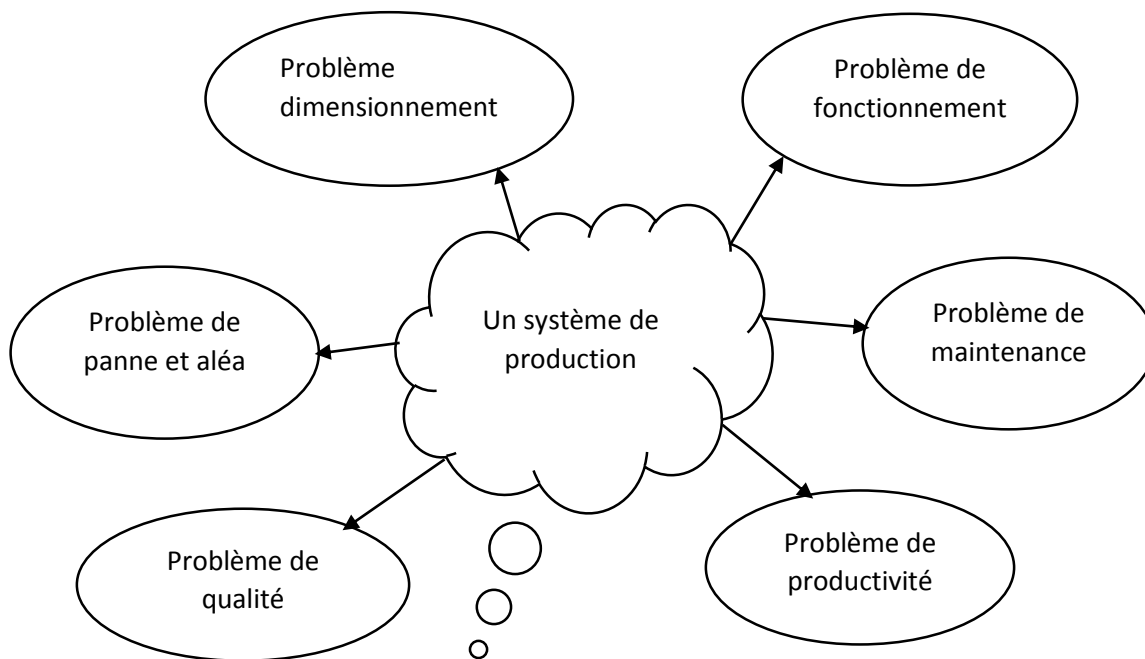


Figure I.1 : Les problèmes liés au système de production. [ZEG 15]

I- Le système de production dans l'entreprise :**I-1 Définitions :**

- ❖ **Un système :** Le terme *système* couvre un large champ d'application, car il peut être utilisé dans de nombreux domaines. Il existe de nombreuses définitions :
 - ✓ Un système est une Combinaison de parties qui se coordonnent, pour concourir à un résultat de manière à former un ensemble [Larousse].
 - ✓ Ensemble d'éléments matériels ou immatériels en interaction, organisés pour l'accomplissement d'une certaine mission. [KER 16]

- ❖ **La production :**
 - ✓ Est une opération de transformation qui convertit des matières premières en produits finis plus élaborés et de valeur économique plus élevée. [XIA 94]
 - ✓ Est l'activité qui consiste à transformer des intrants (inputs : les facteurs de productions, les matières premières, travail, équipement, énergie, informations...) en extrants (out put) qui représentent les produits de l'entreprise (biens ou services). L'ensemble de ces facteurs et la façon dont ils sont mis en œuvre constituent la fonction de production. [KHO 19]

- ❖ **Le système de production :** il existe plusieurs définitions proposées aux systèmes de production on peut citer quelque une :
 - ✓ Un système de production est un ensemble de ressources qui permettent cette transformation. Dans cet ensemble, on distingue essentiellement quatre types de ressources : des équipements (machines, outils, moyens de transport, moyens informatiques, ...), des moyens humains qui permettent le bon déroulement du processus de transformation, des produits à différentes étapes de fabrication (matières premières, produits semi-finis, produits finis, ...), des entrepôts de matières ou des aires de stockage. [XIA 94]
 - ✓ Un système de production (SdP) est un espace constitué de produits (P), de moyens de production (M) et d'opérateurs (O) en interaction entre eux. L'établissement, le contrôle et l'exploitation des liens entre eux sont du ressort des outils de pilotage. Les événements associés aux SdPs sont situés dans l'espace (P, M, O, temps). [NAS 13]

- ✓ Un système de production est une organisation dont la fonction est d'offrir des biens ou des services. Il se voit assigné des objectifs, physiques, monétaires ou sociaux, et ses résultats sont mesurés à l'aide d'indicateurs de performance à partir desquels sont menés des actions comme la ré-conception, l'amélioration, l'optimisation, etc. Les concepteurs, les exploitants du système de production attendent donc que les processus (physiques et informationnels), les ressources (équipements, matières, hommes, ...etc.), les acteurs qui composent le système de production, concourent aux multiples objectifs assignés. [KOR 09]

I-2 Décomposition du système de production :

Un SdP se décompose en deux parties complémentaires, la partie opérative et la partie pilotage : [NAS 13]

I-2-1 Partie opérative

La partie opérative ou système de fabrication met en jeu de manière conventionnelle des entités appartenant à trois populations : la population des moyens de production, la population des produits et la population des opérateurs de production.

- Les moyens de production regroupent les ressources physiques de l'atelier à savoir les ressources de traitement ou les machines et les ressources de transport qui assurent la manutention entre les ressources.
- Les produits qui sont caractérisés par leur gamme de fabrication ou la gamme opératoire. Cette dernière représente la suite ordonnée d'opérations à effectuer pour fabriquer ce produit. Chaque opération peut être exécutée par une ou plusieurs machines suivant un temps opératoire donné. Nous introduisons la notion de routage comme la suite ordonnée des moyens de production que visite le produit durant sa fabrication.
- Les opérateurs de production représentent les ressources humaines.

I-2-2 Partie pilotage

La partie pilotage a pour rôle d'élaborer les décisions nécessaires à la partie opérative, de guider et piloter afin de satisfaire les objectifs de production.

Les décisions portent sur les actions à mener par le procédé sur le produit. Ces actions sont élaborées à partir des informations (comptes rendus) recueillies sur le procédé ou sur le produit, on identifie deux niveaux de décision :

- *Niveau 1* : La gestion prévisionnelle, qui anticipe la programmation d'un ensemble de décisions afin de satisfaire les besoins des clients.
- *Niveau 2* : Le pilotage, qui développe les décisions en temps réel. [NAS 13]

Un schéma simplifié des systèmes de production est représenté par la figure I.2

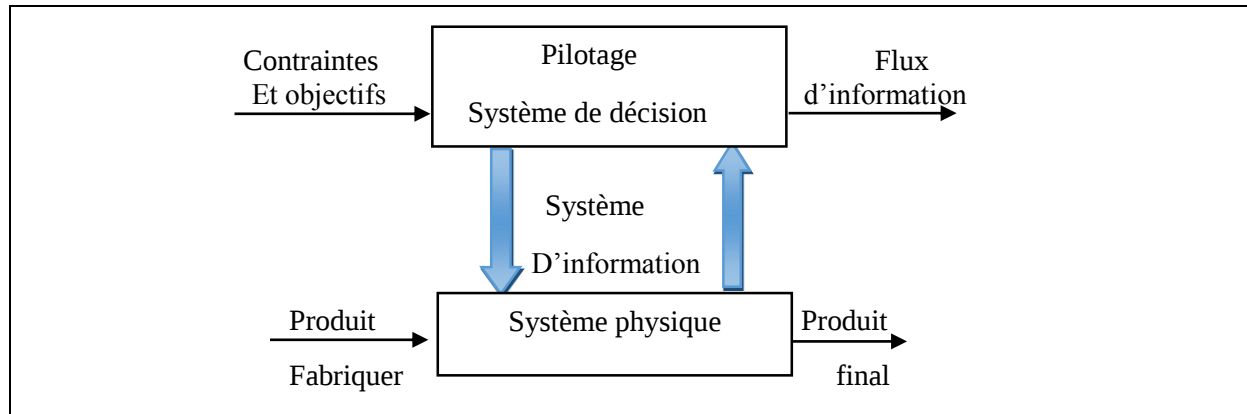


Figure I.2 : Schéma d'un SdP

I-3 Les caractéristiques et les performances de système de production :

Il existe plusieurs caractéristiques de système de production on peut citer :

- **Flexibilité** : La flexibilité des systèmes de production est la possibilité pour un décideur de pouvoir à tout moment reconsidérer ses choix de manière à maintenir l'optimalité de sa décision
- **Réactivité** : La réactivité d'un système de production est l'aptitude à répondre (réagir) dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe .C'est à dire qu'il doit avoir une conduite qui lui permette de réagir et de s'adapter, en fonction des objectifs de production, aux fluctuations des besoins et aux aléas du système .Par rapport au régime (fonctionnement) permanent (stable)
- **Proactivité** : La proactivité d'un système de production est sa capacités d'anticipation (prévoir et/ou provoquer) des changements d'état, d'apprentissage et d'enrichissement des connaissances, d'adaptation de ses règles de fonctionnement et par sa capacité de réorganisation reposant sur une architecture décentralisée et une délégation de responsabilité.

- **Robustesse :** La robustesse d'un système de production se définit par son aptitude à produire conformément aux résultats attendus. Cela suppose la garantie de l'obtention des performances souhaitées en présence d'incertitudes dans le système [TN : 11]

I-4 Les typologies de systèmes de production :

Les entreprises de productions sont répartir généralement en quatre catégories, même si dans certains cas un système peut prendre certaines caractéristiques que l'on peut retrouver dans plusieurs classes différentes. [TAG 11]

A. Production unitaire :

Ce type de production également désigné sous l'appellation de projet dans le cas d'une unité importante de construction est celui de la production artisanale et aussi celui de la réalisation de grands ouvrages. Leur point commun est la taille du produit qui oblige à tout organiser autour du chantier où l'unité doit être produite en une seule édition ou un petit nombre à la fois, avec souvent des modifications et des améliorations techniques d'une unité à l'autre.

B. Production en petite et moyenne série :

C'est la production par lots, elle est caractérisée par le fait que le produit est plus ou moins de taille modeste pour que ce produit se déplace de machine en machine dans un même atelier ou un groupe d'ateliers. Dans cette typologie le procédé de fabrication de produit est exprimé par la gamme de fabrication ou routage. La gamme de production d'un article est l'énumération de la succession des actions et autres événements nécessaires à la réalisation de l'article en question.

C. Production en grande série

Ce type de production est qualifié de production de masse, lorsque le nombre de produits à fabriquer augmente suffisamment il serait intéressant de constituer des installations dédiées. Une chaîne de production représente un ensemble de machines différentes dans l'ordre même dans lequel les opérations doivent être effectuées pour minimiser les temps de transfert et d'attente. Il faut que les machines aient le même rendement et le même débit et que les problèmes des aléas puissent être résolus rapidement avant d'entraîner l'arrêt complet de la chaîne. Toutes ces conditions font généralement une nécessité d'avoir une surcapacité en ressources humaines et matérielles impliquant des investissements importants.

D. Production en continu :

La production en continu est en fait un cas particulier de la production en grande série. C'est une chaîne parfaitement équilibrée où il n'y a pas de stocks intermédiaires et toutes les machines qui constituent cette chaîne ont le même débit. Cependant, traditionnellement, on réserve ce terme au cas où les matières et les produits se présentent sous forme liquide (ou du moins pouvant circuler dans des canalisations) ou sous forme gazeuse. Ce type de production concerne par exemple la production en raffinerie, chimie, sidérurgie ou en industrie du verre et du ciment. Il fait souvent intervenir des matières premières. [TAG 11]

II- Modélisation des systèmes de production :

La modélisation d'un système de production est un problème complexe. Disposer d'un « bon » modèle pour un système donné apporte une aide indispensable aux concepteurs (systèmes en cours de conception) ainsi qu'aux utilisateurs finaux (systèmes en exploitation). Si théoriquement il est toujours possible de trouver un modèle capable de représenter la dynamique d'un système de production, en pratique cette représentation est souvent une tâche très difficile. En effet, la majorité des méthodes existantes sont restreintes à des classes particulières de systèmes. De plus, nombreuses sont les méthodes décrites dans la littérature qui, quoique bien formalisées mathématiquement, restent très difficiles à implanter pratiquement. Dans ce cadre, afin de faciliter l'étude des systèmes de production, de nombreuses hypothèses concernant la structure du système, sa dynamique et son environnement (les aléas pouvant survenir) sont souvent posées.

D'un point de vue pratique, il est important d'insister sur le fait qu'un modèle ne peut pas représenter de façon exacte le comportement d'un système réel. En effet, bien qu'il s'adapte à un aspect particulier du système, le modèle ne peut pas le représenter dans sa globalité. De ce fait, le choix de l'outil de modélisation ou de représentation doit dépendre des propriétés du système qu'on désire exhiber dans le modèle. [ZEG 15]

II-1 Définitions :

- ❖ **La modélisation** : est l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène, raisonnement visant

notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles [TAL 12]

- ❖ **un modèle** : C'est l'abstraction (plus au moins formelle) d'une réalité (ou univers du discours) exprimée à l'aide de formalisme (ou langage) défini par des concepts de modélisation selon les besoins de l'utilisateur. Il s'agit de décrire l'organisation et les processus opérationnels d'une entreprise soit dans le but de simuler ces processus pour comparer divers scénarii, soit dans le but de les analyser et de les restructurer pour améliorer les performances de l'entreprise. [ZEG 15]

II-2 Choix de modélisation :

En vue d'une modélisation, tout système doit être appréhendé selon une vue externe et une vue interne. La vue externe décrit l'environnement du système ainsi que la finalité (les fonctions) du système dans cet environnement (ce pour quoi il a été conçu). La vue interne décrit tous les constituants du système et leurs interactions.

A. Modélisation externe des systèmes de production :

La vue externe met en évidence, pour un système donné, son rôle et ses interactions vis-à-vis de son environnement. Il s'agit des buts « de mission », qui caractérisent les sorties du système, attendues par son environnement. [SPE 05] Les paramètres composant l'environnement d'une entreprise sont nombreux. Tous sont variables au cours du temps et influent sur le fonctionnement de l'entreprise, avec un impact plus ou moins important. Parmi ces facteurs on peut citer :

- ✓ Les facteurs financiers et économiques (inflation, croissance économique, ...), qui ont une incidence sur la politique de l'entreprise ;
- ✓ Les facteurs de marché, qui caractérisent l'environnement commercial de l'entreprise : ses fournisseurs, ses clients, ses sous-traitants, mais aussi ses concurrents. En amont, il s'agit du poids commercial des fournisseurs et plus généralement de l'évolution du prix des matières premières. En aval, il s'agit du marché des clients de l'entreprise, qui caractérise la demande.
- ✓ Les facteurs technologiques, qui permettent aux entreprises d'espérer des avantages concurrentiels (irruption de nouveaux matériaux, intégration de nouveaux procédés, ...).

B. Modélisation interne des systèmes de production :

La modélisation interne des systèmes de production sont répartie en deux vue : fonctionnelle et organique ; [SPE 05]

- ✓ **Modélisation fonctionnelle** : La vue fonctionnelle d'un système décrit les fonctions internes permettant à celui-ci d'exercer les fonctions externes mentionnées au paragraphe précédent, sans présomption de l'organisation elle-même.
- ✓ **Modélisation organique** : La modélisation organique d'un système décrit l'organisation des ressources rendant le système opérant. Il s'agit donc de rendre compte de la manière dont les fonctionnalités du système sont réalisées. En conséquence, la modélisation organique d'un système décrit une réalisation. Elle procure une description des ressources utilisées (ateliers, machines, stocks), et de la dynamique des flux matériels et informationnels entre ces ressources.

