

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES  
DÉPARTEMENT DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE



## *Mémoire de Master*

En Recherche Opérationnelle

Spécialité : Fiabilité et Évaluation des Performances des Réseaux

### *Thème*

---

Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil  
pour le suivi d'une chaîne de production.

*Cas de la ligne de conditionnement de la margarine CEVITAL.*

---



À soutenir devant le jury composé de :

Présidente : M<sup>elle</sup> S. Boulfekhar

Rapporteur : P<sup>r</sup> D. Aissani

Co-rapporteur : M<sup>r</sup> M. Atmani

Examinatrice : M<sup>elle</sup> C. Ouanteur

Examinatrice : M<sup>me</sup> S. Yassad

Invité : M<sup>r</sup> B. Goudjil

Présenté par :

M<sup>elle</sup> Belkacem Noura

M<sup>elle</sup> Benchallal Kahina

# Remerciement

*À l'issu de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu le bon Dieu tout puissant qui nous a donné la force de réaliser ce modeste travail.*

*Nous adressons par la même occasion nos sincères remerciements à nos parents qui ont su parfaitement nous accompagner durant nos études tant sur le plan matériel, financier que moral. Qu'ils trouvent ici l'assurance de notre totale reconnaissance et notre profonde humilité.*

*Nous tenons à remercier Mr D.Aissani ainsi que Mr M.Atmani d'avoir accepté de diriger notre travail avec grande patience ainsi que beaucoup de soin et de minutie. Nous les remercions encore pour tout le temps qu'ils nous ont consacré en vue de nous orienter durant la réalisation de notre travail.*

*Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur au niveau de l'entreprise Cevital Mr B. Goudjil, ainsi que le chef de service du production Mr L. Azouz, sans oublier à remercier l'ensemble du personnel du service de "Méthode et Maintenance" pour leur bon accueil et leur disponibilité.*

*Nous remercions tout particulièrement les membres de jury, qui ont accepté de juger ce travail.*

*Nous ne serons clôturer cette page sans exprimer notre reconnaissance et sympathie à tous ceux qui par leurs critiques, leurs suggestions, leurs observations et leurs conseils ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire.*



*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents,*

*A mes frères et mes sœurs,*

*A toute la famille,*

*A mes ami(e)s et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé ;*

*A ma camarade Kahina et sa famille.*

*Noura*



*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents,*

*A mon frère et ma sœur jumelle,*

*A toute la famille,*

*A mes ami(e)s et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé ;*

*A ma camarade Noura et sa famille.*

***Kahina***

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des figures</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Le complexe Cevital et l'évaluation des performances</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.1.1 Activités et missions . . . . .	4
1.2 Les différentes unités de production du pôle corps gras . . . . .	5
1.2.1 Unité de raffinage . . . . .	5
1.2.2 Unité de Margarine . . . . .	6
1.2.3 Présentation des machines de la ligne de conditionnement . . . . .	9
1.3 Évaluation des performances des systèmes informatiques dans une chaîne de production . . . . .	10
1.4 Évaluation des performances . . . . .	10
1.5 Méthodes d'évaluation des performances . . . . .	11
1.6 Techniques d'évaluation de performances . . . . .	12
1.6.1 Modélisation et validation du modèle . . . . .	12
1.6.1.1 Modèles analytiques . . . . .	12
1.6.1.2 Simulation . . . . .	13

1.6.2	Formalismes de Modélisation . . . . .	13
1.7	Problématique . . . . .	13
1.8	Conclusion . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Généralités sur les réseaux de capteurs</b>	<b>15</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	Définitions . . . . .	15
2.2.1	Capteur . . . . .	15
2.2.2	Capteur intelligent . . . . .	16
2.3	Classification des capteurs . . . . .	17
2.4	Réseaux de capteurs sans fil . . . . .	17
2.5	Domaines d'application des réseaux de capteurs . . . . .	18
2.6	Conclusion . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Systèmes et réseaux de files d'attente</b>	<b>21</b>
3.1	Introduction . . . . .	21
3.2	Caractéristiques d'un système d'attente . . . . .	21
3.2.1	Définition des files d'attente . . . . .	21
3.2.2	Notion de Kendall . . . . .	22
3.2.3	Mesures de performances . . . . .	22
3.3	Files d'attente Markoviennes . . . . .	23
3.3.1	File d'attente $M/M/1$ . . . . .	23
3.3.2	File d'attente $M/M/m/K$ . . . . .	24
3.4	Files d'attente non Markoviennes . . . . .	24
3.4.1	File d'attente $G/G/1$ . . . . .	24
3.5	Réseaux de files d'attentes . . . . .	25
3.5.1	Caractéristiques d'un réseau de files d'attente . . . . .	25
3.5.2	Différents types de réseaux . . . . .	26
3.5.3	Réseaux à forme produit . . . . .	26
3.5.4	Réseaux de Jackson . . . . .	26
3.5.4.1	Règles de routage . . . . .	27
3.6	Système multi-phases . . . . .	27
3.7	Conclusion . . . . .	28