II-3 Les objectifs de la modélisation :

Les objectifs de la modélisation sont les suivants :

- ✓ Une meilleure compréhension du système
- ✓ Une mesure de performance du système
- ✓ Un dimensionnement/optimisation de systèmes de production (avant/après réalisation)
- ✓ Une réponse aux questions « Que se passe-t-il...si ...? »
- ✓ Un outil d'aide à la décision en « temps réel » (durant exploitation)
- ✓ Un outil de formation du personnel (simulateurs de vol, simulateurs de choix...) [CHE 07]

II-4 Procédure de la modélisation :

La procédure de la modélisation est une phase essentielle à la simulation. Différents points doivent être abordés :

- Définir l'objectif de la modélisation : Pourquoi modélise-t-on ? Qu'étudie-t-on ? Que veut-on améliorer, ou faire ?
- Définir les éléments du système (la réalisation d'une fonction, ou d'un processus) et les limites du système (les entrées, les sorties).
- Définir les interactions entre ces éléments (hiérarchie).

- Définir la dynamique du système (entités qui circulent entre les éléments, comportement du système au cours du temps).
- Abstraction (choisir les éléments du système pertinents pour l'étude).
- Formalisation, conceptualisation : Modèle mathématique (algèbre ($max, +$), chaînes de Markov), modèle logiciel (*Simulink*, *Siman-Arena*), modèle graphique (réseaux de Pétri), [BOI 01]

La figure I.3 représente la procédure de la modélisation

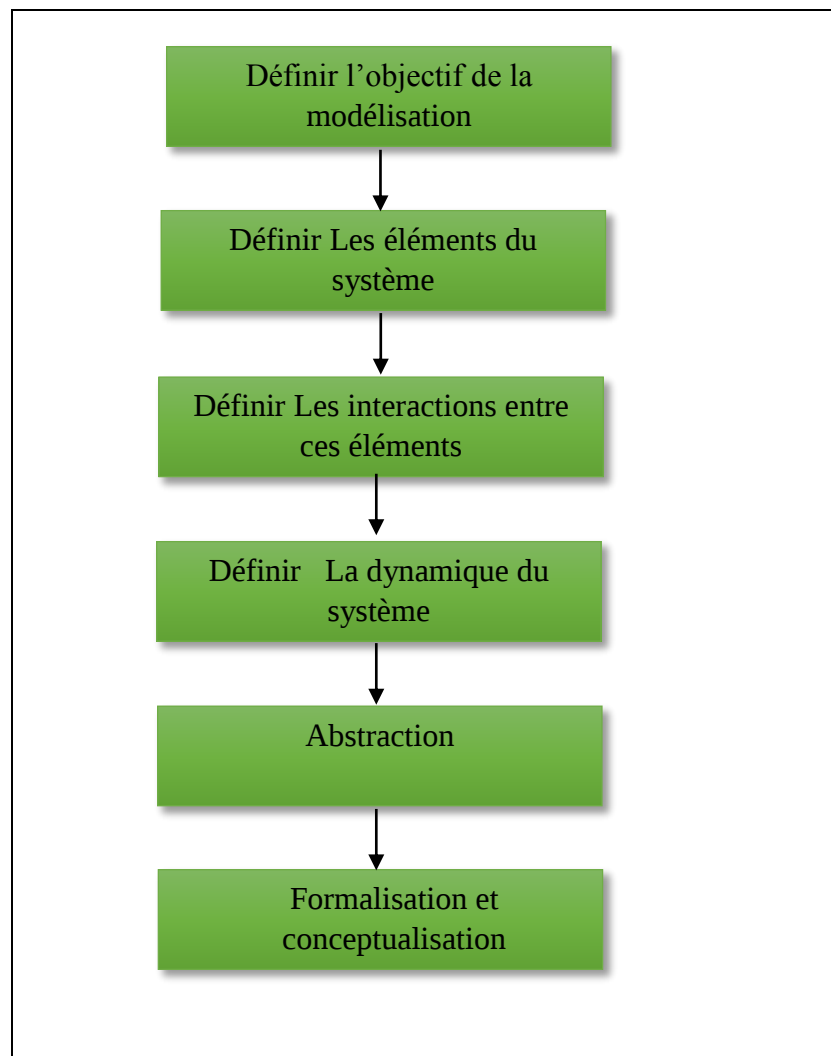


Figure I.3 : La procédure de la modélisation

II-5 Les outils de modélisation des systèmes de production :

Dans ce qui suit, nous présentons quelques outils de modélisation mathématique et informatique, souvent citée dans les travaux de modélisation : [BEN 09]

II-5-1 La modélisation mathématique :

Les fondements des méthodes analytiques sont à la base d'outils assez pratiques, fréquemment utilisés dans l'évaluation des performances des SdPs. Ces méthodes exigent qu'un modèle mathématique soit d'abord trouvé pour représenter le système étudié et que l'on dispose des outils mathématiques qui permettent d'étudier ce modèle. Les méthodes qui permettent d'étudier un système de production de façon analytique sont nombreuses on peut citer :

- **les chaînes de Markov** : sont utilisées dans la modélisation des systèmes stochastiques et dans lesquelles on définit l'état d'un système par un comportement entièrement probabiliste,
- **Les réseaux de Pétri** : Un réseau de Pétri décrit graphiquement la structure d'un système distribué comme un graphe direct biparti avec annotations [que nous étudions dans le chapitre 2]
- **Les réseaux files d'attente** : la théorie des files d'attente consiste à représenter le système sous forme d'un réseau de serveurs, de zones d'attente et de clients. La théorie des files d'attente fut développée pour fournir des modèles permettant de prévoir le comportement de systèmes répondant à des demandes aléatoires.
- **Les réseaux Bayésien** : Les réseaux bayésiens, sont des modèles graphiques interprétés à partir de systèmes experts probabilistes pour représenter des relations qualitatives et quantitatives entre plusieurs variables au travers de dépendances et de probabilités conditionnelles. Ils sont encore peu connus et utilisés en fiabilité mais tendent à émerger pour répondre à des problématiques d'optimisation des politiques de maintenance.

II-5-2 La modélisation informatique :

- **Le modèle entité / association** : Le modèle Entité/Association a été proposé pour la modélisation des données et des liens existant entre elles, avec des concepts simples et efficaces. C'est une représentation naturelle du monde réel du système à étudier. Il est bâti autour de trois concepts : Entité, Association et Propriétés et permet une description graphique.
- **Le modèle relationnel** : Ce modèle permet une description tabulaire de données ou les données sont structurées en tables (relations). De plus, l'algèbre relationnelle

permet la manipulation de ces données en s'appuyant sur la théorie des ensembles. Le succès du modèle relationnel auprès des chercheurs, concepteurs et utilisateurs est dû à la puissance et à la simplicité de ses concepts donc facile à comprendre par les utilisateurs. [BEN 09]

III- La simulation des systèmes de production :

La simulation est une méthode qui consiste à étudier le fonctionnement d'un système en imitant son fonctionnement au cours du temps en manipulant un modèle. Cette méthode est basée sur la génération d'un historique artificiel des changements d'état du système (une trajectoire d'état) et l'observation et l'analyse de cet historique pour faire des déductions sur ses caractéristiques de fonctionnement. La simulation est devenue incontournable et pratique permettant de modéliser aussi bien des systèmes à concevoir que des systèmes existants déjà pour analyser et valider des choix des solutions.

III-1 Définition de la simulation

Il existe plusieurs définitions de la simulation on peut citer :

- ❖ Selon Pritsker « *La **simulation** est l'étude du comportement dynamique d'un système, grâce à un modèle que l'on fait évoluer dans le temps en fonction de règles bien définies, à des fins de prédiction.* ». [PRI 87]
- ❖ La simulation est une technique de modélisation qui consiste à reproduire le comportement dynamique d'un système sur ordinateur afin de mieux le connaître, de mieux maîtriser son évolution dans le temps dans un environnement donné ; et d'évaluer ses performances. [XIA 94]

À partir de ces définition, on peut dire que le terme de simulation pourrait être caractérisé par :

- ✓ un élément fondamental qui est le *modèle*.
- ✓ Le modèle est *manipulé* sur ordinateur, cette manipulation fournissant des solutions.
- ✓ Les solutions trouvées sont celles du modèle et non du système modélisé.
- ✓ Son but est de choisir parmi les solutions celle qui semble être la meilleure. [KER 16]

- **La simulation de Système de production :**

La simulation des SdP est le développement des expériences sur un modèle et l'évaluation des performances d'un système pour répondre à un problème donné en déroulant l'historique de son fonctionnement. [CHE 07]

III-2 Les limites de la simulation :

Certaines limites sont dues à la technique elle-même, d'autres sont dues aux produits actuellement disponibles sur le marché (notons qu'une formation sur les logiciels utilisés est souvent nécessaire) :

- La programmation demande un certain niveau d'expertise. La qualité des résultats fournis lors de l'analyse des solutions est liée à la qualité de la modélisation et au savoir-faire du « modélisateur »
- La simulation n'est pas une technique d'optimisation au sens propre. Elle ne peut qu'établir les performances d'une solution conçue et imaginée par l'utilisateur. C'est une technique entièrement itérative qui ne propose pas de solution finale mais qui permet seulement à l'utilisateur d'envisager des choix possibles. En tout état de cause, c'est lui qui devra décider de ce qui répond le mieux aux problèmes posés.
- Les résultats de simulation sont souvent complexes à interpréter. On étudie des phénomènes aléatoires et les techniques d'analyse demandent de la rigueur ; il est souvent difficile de faire la part du crucial et de l'anecdotique (le modèle doit être ni trop grossier, ni trop précis).
- Souvent pour des raisons financières, on doit aller au plus vite vers une solution finale (sans passer trop de temps à explorer d'autres solutions intermédiaires). [BOI 01]

III-3 Le rôle de la simulation dans les systèmes de production :

- ✓ Analyse, conception et dimensionnement de systèmes de production (de biens et de service), de télécommunication, etc.
- ✓ Évaluation des performances de nouvelles politiques de gestion de production
- ✓ Évaluation des performances de politiques d'ordonnancement
- ✓ Étude de politiques d'affectation du personnel
- ✓ Etude de la sensibilité du nombre de kanbans sur les mesures de performances
- ✓ Analyse financière ou économique [CHE 07]

Conclusion :

Le problème de la modélisation des systèmes de production consiste à trouver une correspondance entre le monde réel et un modèle informatique. Dans le domaine de la productique, ce problème est plus difficile en raison du nombre et de la diversité des paramètres à prendre en compte et de la complexité des relations entre ces paramètres.

Dans ce chapitre, on a effectué une brève présentation sur la modélisation des systèmes de production : définitions, choix de modélisation, buts de la modélisation, les étapes de modélisation et les outils pour la modélisation des systèmes de production.

Parmi les différents outils de modélisation nous avons utilisé une approche mathématique par réseaux de Pétri fait l'objet de chapitre suivant.

CHAPITRE 2 :

Les réseaux de Pétri

Introduction :

Les réseaux de Pétri sont un outil mathématique puisant dans le domaine de la modélisation et de la vérification des systèmes. Ils présentent des caractéristiques intéressantes telles que la modélisation et la visualisation de comportements parallèles, de la synchronisation et partage de ressources. De plus les RdPs s'adaptent très bien à la simulation lorsque le système modélisé est trop complexe pour autoriser une étude analytique.

Ce chapitre est consacré à des rappels de définitions concernant les réseaux de Pétri, leurs différentes propriétés, leurs règles de fonctionnement, leurs types et la modélisation par RdP.

I-Historique :

Carl-Adam Petri est un mathématicien allemand contemporain qui a défini un outil mathématique très général permettant de décrire des relations existant entre des conditions et des événements. Ce travail a été effectué dans les années 1960-1962. Depuis, ces réseaux ont donné lieu à de nombreuses recherches. Un peu aux Etats-Unis, notamment les travaux effectués au MIT (Massachusetts Institute of Technology) au début des années 70, mais surtout en Europe, depuis. L'Européen Workshop (devenu International Conference en 1989) sur la théorie et les applications des réseaux de Petri qui se tient annuellement depuis 1980 est certainement la conférence internationale où le plus grand nombre de résultats ont été présentés sur le sujet. Cet outil est riche. Il permet des analyses qualitatives. Il a encore été enrichi par divers chercheurs pour permettre des descriptions plus condensées et/ou faisant intervenir le facteur temps : réseaux de Pétri temporisés, interprétés, stochastiques, colorés, continus. [XIE 95]

C'est un outil de modélisation utilisé généralement en phase préliminaire de conception de système pour leur spécification fonctionnelle, modélisation et évaluation.

Les principaux utilisateurs de ces réseaux sont les informaticiens et les automaticiens. Cependant c'est un outil assez général pour modéliser des phénomènes très variés. Il permet notamment :

- ✓ la modélisation des systèmes informatiques
- ✓ l'évaluation des performances des systèmes discrets, des interfaces homme-machine
- ✓ la commande des ateliers de fabrication

- ✓ la conception de systèmes temps réel
- ✓ la modélisation des protocoles de communication
- ✓ la modélisation des chaînes de production (de fabrication)

En fait, tout système dans lequel circulent objets et information. [MOR 02]

II-Concepts de base :

Un réseau de Pétri est un graphe biparti orienté (ayant des places et des transitions) : les places sont représentées par des cercles et les transitions par des rectangles. Les arcs du graphe ne peuvent relier que des places vers des transitions, ou des transitions vers des places. Chaque arc possède un entier positif qui représente son poids [BM 13]. Le marquage d'un RdP est représenté par la distribution de jetons dans l'ensemble de ses places telle que chaque place peut contenir un ou plusieurs jetons représentés par des points dans le cercle représentant la place. [DEB 19]

La figure II.1 montre un exemple d'un réseau de Pétri.

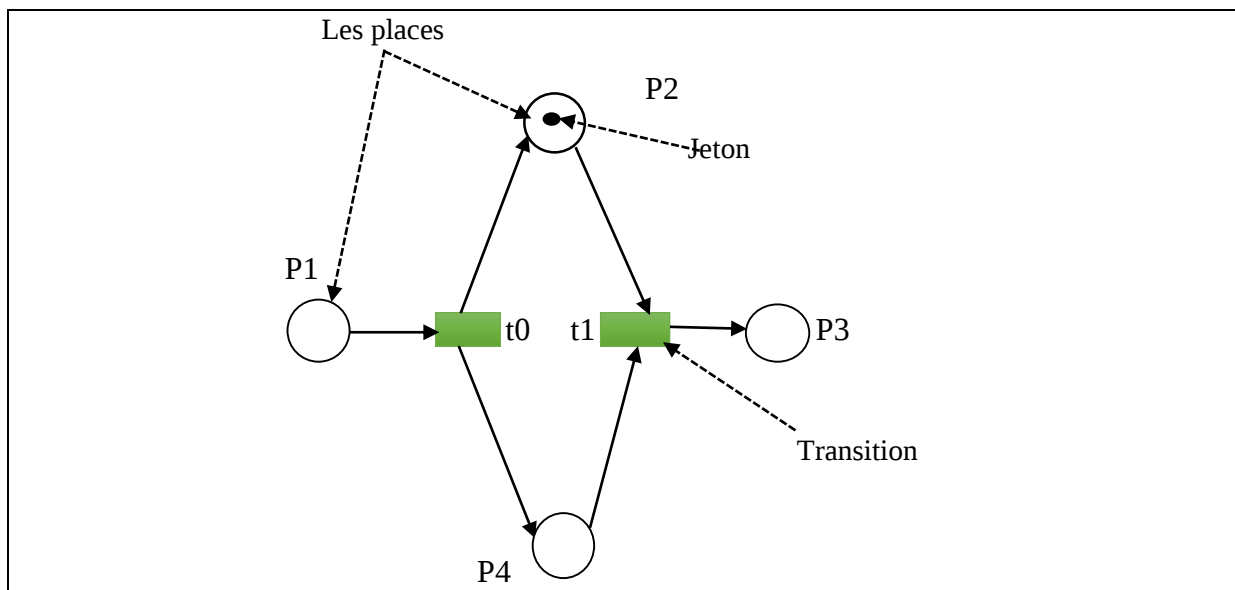


Figure II.1 : Une représentation d'un RdP

De façon plus formelle, un RdP peut-être défini par le 5-uplet $\langle P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0 \rangle$ tel que :

- ✓ $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ est un ensemble fini et non vide de places. Il contient des éléments (P_i) qui vont modéliser les ressources utilisées dans le système.
- ✓ $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est un ensemble fini et non vide de transitions. Il contient des éléments (T_j) qui vont modéliser les actions sur les ressources.

- ✓ $\text{Pré} : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ est l'application d'incidence avant. $\text{Pré}(p, t)$ est une valeur (un poids ≥ 0) associée à l'arc allant de la place p à la transition t
- ✓ $\text{Post} : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ est l'application d'incidence arrière. $\text{Post}(t, p)$ est une valeur (un poids ≥ 0) associée à l'arc allant de la transition t à la place p .
- ✓ Marquage des places : les places sont marquées par des jetons (points noirs) qui vont circuler dans les places selon certaines règles. Cette circulation symbolise l'évolution dynamique du système. Le marquage initial (M_0) donne la position initiale des jetons. [BOI 01]

❖ Représentation matricielle :

- On appelle matrice d'incidence Pré, la matrice $m \times n$ (m représente le nombre de places et n le nombre de transitions) à coefficients dans N tel que $\text{Pré}(i, j) = \text{Pré}(p_i, t_j)$, qui indique le nombre de jetons que doit contenir la place p_i pour que la transition t_j devienne franchissable.
- On appelle la matrice d'incidence Post, la matrice $m \times n$ tel que $\text{Post}(i, j) = \text{Post}(p_i, t_j)$ contient le nombre de jetons déposées dans P_i alors du franchissement de la transition t_j .
- On appelle la matrice d'incidence du réseau $C = \text{Post} - \text{Pré}$. Le marquage d'un réseau de Pétri est représenté par un vecteur de dimension m à coefficients dans N . [KER 16]

III- Les propriétés des réseaux de Pétri :

III-1-Les Propriétés Structurelles

Les propriétés structurelles dépendent uniquement de la topologie du réseau. Il s'agit de faire ressortir les propriétés statiques du système étudié. [MUR 89] :

- ✓ **Les conflits** : Un conflit structurel correspond à un ensemble d'au moins deux transitions T_1 et T_2 avec une place d'entrée en commun. Ceci est noté comme suit : $k = \langle P, \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \rangle$

Un conflit effectif est l'existence d'un conflit structurel k , et d'un marquage M , tel que le nombre de marques dans p est inférieur au nombre de transitions de sortie de P qui sont validées par M . [BOU 13]

- ✓ **RdP à choix libre** : Un réseau de Pétri à choix libre est un réseau dans lequel pour tout conflit ($k = \langle P_i, \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \rangle$) aucune des transitions $T_1, T_2, \dots, T_n$ ne possède aucune autre place d'entrée que P_i .
- ✓ **RdP simple** : Un réseau de Pétri simple est un réseau de Pétri dans lequel chaque transition ne peut être concernée que par un conflit au plus.
- ✓ **RdP pur** : Un réseau de Pétri pur est un réseau dans lequel il n'existe pas de transition ayant une place d'entrée qui soit à la fois place de sortie de cette transition.

III-2- Les Propriétés Comportementales

Ces propriétés dépendent à la fois du marquage initial M_0 et de la structure du réseau. Il s'agit ici de faire ressortir les propriétés dynamiques du système étudié [MUR 89].

- ✓ **Existence d'un marquage** : Pour toute séquence de transition s , il existe un marquage M tel que celle-ci soit franchissable
- ✓ **Vivacité et blocage** : Un réseau de Pétri est vivant si et seulement si toutes ses transitions sont vivantes. Une transition t d'un réseau de Pétri ayant M_0 comme marquage initial est dite vivante si pour tout marquage M du réseau de Pétri atteignable à partir de M_0 .
Un réseau de Pétri vivant garantit l'absence de blocages et de parties mortes (non atteintes) dans la structure du réseau.
- ✓ **Réseau borné, Réseau Sauf** : Un réseau de Pétri est borné si et seulement si toutes ses places sont bornées. Une place P est bornée si pour tout marquage M , le nombre de jetons dans la place est inférieur à une constante k tel que $\forall M, M(p) < k$. Le caractère borné d'un réseau de Pétri renseigne sur les valeurs limites des ressources demandées par le système. Si un réseau est borné, et la borne est égale à 1, alors il est dit sauf.
- ✓ **Monotonie** : L'augmentation de jetons dans les places d'un marquage préserve la possibilité de franchissement d'une séquence de transitions.
- ✓ **Marquage puit** : Un marquage puit est un marquage à partir duquel aucune transition n'est tirable. Un réseau marqué est sans blocage si aucun de ses marquages accessibles n'est un marquage puit. [KER 16]

Ils existent d'autres propriétés des réseaux de Pétri qui s'appellent les propriétés spécifiques :

Les propriétés spécifiques sont regroupées en quatre types : Les propriétés d'accessibilité, de sûreté, de vivacité et d'équité. [BOU 13]

IV-Principe de fonctionnement :

1. **Marquages accessibles** : Pour définir l'état d'un système par un réseau de Pétri, il est nécessaire de compléter le réseau de pétri par un marquage. Ce marquage consiste à déposer un nombre entier (positif ou nul) ou réel (cas d'un RdP continu) de jeton dans chaque place du réseau de pétri. L'ensemble des marquages accessibles d'un RdP à partir d'un marquage initial donné, correspond à l'ensemble des marquages atteint après franchissement de transitions sensibilisées les unes après les autres ; ce qui correspond à toutes les situations possibles du RdP au cours de son évolution à partir du marquage initial.
2. **Franchissabilité** : Pour qu'une transition soit franchissable, il faut et il suffit que l'on trouve dans toutes les places immédiatement amont à cette transition, le nombre de marquages correspondant au poids des arcs reliant respectivement chacune de ces places à cette transition.
3. **Franchissement** : Toute transition franchissable est immédiatement franchie. La transition franchie distribue dans chacune des places immédiatement aval, un nombre de marques égal au poids de l'arc qui relie cette transition à chaque place aval respectivement. [LAC1 18]

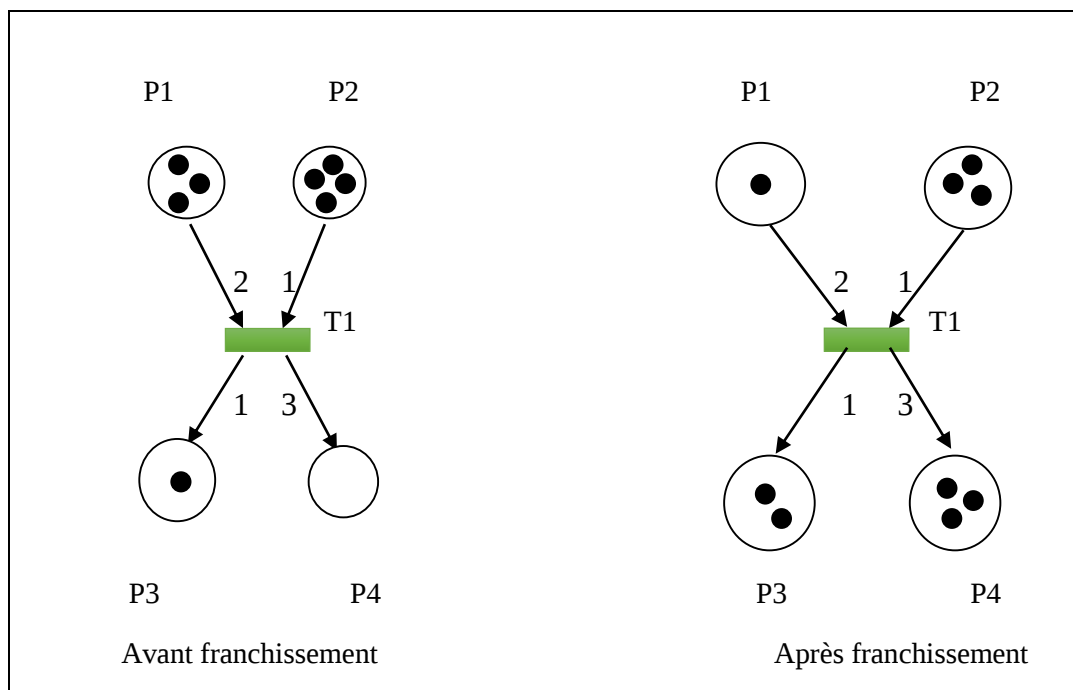


Figure II.2 : Exemple de franchissement

Dans l'exemple de la figure II.2 on a :

- Avant franchissement : $m(P1)=3$; $m(P2)=4$; $m(P3)=1$; $m(P4)=0$
- Après franchissement : $m(P1)=1$; $m(P2)=3$; $m(P3)=2$; $m(P4)=3$

V- Les types des réseaux de Pétri :

Il existe différents types de réseaux de Pétri :

- **Réseau de Pétri ordinaire** : Un RDO est un réseau dont les arcs orientés reliant les places (d'entrée et de sortie) aux transitions ont par défaut une évaluation ou un poids d'une unité. Un réseau de Pétri ordinaire est un réseau dont le graphe sous-jacent est un 1-graphe. [LAC1 18]
- **Réseau de Pétri généralisé** : Un RDG est un RdP dans lequel des poids (nombres entiers strictement positifs) sont associées aux arcs. Tous les arcs dont le poids n'est pas explicitement spécifié, ont un poids de 1. Lorsqu'un arc reliant une place P à une transition t possède un poids p , cela signifie que la transition t ne sera validée que si la place P contient au moins p marques. Lors du franchissement de cette transition, p marques sont retirées de la place P .
Lorsqu'un arc reliant une transition T à une place P possède un poids p , cela signifie que lors du franchissement de T , p marques seront ajoutées à la place P . [MOR 02]
- **Réseau de Pétri coloré** : Un RdPC est un réseau de Petri dans lequel les jetons portent des couleurs. Une couleur est une information attachée à un jeton. Cette information permet de distinguer des jetons entre eux et peut être de type quelconque. [LAB 05]
- **Réseau de Pétri continu** : Les réseaux de Pétri continus sont définis par un système d'équations différentielles ordinaires où le système de marquage et de transitions des réseaux de Pétri sont modifiés. Le marquage des places ne correspond plus à un entier mais correspond à un réel positif. [RAM 74]
- **Réseaux de Pétri temporisés** : Pour représenter le comportement des systèmes dynamiques, il est nécessaire de modéliser le temps. Les réseaux de Pétri P-temporisés ou (exclusif) T-temporisés permettent de résoudre de façon élégante différents types de problèmes associés à cette variable temps. [LAC2 18] Le temps est représenté par des durées (nombres rationnels positifs ou nuls) associées aux transitions [RAM 74] ou aux places [SIF 77].

- **Réseaux de Pétri stochastiques (RDPS) :** Un réseau de Pétri stochastique est un réseau de Pétri dans lequel les temps de franchissement des transitions sont générés par des variables aléatoires de distributions données quelconques à support dans $[0, \infty]$. [LAC3 18]
- **Réseaux de Pétri hybrides :** Il est nécessaire, dans certains cas, de représenter sur un même modèle des phénomènes à la fois continus (comme le traitement d'un flux de matière continu) et discrets (comme l'occupation d'une ressource). Une telle représentation ne peut être effectuée uniquement, avec le formalisme RdP discret, ou seulement avec le formalisme RdP continu. Cela a ainsi conduit à la naissance de la définition d'une nouvelle extension. Les réseaux de Pétri hybrides [BAI 91]. Dans lesquels coexistent des places et des transitions continues et discrètes, et permet de représenter les deux aspects continu et discret en même temps. [MAH 15]

VI-Modélisation des systèmes par les réseaux de Pétri :

Les réseaux de Pétri permettent de modéliser un certain nombre de comportements importants dans les systèmes complexes tels que le parallélisme, la synchronisation, le partage de ressources, la mémorisation, etc. [VID 92].

VI-1- Parallélisme :

Le parallélisme représente la possibilité que plusieurs processus évoluent simultanément au sein du même système. On peut provoquer le départ simultané de l'évolution de deux processus à l'aide d'une transition ayant plusieurs places de sortie.

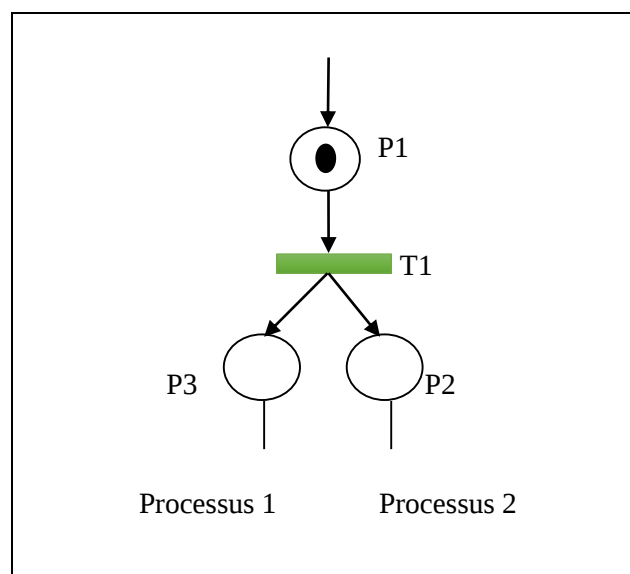


Figure II.3 : Structure du Parallélisme

Le franchissement de la transition T1 met un jeton dans la place P2 (ce qui marque le déclenchement du processus 1) et un jeton dans la place P3 (ce qui marque le déclenchement du processus 2).

VI-2-Synchronisation :

La synchronisation est modélisée sous deux formes :

- **Synchronisation mutuelle (Par rendez-vous) :** La synchronisation mutuelle ou par (rendez-vous) permet de synchroniser les opérations de deux processus. La Figure II.4 montre un exemple de deux processus. Le franchissement de la transition T7 ne peut se faire que si la place P12 du processus1 et la place P6 du processus 2 contiennent chacune au moins un jeton. Si ce n'est pas le cas, par exemple la place P12 ne contient pas de jetons, le processus 2 est bloqué sur la place P6 ; il attend que l'évolution du processus 1 soit telle qu'au moins un jeton apparaisse dans la place P12.