<b>4</b>	<b>Modélisation et évaluation de performances d'une chaîne de production à base d'un réseau de capteurs sans fil</b>	<b>29</b>
4.1	Introduction . . . . .	29
4.2	Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	29
4.3	La contrainte énergétique . . . . .	30
4.4	Utilisation des RCSFs dans l'industrie . . . . .	31
4.4.1	Emplacement des capteurs sans fil . . . . .	31
4.5	Présentation de notre cas d'étude . . . . .	33
4.5.1	Présentation du système . . . . .	33
4.5.2	Cycle de maintenance . . . . .	33
4.5.3	Modélisation du système par un réseau de files d'attente . . . . .	35
4.5.4	Processus des arrivées . . . . .	36
4.5.5	Utilité des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	39
4.6	Simulation . . . . .	39
4.6.1	Étapes de la simulation . . . . .	39
4.6.2	Simulation à événements discrets . . . . .	40
4.6.3	Simulation et résultats numériques . . . . .	40
4.7	Conclusion . . . . .	41
	<b>Conclusion générale</b>	<b>42</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>43</b>

# Table des figures

1.1	Structure du complexe CEVITAL. . . . .	6
1.2	Les différentes lignes de production de margarine . . . . .	8
1.3	Remplisseuse . . . . .	9
1.4	Dateur . . . . .	9
1.5	Encartonneuse . . . . .	9
1.6	Palettiseur . . . . .	10
1.7	Bondroleuse . . . . .	10
1.8	Processus d'évaluation de performance. . . . .	11
2.1	Architecture matérielle simplifiée d'un capteur. . . . .	16
2.2	Les composants d'un nœud capteur. . . . .	16
2.3	Exemple d'un réseau de capteurs. . . . .	18
2.4	Quelques domaines d'application des RCSFs. . . . .	20
3.1	Un système de files d'attente. . . . .	22
3.2	Exemple d'un réseau de files d'attente. . . . .	25
3.3	Exemples de réseau de files d'attente (ouvert, fermé et mixte). . . . .	26
3.4	Structure d'un système "multi-phase" . . . . .	27
3.5	Modèle simple de réseau à deux phase avec blocage . . . . .	28
4.1	Les câbles des capteurs dans la chaîne de production. . . . .	30
4.2	Emplacement des capteurs sans fil au niveau de la chaîne. . . . .	31
4.3	Emplacement des capteurs au niveau des bacs. . . . .	32

4.4	Emplacement des capteurs au niveau de la pompe . . . . .	32
4.5	Emplacement des capteurs au niveau de la chaîne de conditionnement. . . . .	33
4.6	Schéma de la ligne de conditionnement. . . . .	34
4.7	Cycle de maintenance. . . . .	34
4.8	Système de réseau de files d'attente de la chaîne de conditionnement. . . . .	35
4.9	Système de la maintenance. . . . .	36

# Liste des tableaux

4.1	Distribution des temps des services pour le système 1. . . . .	38
4.2	Distribution des temps des services pour le système 2. . . . .	38
4.3	Distribution des temps des services pour le système 3. . . . .	38
4.4	Distribution des temps des services pour le système 4. . . . .	39
4.5	Résultats de la simulation pour le système de maintenance classique . . . . .	40
4.6	Résultats de simulation pour le système de maintenance avec RCSF. . . . .	41

# Introduction générale

L'unité de production de margarine de CEVITAL est un exemple d'automatisation des systèmes de production en Algérie. Dans tout le processus de sa fabrication, de la raffinerie jusqu'à son conditionnement, les différentes étapes de l'élaboration de margarine sont assurées par un matériel industriel automatisé où l'intervention humaine est réduite à la surveillance des différents paramètres des machines qui assure le bon fonctionnement de la chaîne de production [21].