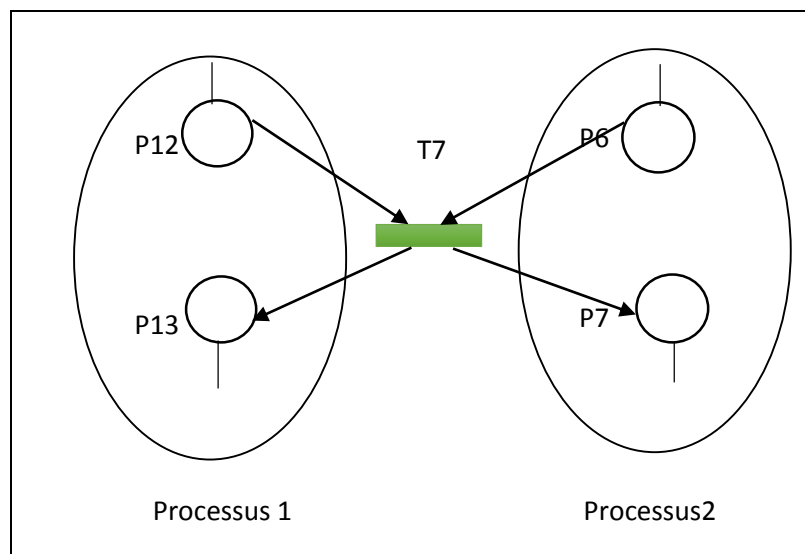


Figure II.4 : Synchronisation Mutuelle

- **Synchronisation par signal (sémaphore) :** Dans la synchronisation par signal, les opérations du processus 2 ne peuvent se poursuivre que si le processus 1 a atteint un certain niveau dans la suite de ses opérations. Par contre,

L'avancement des opérations du processus 1 ne dépend pas de l'avancement des opérations du processus 2

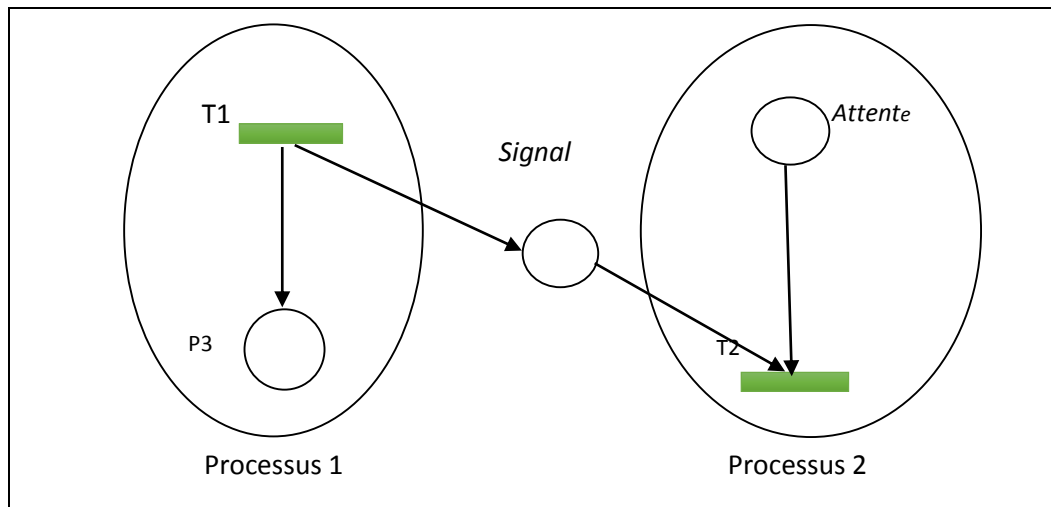


Figure II.5 : Synchronisation par Sémaphore

Si la place *Signal* est marquée et la place *Attente* ne l'est pas, cela signifie que le processus 1 a envoyé le signal mais le processus 2 ne l'a pas encore reçu. Si, par contre, la place *Signal* n'est pas marquée et que la place *Attente* est marquée, cela signifie que le processus 2 est en attente du signal.

VI-3-Partage de ressources :

Cette structure va modéliser le fait qu'au sein du même système plusieurs processus partagent une même ressource en utilisant le principe de l'exclusion mutuelle. Dans la Figure II.6, Le jeton dans la place P0 présente une ressource mise en commun entre le processus 1 et le processus 2. Le franchissement de la transition T17 lors de l'évolution du processus 1 entraîne la consommation de jeton présenté dans la place P0. La ressource que constitue ce jeton n'est alors plus disponible pour l'évolution du processus 2. Lorsque la transition T18 est franchie, un jeton est alors placé dans la place P0 : la ressource devient alors disponible pour l'évolution des deux processus.

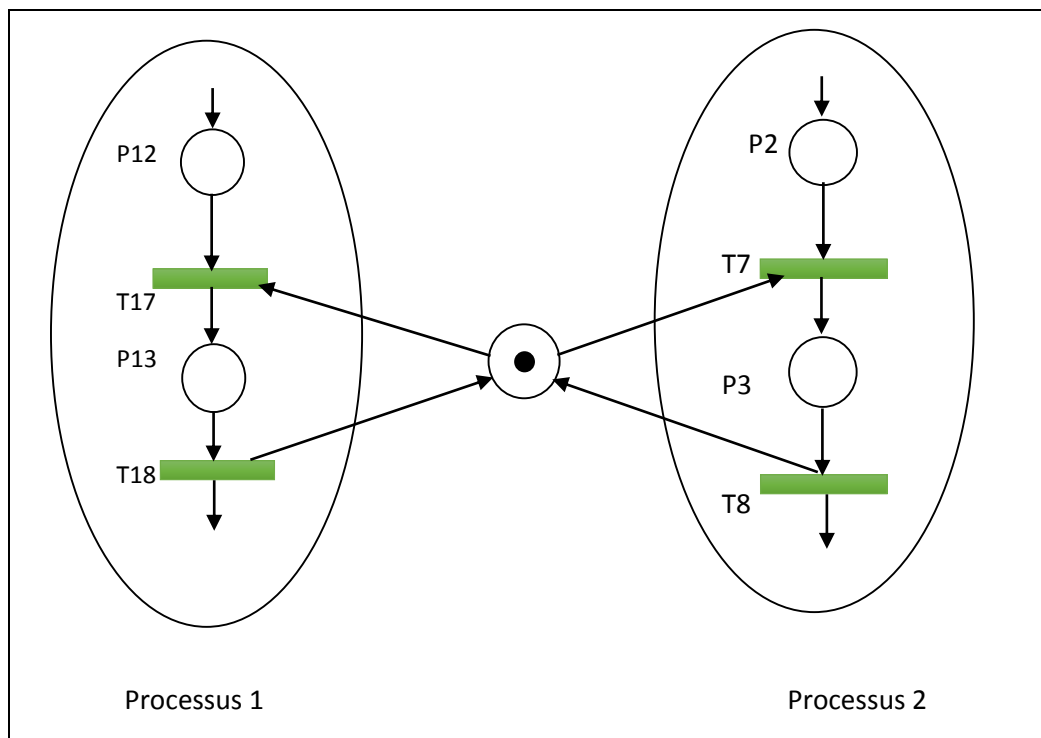


Figure II .6: Structure de Partage de Ressources

VI-4- Mémorisation :

Dans tous les modèles, on peut compter le nombre de tirs d'une transition en utilisant une place sans sortie. Dans La Figure les places *Attente* et *Compteur* peuvent servir à indiquer combien d'instances d'un processus sont en attente.

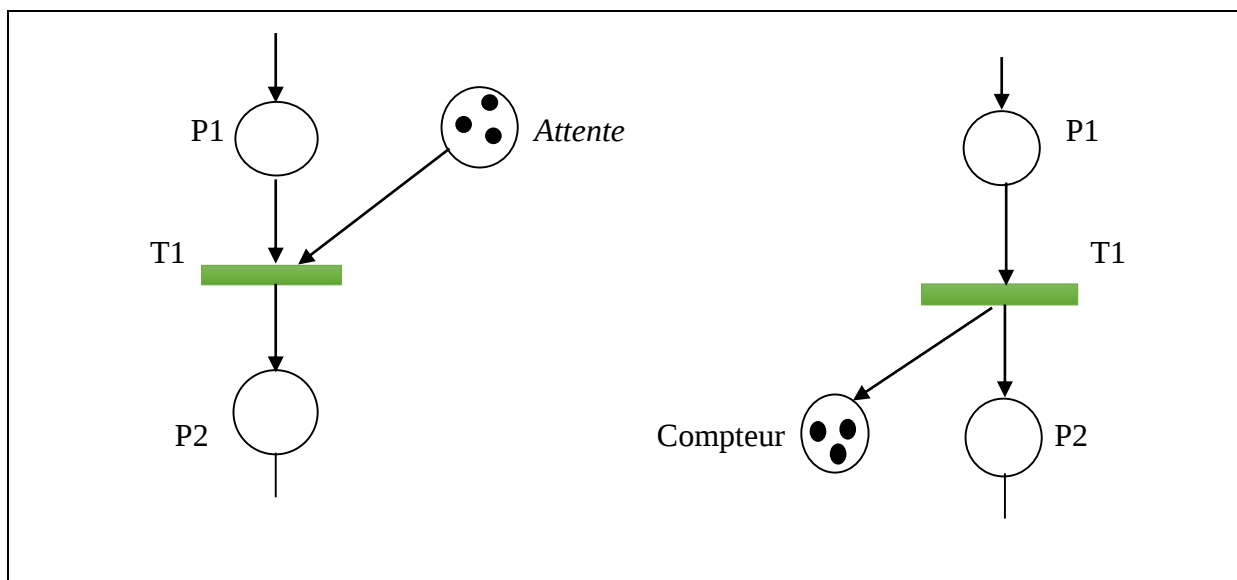


Figure II.7 : Synchronisation par Mémorisation

Conclusion :

Les réseaux de Pétri constituent un formalisme simple à comprendre et manipuler connu pour les possibilités d'analyse, de validation et de vérification dont ils font preuve. Cet outil de modélisation est particulièrement bien adapté à la représentation des systèmes de production. Ils permettent de répondre à la diversité des configurations de ces systèmes et leur demande de flexibilité en temps réel.

Dans ce chapitre nous avons passé sur les éléments de base de la théorie des réseaux de Pétri, leurs propriétés essentielles, différents extensions, principe de fonctionnement et la modélisation par RdP.

La modélisation par réseaux de Pétri d'un cas réel (les moulins AMOR BENAMOR) fait l'objet du troisième chapitre.

CHAPITRE 3 :

Etude de cas

Introduction

Notre travail est de modéliser et simuler un système de production, comme application ce chapitre propose le cas d'une ligne de production des pâtes courtes des moulins Amor Benamor (MAB), Guelma.

D'abord, nous allons faire une présentation de l'entreprise et une description du processus de production. Puis le reste du chapitre est consacré à la modélisation et la simulation du système précité.

I- Présentation de l'entreprise

I-1 Historique

Les moulins Amor Benamor est une filiale d'un groupe spécialisé dans l'agroalimentaire qui est le groupe Benamor. C'est un groupe familial fondé par le défunt père (Amor Benamor) en 1984.

En septembre 2000, le Groupe Benamor entame sa première diversification, dans la céréaliculture, avec le lancement des Moulins Amor Benamor (**MAB**) pour la production d'aliments de base dérivés du blé dur.

Situés dans la zone industrielle d'El-Fedjoudj de la wilaya de Guelma (Nord-Est de l'Algérie) sur un terrain d'une superficie de 42500m².



Figure III.1 : Les moulins Amor Benamor - d'El-Fedjoudj – Guelma

Son approvisionnement privilégie la proximité : avec 70 agriculteurs adhérents, le Réseau blé dur englobe une superficie semée de 3 500 hectares pour une production de 250 000 tonnes/an

Au fil des ans, **MAB** a enrichi ses activités de transformation pour proposer une offre variée répondant aux besoins de consommation du marché national : semoules et couscous, pâtes alimentaires.

I-2 La mission de l'unité

Répondre aux besoins alimentaires du marché intérieur, mais surtout entrer dans le cœur de leurs consommateurs en produisant leurs marques favorites.

Les moulins Amor Benamor sont caractérisés par :

- ❖ Une capacité de production des moulins de 700 tonnes/jour ;
- ❖ Une capacité de stockage de blé de 60000 tonnes ;

Actuellement, elle emploie un effectif total de 805 travailleurs dans un régime continu 2×8 et 3×8 bien entendu avec une équipe de fonctionnement normale comme suit :

- ✓ 97 cadres
- ✓ 67 agents de maîtrise
- ✓ 637 agents d'exécution

On peut résumer la capacité actuelle de production d'entreprise dans le tableau suivant :

Production	Capacité réelle (kg/h)
Pâtes courtes	• Une ligne de capacité de 6500 • Trois lignes de capacité de 3500
Couscous	• Une ligne de capacité de 1200 • Deux lignes de capacité de 2400 • trois lignes de capacité de 1200
Pâtes longue	• Une ligne de capacité de 3000
Pâtes spéciales	• Une ligne de capacité de 3000

Tableau III.1 : La capacité actuelle de production d'entreprise

I-3 Processus de fabrication

L'unité MAB est spécialisée dans la production des pâtes alimentaires et couscous

I-3-1 Processus de fabrication de couscous :

Le processus de fabrication de couscous passe par plusieurs phases

- 1) **Dosage et mélange :** Dans la pétrisseuse la semoule est mélangé avec de l'eau à un pourcentage de 28.5% jusqu'à 32.5% et transformé en grumeaux.
- 2) **Roulage/tamisage :** Le mélange est transféré dans un rouleur ou tamiseur, une machine spécifique qui permet de former les graines de couscous crues. Les graines sont calibrées au sein de ce même appareil avant d'être transportées dans le cuiseur à vapeur.

Cette étape dure 10 min à une température entre 75 et 95 °c

- 3) **Cuisson /émottage :** Disposée sur un tapis en toile perforée, la couche de couscous traverse une cuve munie d'injecteur de vapeur. Pendant 10 à 15 min à une température entre 97 et 115 °c

À la sortie du cuiseur, la couche de couscous est émottée afin d'éviter la formation de boules agglomérées.

- 4) **Séchage :** La graine de couscous est séchée dans un sécheur rotatif pour ramener son taux d'humidité à 12,5%. Le séchage prend 1h à 1h 45mn à une température contrôlée entre 80 et 88 °c
- 5) **Refroidissement :** La température est abaissée dans un refroidisseur vibrant entre 30 et 15 °c pendant 2mn
- 6) **Triage :** Après refroidissement, le couscous est envoyé vers un tamiseur vibrant qui permet de sélectionner le produit en fonction de la taille.
- 7) **Stockage :** Les graines de couscous sont transportées pour être stockées dans des silos.
- 8) **Conditionnement :** Les graines de couscous sont emballées.