Les systèmes de production présentent des problèmes divers tout au long de leurs cycles de vie. L'apport de l'automatisation et de l'information a tout d'abord été une solution efficace dans la recherche de la diminution des délais et l'augmentation de la qualité[21]. Cependant, cet apport reste insuffisant devant l'évolution rapide des systèmes actuels qui présentent aujourd'hui une grande complexité. Il apparaît que l'évaluation de leurs performances est un point clé, que ce soit pour leur dimensionnement ou pour leur conduite.

La première décision à prendre avant d'évaluer les performances d'un système est de décider quoi évaluer, c'est à dire de définir le système, sa configuration et les algorithmes sujets de l'évaluation de performances. Ces décisions englobent la sélection des métriques de performances, des paramètres de performances, cet ensemble de choix de base représente les entrées du processus d'évaluation de performances d'un système.

Les systèmes de files d'attente consistent à examiner le comportement au cours du temps de certaines grandeurs, comme la longueur des files d'attente, le temps de séjour et le temps d'attente des différents clients, qui en reflètent les performances [17].

La théorie des files d'attente est principalement vue comme une branche de la théorie des probabilités appliquées. Les applications sont dans différents domaines, par exemple les réseaux de transmission, les systèmes informatiques, les réseaux urbains, la banque et ainsi de suite. Cette théorie utilise des outils probabilistes pour étudier et modéliser le comportement d'un système donné [17].

Dans certains cas ; un client a besoin de recevoir plusieurs traitements avant de quitter le système. Par exemple, dans les systèmes de production, les banques, les systèmes informatiques, d'où la notion *réseaux de files d'attente*.

Les réseaux de files d'attente se composent de plusieurs files interconnectées. Ils sont bien établis en tant qu'outils analytiques puissants d'analyse et de modélisation des systèmes [16].

Dans le cadre de notre projet, nous nous intéressons au développement d'un modèle mathématique pour évaluer les performances de lignes de production constituées de plusieurs machines. Dans la modélisation, nous spécifions un réseau de files d'attente pour lequel nous concevons le modèle. Une fois le modèle établi, nous procédons à la dérivation des mesures de performances. La simulation exploite aussi les données de la spécification.

Notre travail a pour principal objectif de contribuer à l'évaluation des performances d'une chaîne de production de la direction de margarinerie de l'entreprise Cevital. Il s'agit d'étudier les performances de la chaîne actuelle et de les prévoir pour celle qui sera à base de réseau de capteur sans fil.

## Organisation du document

Nous avons organisé ce mémoire comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons le complexe Cevital, dont la chaîne de conditionnement de margarine est le sujet d'étude de mémoire. Après un aperçu général sur le complexe, nous présentons des généralités sur les systèmes de production.

En ce qui concerne le deuxième chapitre, nous avons introduit les notions de modélisation et évaluation de performances des systèmes de production (SdP), ainsi que les méthodes utilisées pour permettre de décrire l'évolution des facteurs de performance du système.

Ainsi, dans le troisième chapitre, nous présentons quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, en commençant par définir le capteur et son architecture, ensuite nous décrivons un réseau de capteurs sans fil et ses propriétés. Nous terminons par citer quelques domaines d'application de ces derniers.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des réseaux de files d'attente, en commençant par la présentation de quelques définitions sur la théorie des files d'attente ainsi que leurs propriétés.

Dans le cinquième chapitre, nous abordons la modélisation et l'évaluation de performances de la chaîne de conditionnement de margarine de l'entreprise Cevital. Nous présentons en premier lieu la modélisation de la chaîne. Ensuite, nous définissons l'emplacement des capteurs sans fil au niveau de la chaîne et nous modélisons un cycle de maintenance pour montrer l'intérêt de

l'installation d'un réseau de capteurs sans fil. Enfin, nous analysons les résultats des différents réseaux des files d'attente afin de déterminer le temps moyen de séjour d'un pôt dans la chaîne de production, ainsi que le temps moyen d'une détection d'une panne et de les comparer à ceux de l'entreprise avec le réseau de capteurs filaire actuel.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés dans ce mémoire, ainsi que des perspectives.

# Le complexe Cevital et l'évaluation des performances

## 1.1 Introduction

CEVITAL fait partie des entreprises algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays en économie de marché. C'est une société par action (SPA). Elle a été créée par de fonds privés en 1998. Son complexe de production se situe au niveau du port de BEJAIA s'étend sur une superficie de 45000  $m^2$ .

CEVITAL contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale. Elle a même l'ambition de s'imposer sur le marché international, notamment maghrebin [1].

### 1.1.1 Activités et missions

Lancé en Mai 1998 ; le complexe CEVITAL a débuté sur son activité par le conditionnement en décembre 1998. En février 1999, les travaux de génie civil de la raffinerie ont débuté. Cette dernière est devenue fonctionnelle en août 1999 [1].

L'ensemble des activités de CEVITAL est concentré sur la production des huiles végétales ; de la margarine, du sucre et produit sur une gamme de produits, à savoir :

- Raffinage des huiles avec capacité de production de 1800T/J ;
- Conditionnement des huiles ;
- Production de margarines avec une capacité de 6000T/J ;
- Fabrication d'emballage en Poly-Ethylène-Téréphtalique(PET) ;

- Raffinage de sucre avec capacité de production de 1600T/J ;
- Sucre liquide.

CEVITAL a lancé plusieurs variétés d'huile et de margarine à savoir :

#### 1. Les huiles

- FLEURIAL :100% tournesol commercialisée depuis août 1999 ;
- SOYA :100% soja commercialisée depuis septembre 1999 ;
- CANOVA :100% colza commercialisée depuis fin septembre 1999 ;
- OLEOL1 :100% tournesol commercialisée depuis début avril 2000 ;
- OLIVA : huile d'olive raffiner ;
- RRIDOR : huile végétal 100% équilibrée ;
- OLEOL2 : 60% tournesol, 40% soja ;
- OLEOL3 :60% tournesol,30% soja, 10% huile d'olive ;
- D'HAN : tournesol goût beurré.

#### 2. Margarines

- SHORTING (graisse végétal) ;
- SHORTING (graisse végétal) ;
- MARGARINE de feuilltage-la parisienne ;
- FLEURIAL (tartilage de cuisson) plaquettes 250 gr ;
- CREME chocolaterie (type nutila).

## 1.2 Les différentes unités de production du pôle corps gras

Cevital a subdivisé sa production en trois unités principales [2].

### 1.2.1 Unité de raffinage

Le raffinage constitue une étape clé de la technologie de production des huiles et des margarines. L'opération de raffinage sert à éliminer les composés indésirables dans les huiles brutes. L'unité de raffinage est composée de trois lignes de production :

- La ligne (A) et la ligne (B) de capacité 400 T/J ;
- La ligne (C) de capacité 1000 T/J.

Les différentes huiles brutes raffinées par CEVITAL sont classées en :

- Huiles fluides ;
- Huiles saturées (concrètes).