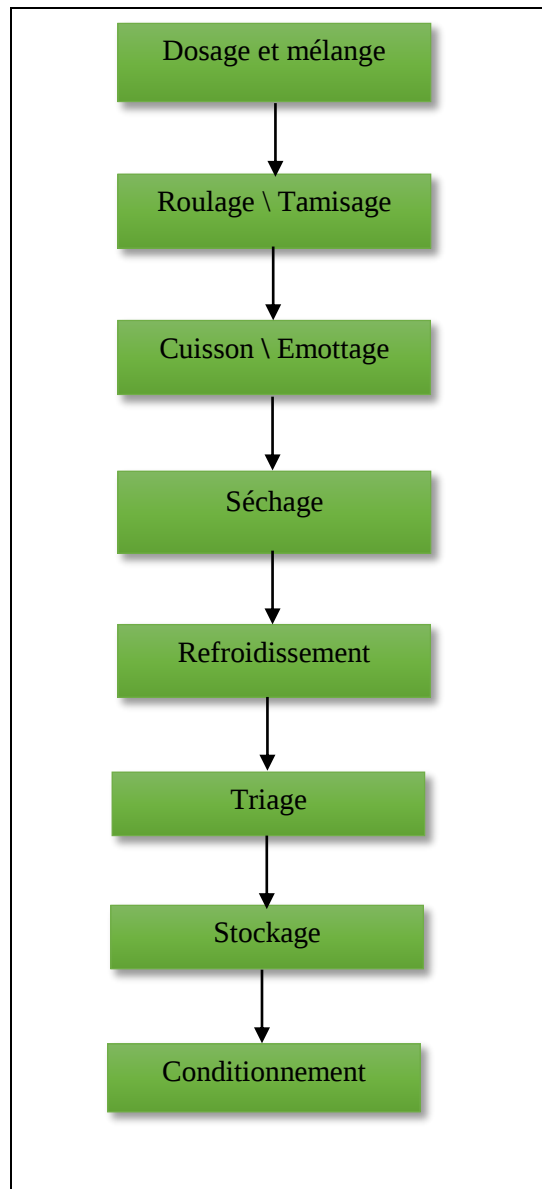


Figure III.2 : Processus de fabrication de couscous

I-3-2 Processus de fabrication des pâtes alimentaires :

Les Lignes de fabrication de pâtes alimentaires comprennent des lignes pour pâtes longues, des lignes pour pâtes courtes et des lignes pour pâtes spéciales.

- ✓ **Réception de matière première :** La préparation des pâtes consiste à mélanger de la semoule du blé dur de qualité supérieure qui est destinée directement au dépôt de stockage (dépôt organisée et offert des conditions optimale pour que la semoule soit dans un bon état de point de vue humidité) avec un pourcentage d'eau de 14 à 17% pour en permettre le façonnage.

- ✓ **Pétrissage** : La semoule va être cheminée au-dessus d'un cyclone qui va être transféré dans un pétrisseur continu avec des bras lourds. Il y'aura donc un pétrissage pendant une durée de 15 à 20 minutes et c'est à ce moment que l'eau intervient. On règle la quantité d'eau avec la pression, elle doit être en adéquation avec semoule et précisons que c'est de l'eau adoucie.
- ✓ **Pressage-moulage** : Ce mélange pâteux fait l'objet d'une opération combinée de pétrissage-pressage sous l'effet d'une vis Archimède qui tourne autour de son axe dans la goulotte de la presse et qui le fait avancer tout en appliquant une pression.
- ✓ **L'extrusion –mis en forme** : La pâte est extrudée sous haute pression via des têtes de profils variables afin de lui donner des formes différentes. La température est contrôlée constamment afin de vérifier que les protéines du gluten ne subissent aucun dommage et afin de garantir la qualité des pâtes.
 - ✓ Pour les pâtes longues, telles que macaroni, spaghetti elles passent par une moule rectangulaire long et étroit d'où les pâtes sont extrudées en cheveux continus de grande dimension environ 1mètre, puis directement suspendues par chevauchement sur des cannes horizontales .Ces rideaux de pâtes sont ensuite acheminés vers l'enceinte des séchoirs, seront coupés à la longueur standard de commercialisation (24cm), pour les pâtes coupées on emploie des moules ronds.
 - ✓ Pour les pâtes larges, ils vont être glissés entre 2 cylindres rotatifs lisses qui par laminage vont tirer une feuille ayant la juste épaisseur souhaitée.
- ✓ **Séchage et refroidissement** : C'est une étape compartimentée et très compliquée, qui dure cinq heures de temps. Pour peu qu'il y ait une différence entre une consigne d'humidité, de température et la consigne réelle, il y aura des anomalies sur la qualité, et s'ils perdent 10 minutes, ils perdent énormément de produits .Raison pour laquelle, il existe deux salles de contrôle avec des contrôleurs pour chaque type de pâtes alimentaires.
- **Le séchage général** : Le séchage est l'étape la plus difficile dans la production de pâtes alimentaires. Les pâtes justement pressées ont un taux d'humidité de 29% à 31%. Elles doivent être séchées à un taux d'humidité de 12,5% maximum. C'est à partir de ce taux-là que les pâtes alimentaires sont parfaitement conservables.

- **Le séchage de pâtes coupées :** Immédiatement après l'extrusion, les pâtes sont coupées à leurs longueurs définitives par un couteau rotatif contre le moule .Après l'extrusion, les pâtes coupées sont séchées dans un séchoir appelée «trabatto »pour une courte durée avec un taux d'humidité est de 1 à 2% à cette phase .Ces pâtes sont séchées à leurs taux d'humidité final dans des rotant ou bien des séchoirs à bandes ou bien une combinaison des deux.

A la fin des séchoirs, les pâtes sont refroidies fortement jusqu'à environ 30°C et ont alors une humidité maximale de 12,5%.

- **Le séchage de pâtes longues (spaghetti) :** En-dessous de la presse le spaghetti est pendu sur des cannes d'environ 2m de largeur, le spaghetti a alors une longueur d'au – delà d'un mètre. Ces cannes sont pendues à une longue chaine qui va à travers le séchoir. ainsi le spaghetti suit les 11 zones climatiques successives

A la fin de la chaine on prévoit également une zone de refroidissement, le spaghetti est ensuite enlevé de ces cannes et est coupé à sa longueur.

- ✓ **Stockage et conditionnement :** Après avoir été refroidies, les pâtes alimentaires sont stockées dans des silos après ils sont reprises par des machines entièrement automatiques qui les pèsent, les conditionnent en sachet, carton et les emballent, il comprend les opérations suivantes :
 - Pesage du poids des pâtes.
 - Embaquetage individuel soit dans des boîtes en carton ou dans un film polypropylène.
 - Embaquetage dans des colis distributeur.

Cette partie est composée de plusieurs étapes représentées dans la figure III.3

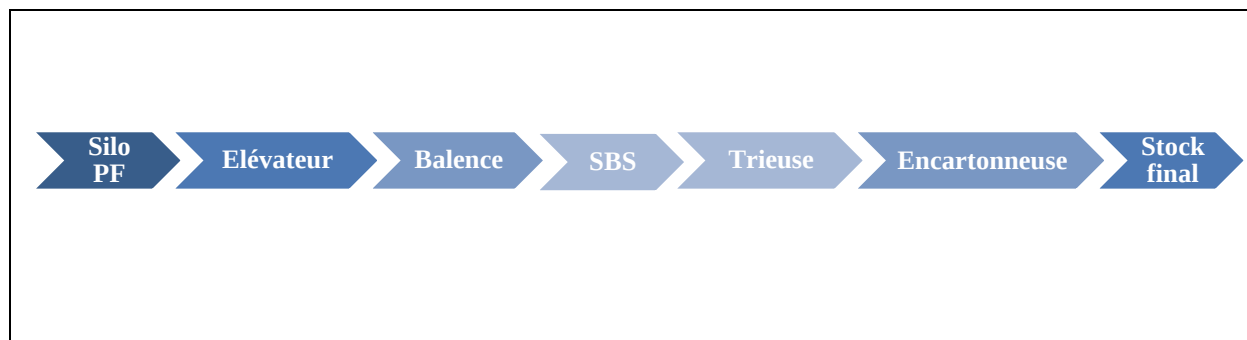


Figure III.3 : Les étapes de conditionnement des pâtes alimentaires

- ❖ **Silos** : ce sont des très grandes Baines ou se stock le produit fini (Pates /couscous) qui vient de la partie production
- ❖ **Élévateurs** : dans la partie de conditionnement il existe quatre Élévateurs de produit qui sont relient avec les silos à travers des tapis, Le rôle de ces élévateurs est de transporter le produit des silos vers les balances du chaque ligne
- ❖ **Balance** : contient plusieurs Baines dans le but de peser le produit et Les Envioient aux SBS tout dépend de la demande
- ❖ **SBS** : un système des machines ou se passe l'opération finale sur le produit fini, il contient :
 - un col formateur pour former le film
 - la mâchoire qui fait la soudure des sachets (film former) remplit de Produit
 - la chaine de cadence est composée de 4 stations :
 - a. La compression des sachets jusqu'à un volume commandé
 - b. Le 1er plissage des sachets plus le rejet des déchets dans des corbeilles placé à côté du SBS
 - c. Le 2^{eme} plissage des sachets
 - d. L'étiqueteuse des sachets
- ❖ **Tresseuse** : c'est un tapis sophistiqué avec un détecteur de métal plus un contrôleur du poids (une tolérance de 10%)
- ❖ **Encartonneuse** : un système de machines travail par le principe de faire placer les sachets finis dans des cartons, ce système est basé sur des photocellules
- ❖ Finalement le stockage des cartons dans magasins

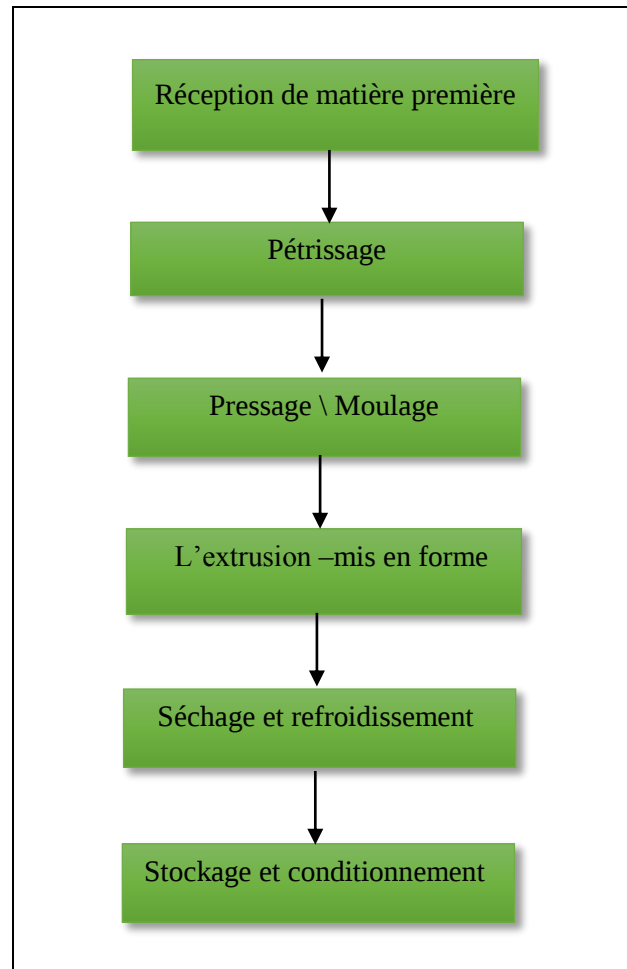


Figure III.4 : Processus de production des pâtes alimentaires

Dans notre travail, nous avons choisi de modéliser la ligne de production des pâtes courtes, pour cela nous allons fournir une description détaillée de celle-ci.

I-3-2-1 Description de la ligne de production des pâtes courtes

La première partie présente le cycle charge ligne c.-à-d. la réception de matière première qui est la semoule provenant des moulins Amor Benamor, cette matière est destinée directement au dépôt de stockage (silos MP). La semoule passe ensuite au balance¹ où la quantité spécifiée est pesée et puis au vis sans fin pour un transfert uniforme de la matière et enfin au plansichter pour le tamisage de la semoule.

Ensuite la semoule va être cheminée au-dessus d'un cyclone qui contient une sonde, si cette sonde indique que le niveau de la semoule est maximum l'opération de réception de matière première s'arrête sinon l'opération continue.

La semoule est transférée dans une centrifugeuse où se déroule le pré-mélange et le dosage des ingrédients sec et liquide semoule et eau.

Ensuite il y'aura une action de pétrissage dans un mélangeur continu, et après une régulation de pression (niveau de sous-vide) dans un mélangeur sous-vide :

- ❖ si le niveau de sous-vide est inférieur à 20 le mélange n'est pas acceptable et va être renvoyé encore à la centrifugeuse
- ❖ Lorsque le niveau de sous -vide est entre 20 et 80 le mélange est acceptable et va être transféré à la vis sans fin

Sous l'effet de la vis sans fin ce mélange pâteux subit une opération de pétrissage-pressage et il est poussé au même temps vers les coupe-pâtes où les pâtes obtiennent la forme voulue.

Toutes ces opérations de la centrifugeuse aux coupe-pâtes se déroulent dans une machine qui s'appelle la presse.

Arrivons maintenant à la partie la plus délicate du processus de fabrication des pâtes qui est le séchage. En premier lieu les pâtes passent dans un séchoir appelée «trabatto » pour un séchage court de 2 min, ensuite dans un pré- séchoir pendant 1h de temps , et après dans un séchoir durant 3h 30min et enfin au tapis de stabilisation pendant 1h 30 min .

A la fin des séchoirs, les pâtes sont refroidies pendant 7 min de temps.

Après le refroidissement si le produit est non conforme, il est transféré au silo de la matière à réutiliser et encore au silo MP. Sinon il est transféré par élévateur au silo PF.

Maintenant, elle va commencer l'étape d'emballage, le produit va être transféré à la balance² pour être pesé et puis en SBS pour être emballé à l'aide d'un film spécial, le premier pliage prend 1s de temps et le deuxième prend 2s et entre ces deux pliage il existe une opération de scellage de 2s de temps .

Ensuite le produit est étiqueté, si le produit est non conforme aux spécifications il est renvoyé au silo produit fini (PF), sinon il est transféré au détecteur de métaux pour être testé. S'il est non conforme, il est envoyé au laboratoire de contrôle qualité pour la vérification, sinon il est transféré au balance³. Les restes plastiques sont envoyés au recyclage et le produit est envoyé au cartonneuse pour être installé dans des cartons puis

regroupé dans des palettes qui sont stockées dans le stock commercial comme un produit fini prêt à être vendu aux clients.

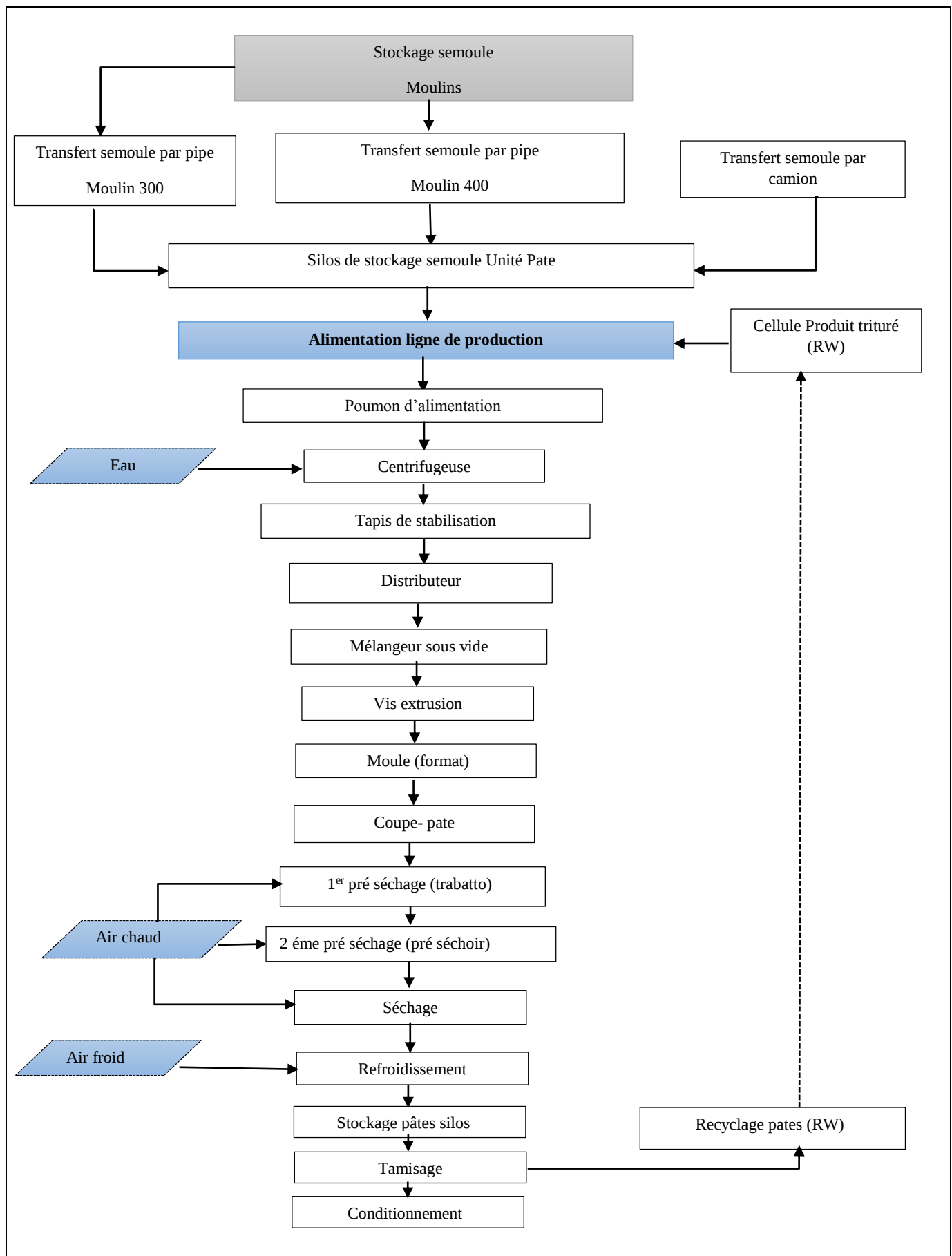


Figure III.5 : Diagramme de flux du processus de production des pâtes courtes

II-Modélisation du système de production des pâtes courtes par les RdP

La modélisation d'un système de production a pour but de maîtriser sa complexité et de mieux comprendre son fonctionnement.

Cette section est dédiée à la modélisation d'un système de production des pâtes courtes par les réseaux de Pétri.

II-1 Présentation du modèle par les réseaux de Pétri :

Afin d'obtenir un modèle qui correspond au système réel nous avons hybridé plusieurs types de réseaux de pétri : discret, continue et ainsi le T-temporisé.

On a présenté chaque tâche (machine) par une place, et l'exécution de cette tâche par une transition.

La disponibilité d'une place est indiquée par des jetons qui nous informent sur son état (existence de la matière première, libre, occupé). Le temps d'exécution (donné par MAB) est fixé pour certaines transitions

La Modélisation du système de production des pâtes courtes au niveau des moulins AMOR BENAMOR par les RdP est illustrée dans la figure III.6

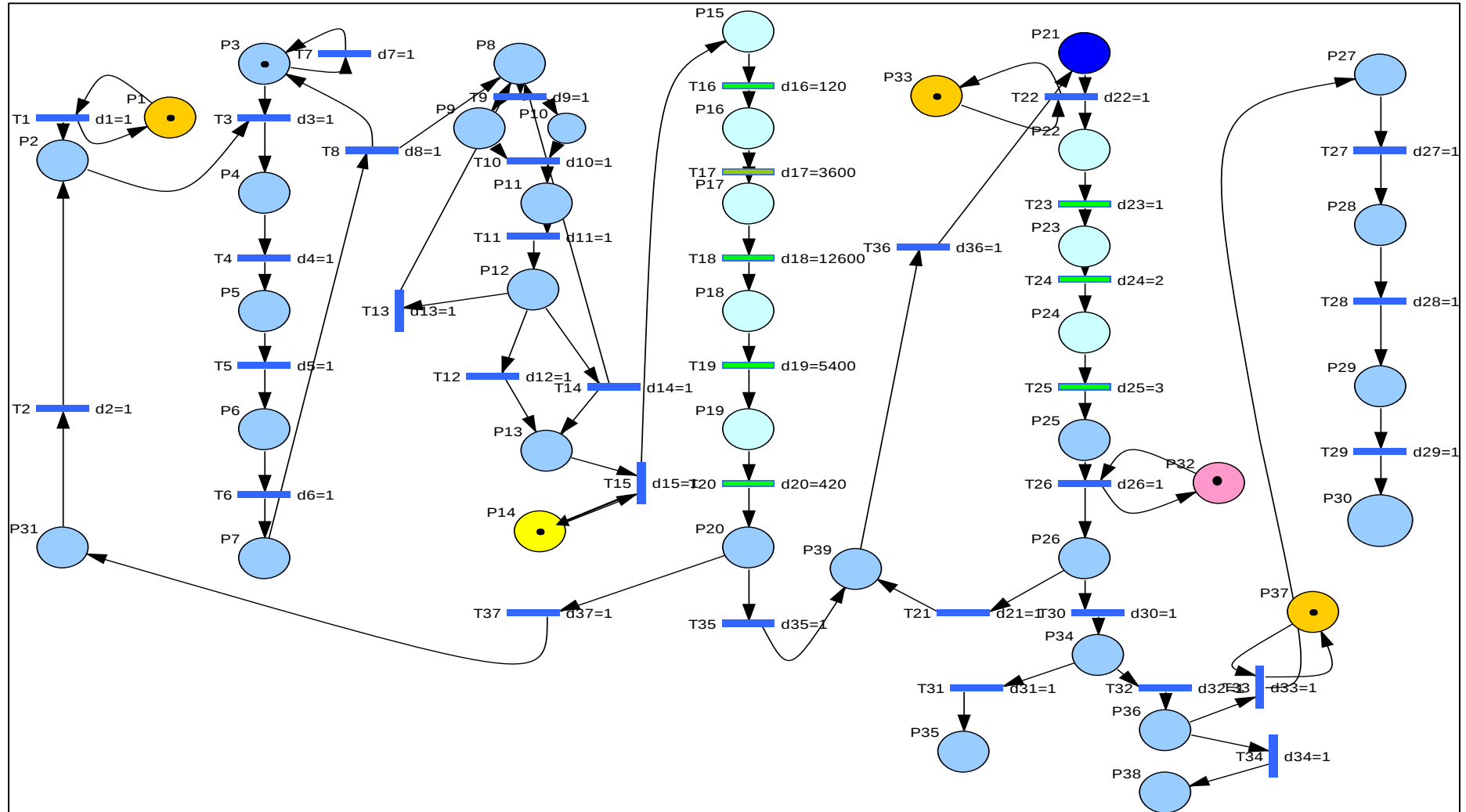


Figure III.6 : Modélisation de la ligne des pâtes courtes au niveau des moulins AMOR BENAMOR, Guelma par les réseaux de Pétri

II-2 Description du modèle

- ❖ **Description des places :** Les places représentent les conditions qui traduisent l'état des machines du système

Désignation	Signification
P1	Moulin
P2	Existence de matière première dans le silo MP
P3	Sonde en détection de niveau de semoule
P4	Balance prêt a pesé
P5	Vis sans fin 1 en marche
P6	Plansichter prêt à tamiser
P7	Cyclone semoule rempli
P8	Centrifugeuse en marche
P9	Electrovanne eau ouverte
P10	Doseur semoule ouvert
P11	Mélangeur en marche
P12	Niveau sous-vide en détection
P13	Vis sans fin 2 en marche
P14	Coupe pates en marche
P15	Trabatto (plan vibratoire) en marche
P16	Pré séchoir en marche
P17	Séchoir en marche
P18	Tapis de stabilisation prêt
P19	Refroidisseur prêt
P20	Elévateur en fonctionnement
P21	Balance 2 en fonctionnement
P22	SBS-g-VP (emballage en film) en marche
P23	Pf prêt à plier
P24	Produit prêt à scellage
P25	Produit prêt au 2ème Pliage

P26	Etiqueteuse en détection
P27	Existence de cartonne
P28	Produit prêt à mettre en Palette
P29	Stock commercial
P30	Client
P31	Silo matière à réutiliser
P32	Etiquettes
P33	Film
P34	Détecteur des métaux en marche
P35	Laboratoire + Production
P36	Balance 3 prêt a pesé
P37	cartonne
P38	Recyclage plastique
P39	Silos PF (Produit Fini) rempli

Tableau III.2 : Description des places

- ❖ **Description des transitions :** Les transitions représentent l'ensemble des actions qui se déroulent dans le système

Désignation	Signification
T1	Matière première (semoule) transféré
T2	Produit transféré vers silo MP
T3	Niveau non max détecté
T4	Pesage
T5	Semoule transféré uniformément
T6	Tamissage effectué
T7	Niveau max détecté
T8	Semoule transféré
T9	Pré-pétrissage effectué
T10	Dosage des ingrédients effectué
T11	Pétrissage effectué

T12	Mélange de niveau >80 transféré à la vis
T13	Mélange de niveau <20 envoyé à la vis
T14	Mélange de niveau >20 renvoyé à la centrifugeuse
T15	Forme de pâte obtenue
T16	Séchage de 2 min effectué
T17	Pré-séchoir d'une 1h effectué
T18	Séchage de 3h 30min effectué
T19	Stabilisation de 1h 30min est exécutée
T20	Refroidissement pendant 7min
T21	Produit non conforme 2 est renvoyé au silo PF
T22	Pesage réalisé
T23	Emballage effectué
T24	1 ^{er} pliage effectué dans une 1s
T25	Scellage effectué en 2s
T26	pliage et étiquetage effectué en 2s
T27	Produit prêt à encartonner
T28	Produit en palette
T29	Produit en stock final (commercial)
T30	Produit conforme 2 est envoyé au détecteur des métaux
T31	Produit non conforme 3 est transféré au laboratoire
T32	Produit conforme 3 est envoyé au balance
T33	Produit conforme envoyé à l'encartonneuse
T34	Produit non conforme est envoyé au recyclage plastique
T35	produit conforme1 transféré vers silos PF
T36	produit transféré vers balance 2
T37	Produit non conforme 1 est envoyé au silo RW

Tableau III.3 :.Description des transitions

✓ **Etape 1 : cycle charge ligne (réception de matière)**

Les places P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 et les transitions T1, T3, T4, T5, T6, T7, T8 présentent un RdP continu où P1 est la place source.

Pour que le cycle charge ligne marche, il faut la présence de la matière première ($M(P1) > 0$) qui est représenté par jetons dans P1 par conséquent T1 est franchie.

L'évolution du marquage dans ces places et le franchissement des transitions indiquent le transfert de la matière en réalité.

✓ **Etape 2 : Pétrissage et tréfilage**

Les places P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14 et les transitions T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15 présentent un RdP continu.

Le pétrissage est réalisé en présence de l'eau et de la MP ceux sont les deux conditions nécessaire et qui sont présentés dans notre modèle par l'existence des jetons dans P9, P10 tel que $P9 (M(P9) > 0)$ et $P10 (M(P10) > 0)$ respectivement venant de franchissement de T9.

Le passage du jeton (mélange) au P13 est contrôlé par les transitions T12 et T14.

Par contre, si T13 est vraie le jeton revient au P8.

Pour le tréfilage, la transition T15 est franchissable s'il existe des jetons en P13 ($M(P13) > 0$) et P14 ($M(P14) > 0$) (disponibilité de la machine coupe-pâtes). La boucle rend la coupe-pâtes toujours en marche.

✓ **Etape 3 : Séchage et refroidissement**

Les places P15, P16, P17, P18, P19 et les transitions T16, T17, T18, T19, T20 présentent un RdP continu T-temporisé.

Ces transitions sont franchissables après un temps précis, pour un séchage et un refroidissement réussis la fixation du temps est indispensable.

Si T37 est vraie son franchissement consiste à retirer les jetons de P20 et à les ajouter au P31 puis le retour au P2, sinon les jetons vont être ajoutés au P39 par le franchissement du T35.

✓ **Etape 4 : L'emballage**

Les places P21, P22, P23, P24, P25, P26, P27, P28, P34, P35, P36, P38, P37, P33 et les transitions T22, T23, T24, T25, T26, T30, T21, T31, T32 présentent un RdP discret dont les transitions T23, T24, T25 sont temporisés.

La transition T22 est franchissable lorsque les places P21 ($M(P21) > 0$) et P33 ($M(P33) > 0$) contiennent tous les deux des jetons à partir de ce franchissement le flux de matière passe du continu au discret.

Le même scénario pour les transitions T26 et T33.

Pour les transitions T21, T30 ou T31, T32 ou T33, T34 une des transitions est franchie à la fois selon l'état de la qualité du produit.

✓ Etape 5 : Stockage

Les places P29, P30 et la transition T29 présentent un RdP discret.

La transition T29 est franchissable s'il existe des jetons dans P29 ($M(P29) > 0$).

III- La simulation du modèle

La simulation d'un modèle aide à comprendre et à analyser le fonctionnement du système réel et ainsi à améliorer les performances.

Dans notre étude nous avons utilisé le logiciel de simulation des RdP « Sirphyco ».

III-1 Présentation de logiciel

Le logiciel SIRPHYCO permet de simuler le fonctionnement de réseaux de Pétri continus et hybrides Il permet aussi de simuler des réseaux de Petri temporisés discrets. On peut, en particulier, comparer l'évolution d'un RdP temporisé avec un RdP continu qui en serait une approximation. Il est destiné à la recherche, à la simulation de systèmes concrets modélisés par RdP continus et hybrides, éventuellement à l'enseignement.

Pour aider à analyser de modèle, les modèles continus peuvent offrir de très bonnes approximations pour les systèmes à événements discrets. C'est l'idée de base qui a conduit à la définition des réseaux de Petri continue. Ainsi, un RdP continu est un modèle dans lequel le nombre de marques dans chaque place est réel positif. Dans le modèle RdP continu temporisé, une vitesse de franchissement est associée à chaque transition. Plusieurs modèles RdP continus temporisés ont été définis, ils correspondent à des calculs des vitesses de franchissement différents.

Un RdP continu peut être utilisé pour modéliser un système continu, mais il peut également constituer une bonne approximation pour l'évaluation des performances quand il contient un grand nombre de marques.

III-2 Résultats de la simulation :

La simulation nous a permis d'identifier les conflits dans le modèle qu'ils doivent être arbitrés par une règle de priorité.

III-2-1 Présentation des scénarios :

Pour améliorer les critères de performance de notre modèle, nous avons choisi la partie séchage et refroidissement parce qu'elle présente l'étape la plus critique et compliquée dans le processus et qui a un impact direct sur la qualité du produit final, nous avons présenté des scénarios de l'évolution de marquage présentés dans les figures (III .8 .9 .10. 11 12). En plus la partie séchage et refroidissement est modélisée par une hybridation de RdPC et RdP T-Temporisé représentée par la figure III.7 ci-dessous.