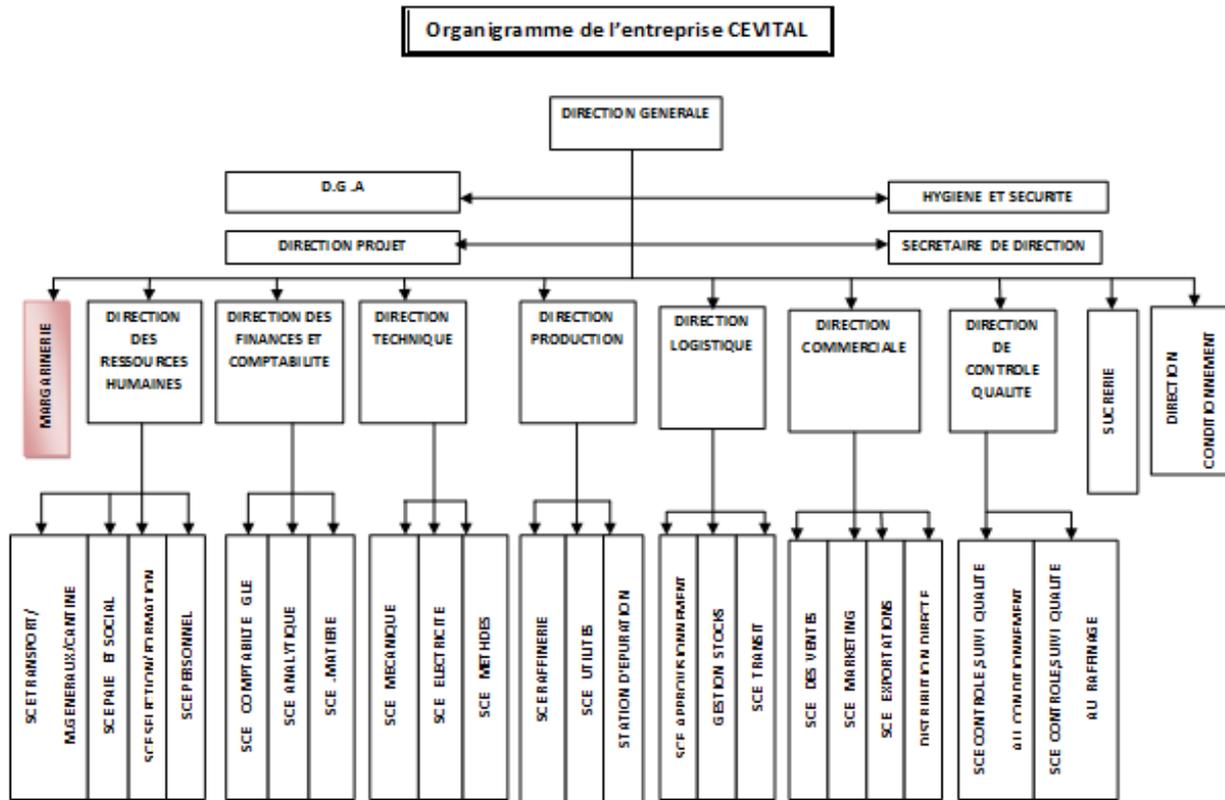


FIGURE 1.1 – Structure du complexe CEVITAL.

### 1.2.2 Unité de Margarine

CEVITAL s’est aussi engagée dans la production de la margarine à partir de 2001, cette unité est équipée de machines allemandes et françaises telles Schröder et NOVA, sa capacité de production atteint les 600 T/J.

o La margarinerie produit essentiellement 4 grandes familles de produits qui sont :

1. Margarine de table :

- Fleurial 250 g ;
- Matina 400 g ;
- Elio 500 g ;
- Elio 250g.

2. Graisses végétales :

- Shortening 3840 ;
- graisse de Palm ;
- Smen 1.8 kg ;

- Smen 900 g ;
  - Smen 500 g.
3. Margarines boulangères :
- Feuilletage 500 g.
4. . Beurre et margarine de table 5 kg : commandes spéciales.
- o L'unité de Margarine comporte 5 lignes de production :

**Ligne 1** : pour barquettes de 250 gr et de 500 gr de Fleurial et de Smen et 400 gr de Matina.



**Ligne 2** : pour plaquette de 250 gr Fleurial et de 500 gr de Feuilletage.



**Ligne 3** : pour plaquette de 5 kg de Beurre ou de margarine de table, feuilletage 500 gr et pour Fleurial 250 gr.

**Ligne 4 et 5** : elle produit juste les graisses végétales (Smen 1.8 kg et Smen 900 gr, Shortening 38/40, graisses de palmiste).



L'unité de production de la margarinerie est constituée de plusieurs lignes illustrées sur la figure (1.2) [2] :