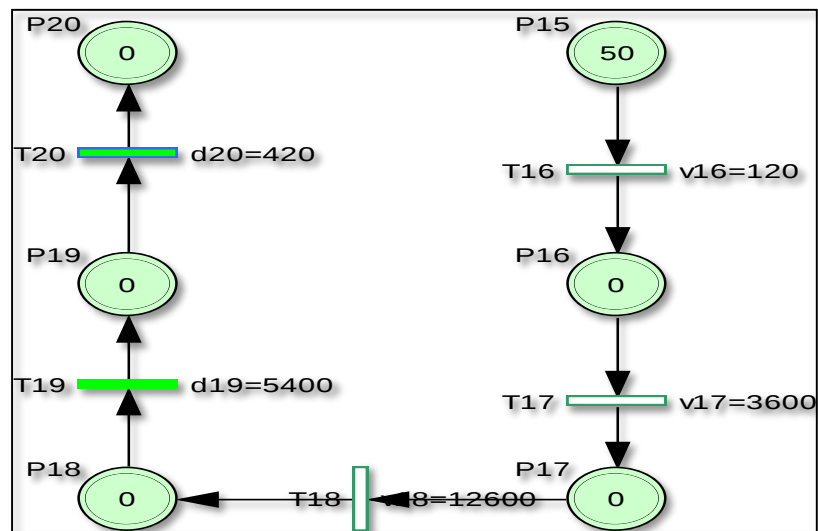


Figure III.7 : Modélisation de la partie séchage et refroidissement des pâtes courtes au niveau des moulins AMOR BENAMOR, Guelma par les réseaux de pétri

Les résultats obtenus sont donnés comme suit :

➤ Sénario 1

t=0

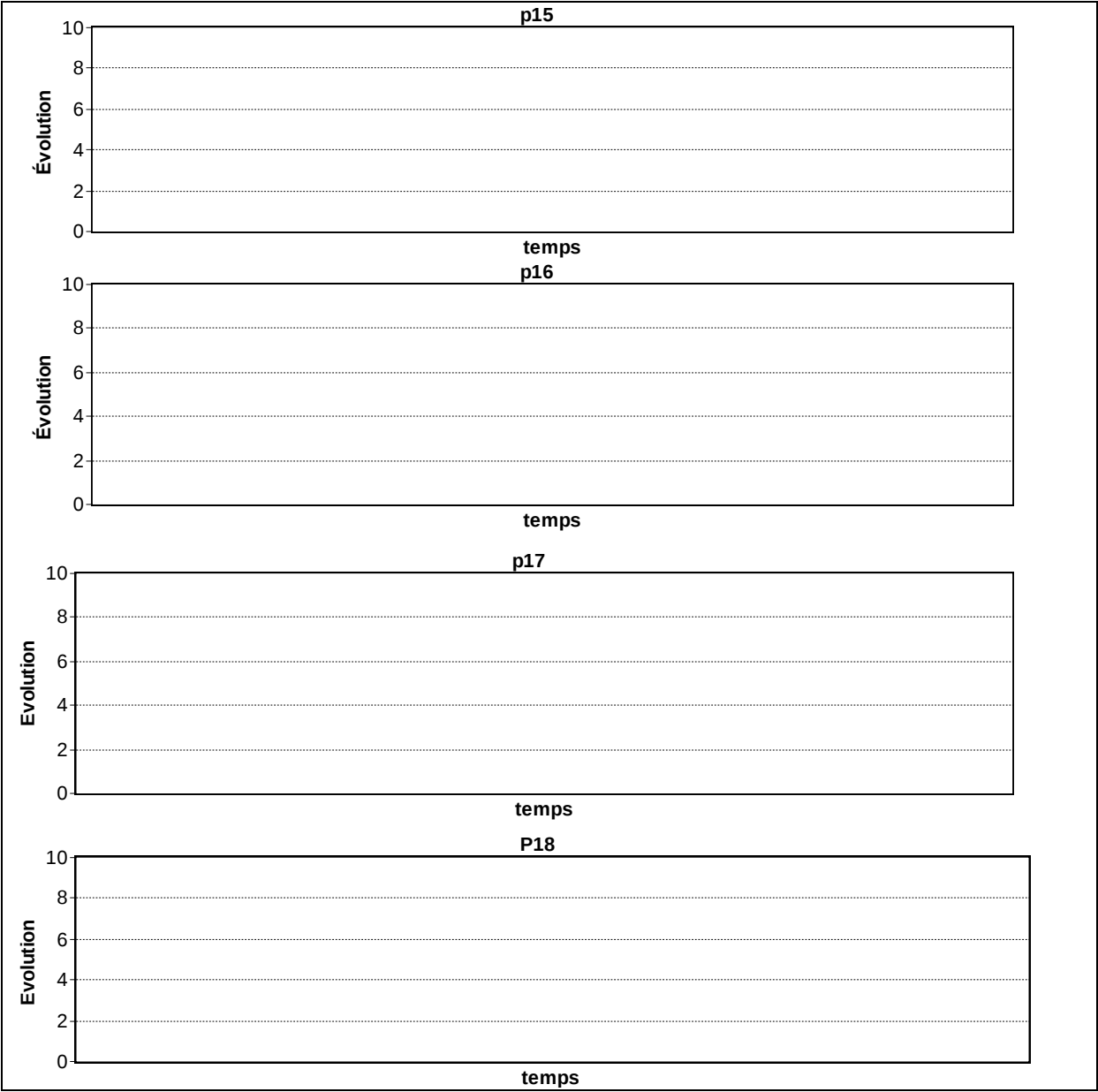


Figure III.8 : Scénario 1

➤ Sénario 2

T=3.9

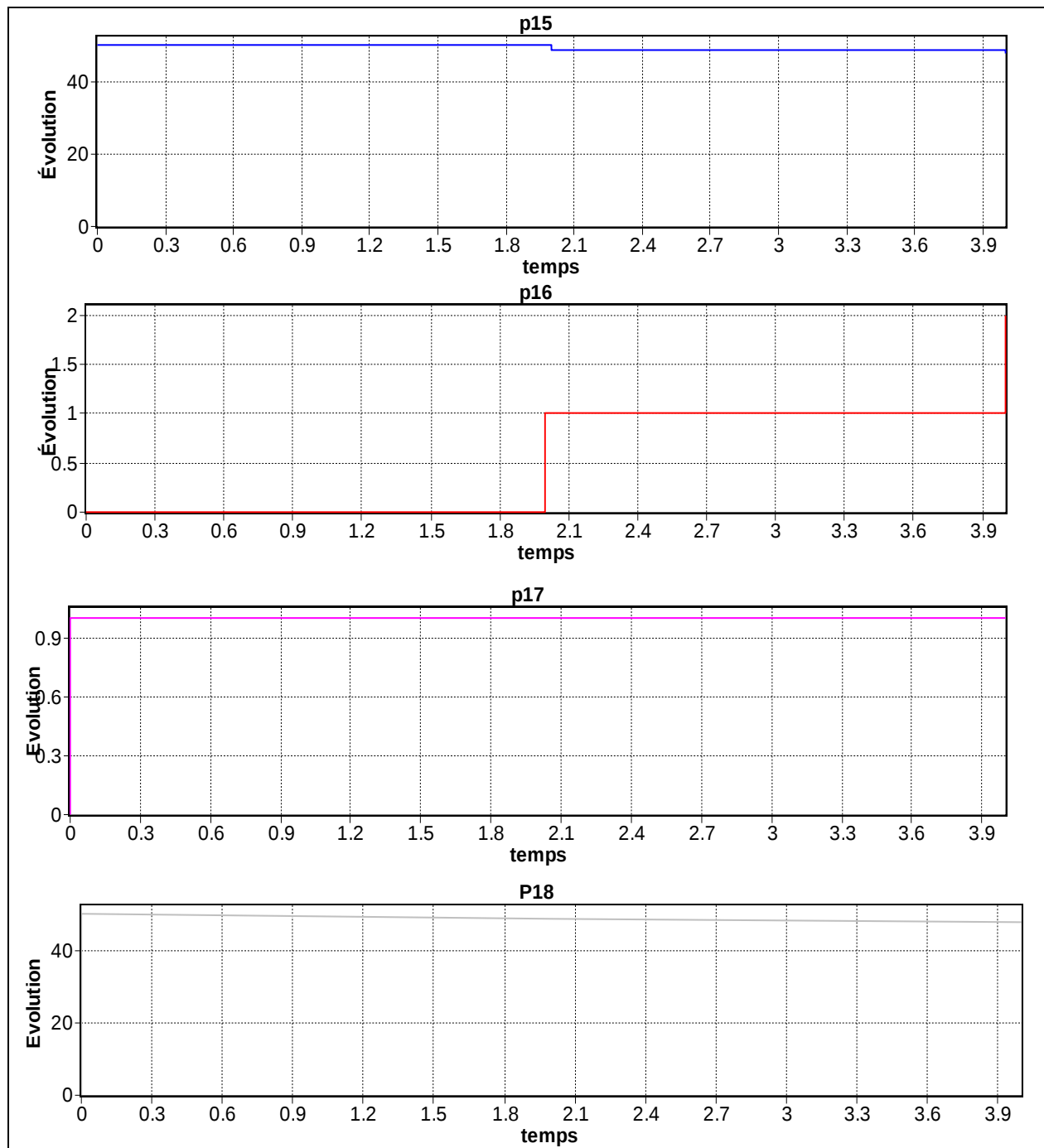


Figure III.9 : Scénario 2

➤ Sénario 3

T=6

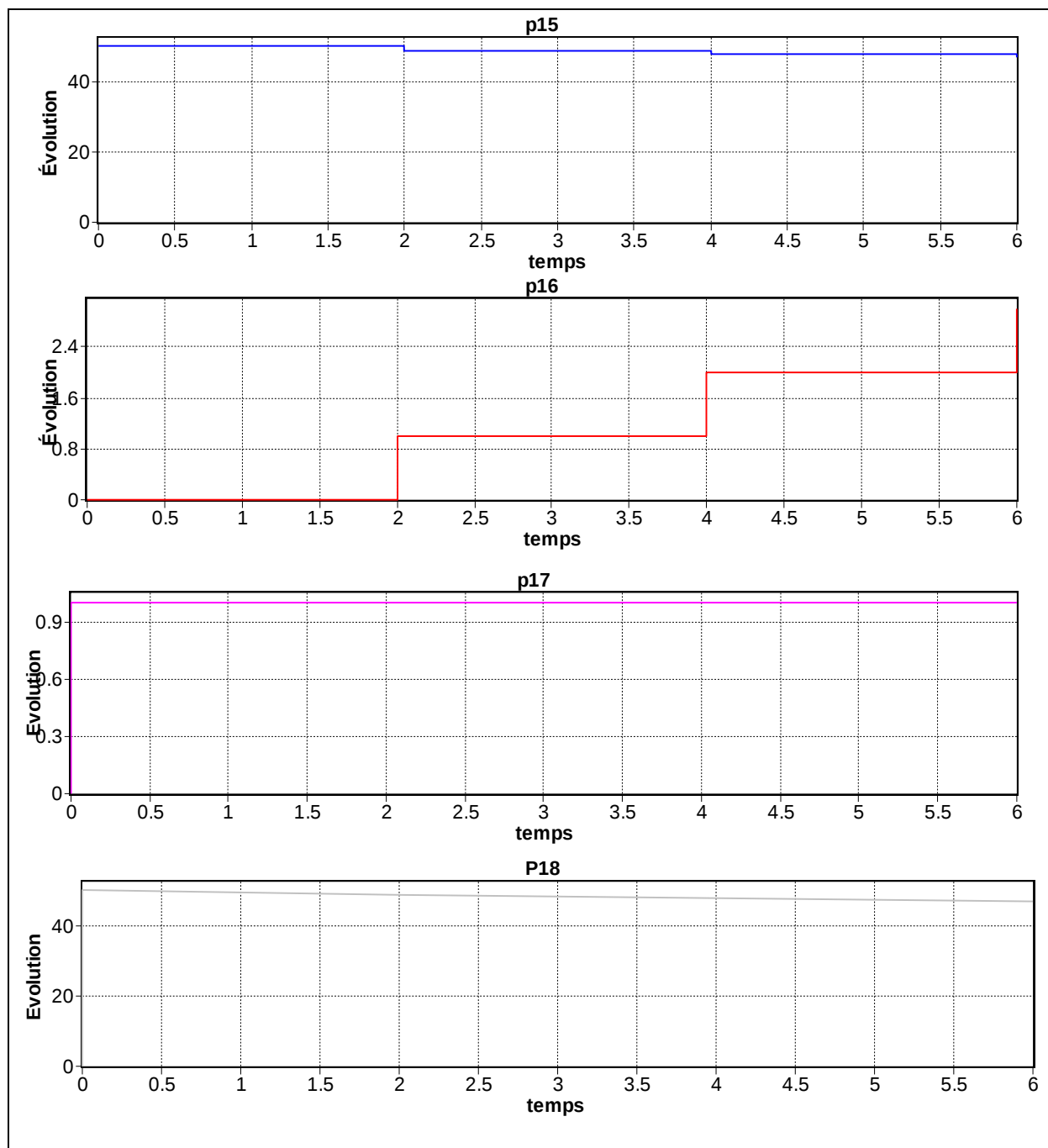


Figure III.10 : Scénario 3

➤ Sénario 4

T= 36

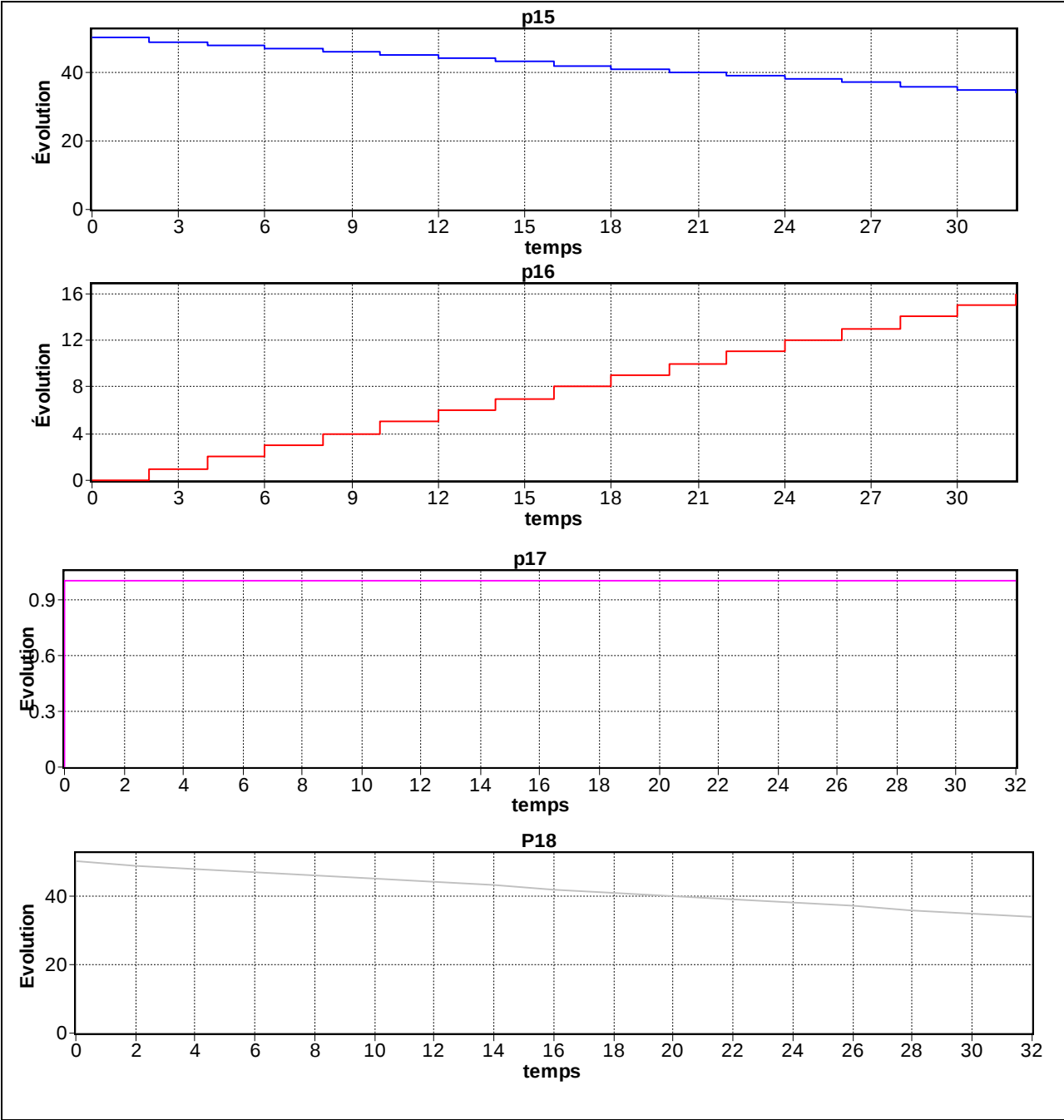


Figure III.11 : Scénario 4

➤ Sénario 5

T= 97 unités

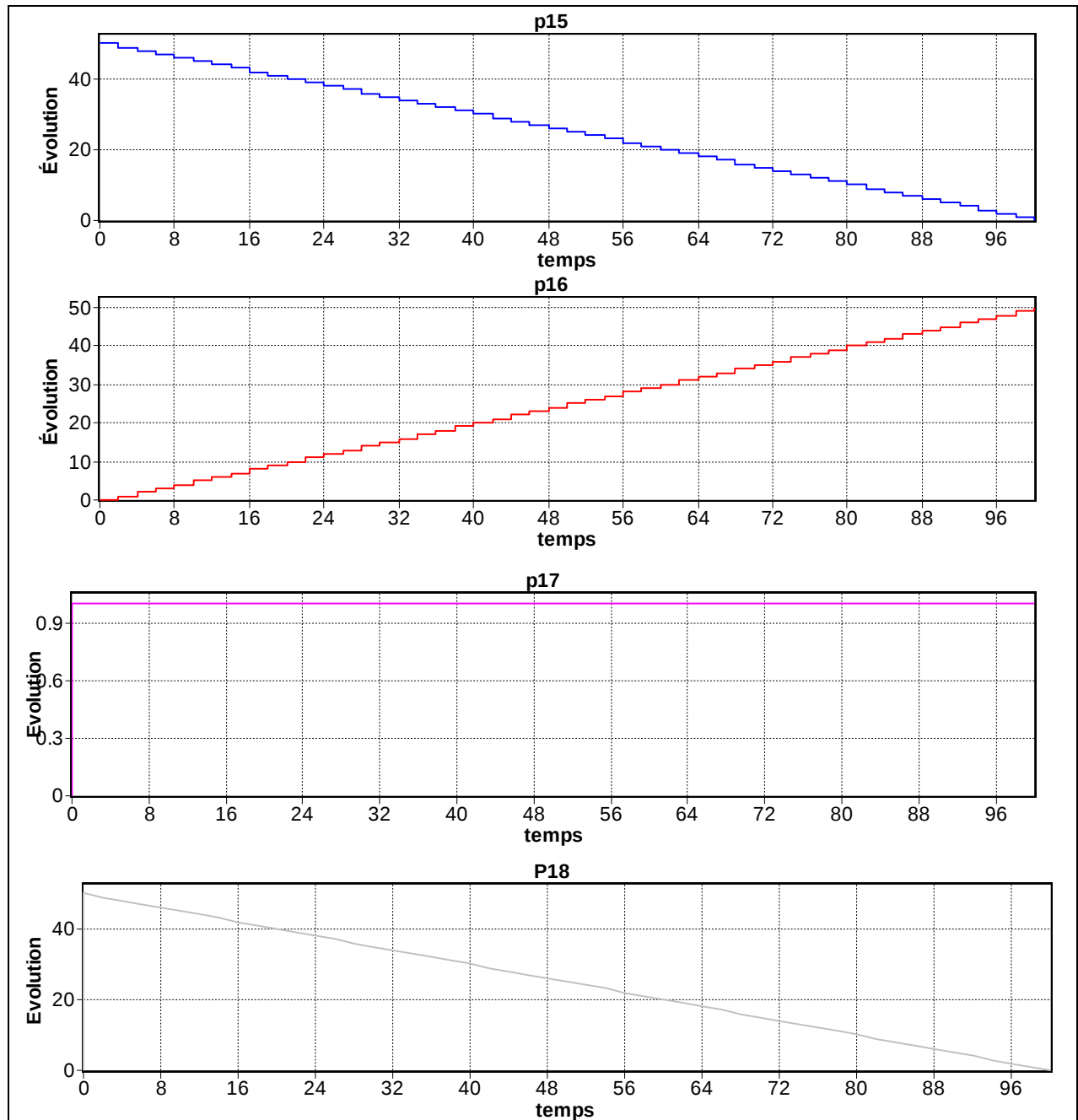


Figure III.12 : Scénario 5

III-2-2 Analyse des résultats

Afin d'évaluer le comportement de la ligne des pâtes courtes au niveau de groupe AMOR BENAMOR, certains critères sont pris en compte tels que les délais de machine (temps de transmission de flux). Ce critère semble être l'un des critères les plus pertinents pour mesurer les performances d'une ligne de production et indiquer de façon globale le comportement du système. Pour cela, nous allons commencer par analyser les temps de transmission.

Le temps de transmission de flux de matières est directement lisible dans les simulations comme montré dans les figures (III .8 .9 .10. 11 12). En effet, c'est l'instant où la vitesse à la réception de la matière est constante à zéro est plus clair dans le P17 et P18. Notons cependant que l'instant exact et le plus précis est celui où la vitesse à la réception s'annule, mais s'il existe un blocage sur la ligne, cette non arrivée de matière à la réception risque de ne pas être significative de la fin d'une transmission de la machine amont.

Les places P15 et P16 dans les figures (III .8 .9 .10. 11 12) représentent le délai de transmission de la quantité totale de données $S= 50$ tonne. La vitesse de transmission est nulle à $t=0$, une fois que le flux de matière est envoyé la vitesse commence à évoluer.

La simulation nous a permis de valider notre modèle proposé, on voit bien dans cette analyse un blocage au niveau des places P17 et P18 (la quantité de matière à $t=0$ n'est pas nulle)

Etudier l'influence de la capacité (taille) du silo et la quantité de matière fournie par les silos à chaque début de processus sur les délais de transmission de flux de matière semble être une solution de ce problème.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une modélisation et une simulation de la ligne des pâtes courtes au niveau de moulins AMOR BENAMOR par les réseaux de Pétri, ou une hybridation de plusieurs types de réseaux de pétri : discret, continu et ainsi le T-temporisé a été faite afin de construire un modèle qui correspond le plus possible à la réalité.

La complexité des systèmes de production nous oblige à utiliser des logiciels qui facilitent la manipulation et la simulation des modèles. Dans notre cas la simulation a été faite par le logiciel SYRFICO.

Conclusion Générale
Et
Perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'évolution rapide et la grande complexité des systèmes de production, la nécessité d'une utilisation optimale des ressources de production et la poursuite d'objectifs de production rendent l'analyse et l'évolution de ces systèmes plus difficile.

En effet, cette complexité conduit à des problèmes critiques de performances. Pour cela une analyse fine du comportement est nécessaire afin d'identifier ces problèmes et de les résoudre.

Le recours à la modélisation et la simulation des systèmes de production devient une nécessité pour mieux les comprendre et améliorer leur maîtrise.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la simulation des SdP à l'aide des réseaux de Pétri. Nous avons combiné différentes extensions des RdP continues, discrets et temporisés afin de construire un modèle qui se rapproche le plus possible du système réel complexe.

Le choix des Réseaux de Pétri(RdP), se justifie par le fait qu'ils offrent une représentation graphique permettant une description plus simplifiée des systèmes de production quel que soit leur degré de complexité. Au-delà de la modélisation et la simulation, les RdP permettent de vérifier les blocages d'un système.

Nous commençons ce travail par des notions générales sur les systèmes de production (SdPs) présenté dans le premier chapitre, puis une étude sur les RdP dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, Nous nous sommes intéressées par une ligne de production des pâtes courtes au niveau des moulins Amor Benamor.

Dans un premier lieu, nous avons modélisé cette ligne de production en utilisant différents types des réseaux de Pétri (continu, discret et temporisé).

Puis, nous avons étudié son fonctionnement en simulant notre modèle par l'utilisation du logiciel SIRPHYCO.

Nous avons effectué une analyse des résultats de la simulation de la partie séchage et refroidissement en tenant compte des délais de transmission des machines, ce qui nous a permis de mieux comprendre le comportement dynamique du système réel et détecter un problème de blocage au niveau de cette étape.

Conclusion Générale et perspectives

Nous relient l'amélioration du système et la solution de ce problème par l'étude de l'influence de la quantité du flux de matière et la capacité du silo sur les délais de transmissions des machines.

En conclusion, nous pensons que même notre modèle reste acceptable et qu'il permet de simuler le fonctionnement du système réel étudié, il ne constitue qu'un début, reste maintenant à le finaliser, nous proposons comme perspectives:

- L'utilisation du modèle proposé pour évaluer et améliorer les performances du système étudié. En particulier la résolution du blocage détecté.
- Développer une approche qui permet de modéliser à la fois la production et la maintenance préventive.
- Comparer la puissance de modélisation par RdPs par rapport à d'autre formalisme de modélisation (les réseaux bayésiens....).
- Généraliser la simulation et l'analyse du comportement sur toute la ligne de production des pates courtes.
- Faire une étude et généraliser la modélisation sur les trois lignes restantes au niveau de toute l'unité de production.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [BAI 91] J. Le BAIL, H. Alla and R. David. Hybrid Petri Nets. European Control Conference. Grenoble-France.p.1472-1477.July 1991.
- [BEN 09] L.BENOUDINA. Modélisation et simulation basées multi-agents du contrôle de processus industriel. Mémoire de magistère. Ecole doctorale de l'informatique INI .Spécialité : sciences et technologie de l'information et de la communication. Alger .2009
- [BOI 01] J.BOIMOND. Simulation des systèmes de production par les réseaux de pétri 'Siman-Arena'. Support de cours .2001 .
- [BOU 13] M.BOUARIOUA. Une approche basée transformation de graphes pour la génération de modèles de réseaux de pétri analysables à partir de diagrammes UML. Thèse de doctorat. Option : Systèmes distribués.2013.
- [BRA 83] G. BRAMS. Réseaux de pétri : théorie et pratique Tome 1 : théorie et analyse Tome 2 : modélisation et applications. Edition, Masson. 1983.
- [CHE 07] N.CHEIKHROUHOU. Modélisation et Simulation de Systèmes de Production. Support de cours. Laboratoire de Gestion et Procédés de Production .MOSISP .2007.
- [DEB 19] A.DEBABGHA. Les réseaux de Pétri couplé par des lois de fiabilité appliqués aux études de la fiabilité d'un système hybride. Thèse de master. Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle.2019.
- [DHO 05] H. DHOUIB. Utilisation des réseaux de Pétri a intervalles pour la régulation d'une qualité : application a une manufacture de tabac. Thèse de doctorat .Université des Sciences et Technologies de Lille et par l'Ecole Centrale de Lille. Spécialité : Automatique et informatique industrielle.2005.
- [GHO 12] A.GHOZLANE. Développement de méthodes bio informatiques dédiées à la prédiction et à l'analyse des réseaux métaboliques et des ARN non codants. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1. Spécialité : Informatique.2012.
- [KER 16] H. KERKOUICHE. Simulation & Prototypage. Support de Cours .Spécialités Système d'Information et Aide à la Prise de Décision (SIAD). Université de Jijel .2016.
- [KHO 19] M.KHODJA. Gestion d'entreprise .Faculté de science économique. Support de cours .Spécialité : gestion et science commerciales. Tizi ouzou .2019
- [KOR 09] A.KORICHI. TCAO et Simulation : Vers une plate-forme d'analyse et de conception de systèmes de production orientée groupe. Thèse de doctorat. Spécialité : Informatique Industrielle. Université al hadj Lakhdar.Batna.2009

Référence Bibliographique

- [LAB 05]** K. Labadi. Contribution à la modélisation et à l'évaluation de performances des systèmes logis- tiques à l'aide d'un nouveau modèle de réseaux de Petri stochastiques. Thèse de doctorat. Spécialité : Optimisation et sureté des systèmes. Université de Technologie de Troyes.2005
- [LAC1 18]** N. LACHTAR. Réseaux de Pétri autonomes. Support de cours. Ecole Supérieure de technologies Industrielles. 4^{ème} année.2018.
- [LAC2 18]** N.LACHTAR. Réseaux de Pétri temporisés. Support de cours. Ecole Supérieure de technologies Industrielles, 4^{ème} année. 2018.
- [LAC3 18]** N.LACHTAR. Réseaux de Pétri stochastiques. Support de cours, Ecole Supérieure de technologies Industrielles, 4^{ème} année. 2018.
- [MAH 15]** F.MAHI. Synthèse de la commande supervisée d'un système par l'approche des Réseaux de Pétri. Thèse de doctorat .Université d'Oran. Spécialité : Informatique.2015.
- [MOR 02]** Y.MORERE. Cours de réseau de Pétri, Avril 2002.
- [MUR 89]** T. MURATA. Petri Nets : Properties, Analysis and Applications. IEEE, Vol. 77, 1989.
- [NAS 13]** I .NASRI .Développement d'une méthodologie d'ordonnancement/optimisation adaptée aux systèmes industriels de type HVLV (High- Variety, Low-Volume .Thèse de doctorat. Spécialité : Sciences Pour l'Ingénieur.2013
- [PRI 87]** A. PRITSKER. Compilation of definitions of Simulation, Simulation, Vol.40, n°8, 1987
- [RAM 74]** C. RAMCHANDANI. Analysis of Asynchronous Concurrent Systems by Timed Petri Nets. Technical Report n°120. Laboratory for Computer Science. MIT, Cambridge, MA.1974.
- [SIF 77]** J. SIFAKIS. Use of Petri Nets for Performance Evaluation. In: Beilner, H., 163Gelenbe, E.: Modelling and Performance Evaluation of Computer Systems, Measuring, Modelling and Evauating Computer Systems. pp. 75-93. Amsterdam : North Holland. 1997.
- [SPE 05]** S. SPERANDIO. Usage de la modélisation multi-vue d'entreprise pour la conduite des systèmes de production ». Thèse de doctorat. Spécialité productique. Université Bordeaux 1. 2005.
- [TAG 11]** N.TAGHEZOU. Conception et Développement d'un système multi-agent d'Aide à la Décision pour la gestion de production dynamique .Thèse de doctorat. Spécialité : Informatique. Université Toulouse .2011

Référence Bibliographique

[TAL 12] A.TALBI. Modélisation des systèmes industriels. Editions universitaires européennes. ISBN : 978- 613-1-59806-7. Ecole Supérieure de Technologie, Fès. 2012.

[VID 92] G.VIDAL, A. CHOQUET. Réseaux de Petri et Systèmes Parallèles. Armand Colin. 1992.

[XIA 94] Y. XIAOJUN. Modélisation et Simulation des Systèmes de Production : une Approche Orientée-objets. Thèse de doctorat. Spécialité : ingénierie informatique : institut national des sciences appliquées .LYON .1994.

[XIE 95] XIE Xiaolen and Jean- Marie .Les réseaux de pétri pour la conception et la gestion des systèmes de production .ISSN :0249-6992.Masson 1995.

[ZEG 15] S.ZEGHDANI. Modélisation de l'état d'un système de production sur la base d'une approche Bayésienne. Thèse de Magister .Spécialité : Génie Industriel. 2015