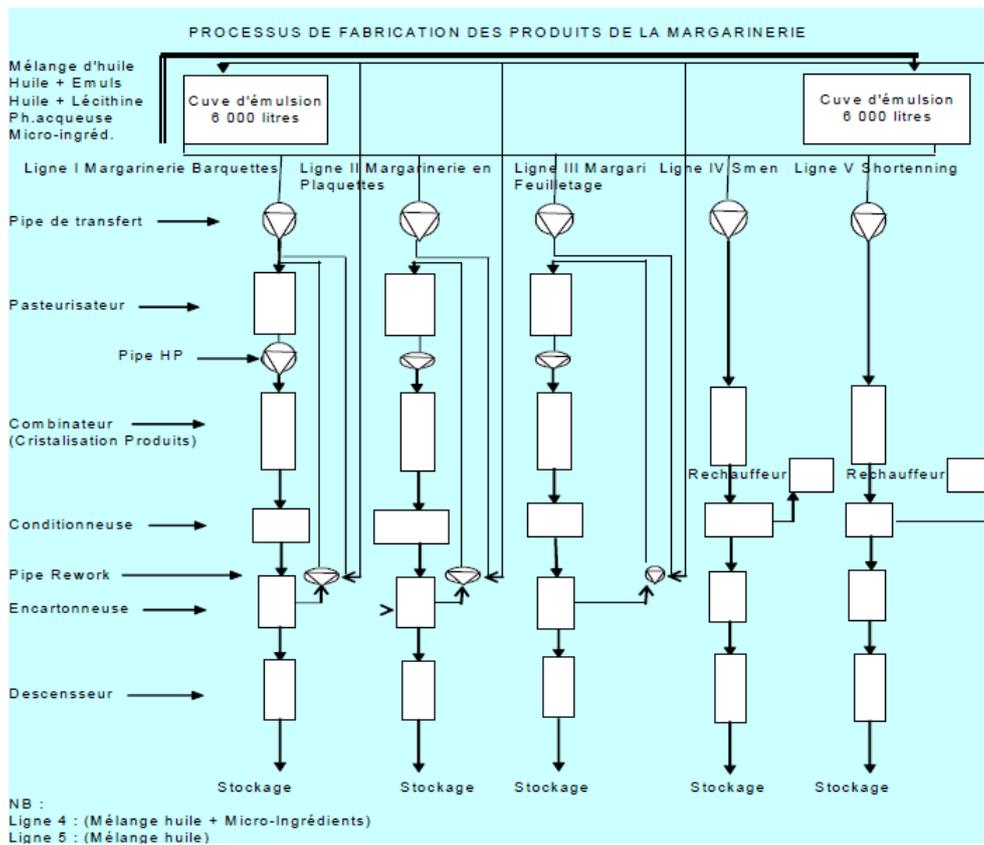


FIGURE 1.2 – Les différentes lignes de production de margarine

### 1.2.3 Présentation des machines de la ligne de conditionnement

**Remplisseuse** : la remplisseuse est une machine qui fait remplir les pots de Smen.



FIGURE 1.3 – Remplisseuse

**Dateur pot** : c'est une machine destinée à inscrire la date sur chaque pot avec l'heure de fabrication du produit.



FIGURE 1.4 – Dateur

**Encartonneuse** : Cette machine met chaque 4 pots de 1,8 kg (8 pots de 900 g) dans un carton.



FIGURE 1.5 – Encartonneuse

**Dateur carton** : c'est une machine destinée à inscrire la date sur chaque carton avec l'heure de fabrication du produit.

**Palettiseur** : son rôle est de mettre les cartons dans les palettes.



FIGURE 1.6 – Palettiseur

**Bondroleuse** : son rôle est d'entourer toutes les palettes d'un film en silicone.



FIGURE 1.7 – Bondroleuse

### 1.3 Évaluation des performances des systèmes informatiques dans une chaîne de production

L'objectif de notre travail est d'évaluer les performances des systèmes de production (SdP) de l'entreprise Cevital. Les systèmes de production ont connu et connaissent toujours une évolution rapide due au développement technologique. Par conséquent, la modélisation de ces systèmes est devenue très complexe, ce qui rend la résolution et l'analyse des modèles très longue et difficile.

### 1.4 Évaluation des performances

La modélisation et l'évaluation des performances des SdP restent une préoccupation principale des différentes communautés scientifiques. Aussi, ceci nécessite l'utilisation des méthodes

mathématiques permettant de décrire l'évolution des facteurs de performances du système. En fonction des résultats, on pourra décider s'il est nécessaire de modifier le système pour améliorer ses performances ou non [3].

## 1.5 Méthodes d'évaluation des performances

L'évaluation des performances se fait en deux étapes, une étape de modélisation et une étape d'analyse des performances (Figure 1.3) [3].

1. **Modélisation** : la modélisation est une abstraction mathématique d'un système réel, elle consiste à représenter un système réel par un modèle mathématique. Un modèle détaillé donne des résultats précis, mais il présente une difficulté à l'analyse et l'inverse pour un modèle moins détaillé (résultats peu précis, mais une analyse facile).
2. **Analyse** : on distingue deux types d'analyses :
  - Analyse qualitative qui permet la vérification d'une manière précise des propriétés comportementales et structurelles du système : telle que le non blocage, la vivacité, etc.
  - Analyse quantitative qui s'intéresse au calcul des indices de performances. On distingue deux familles de méthodes d'analyse quantitative : par simulation, par outils analytiques.

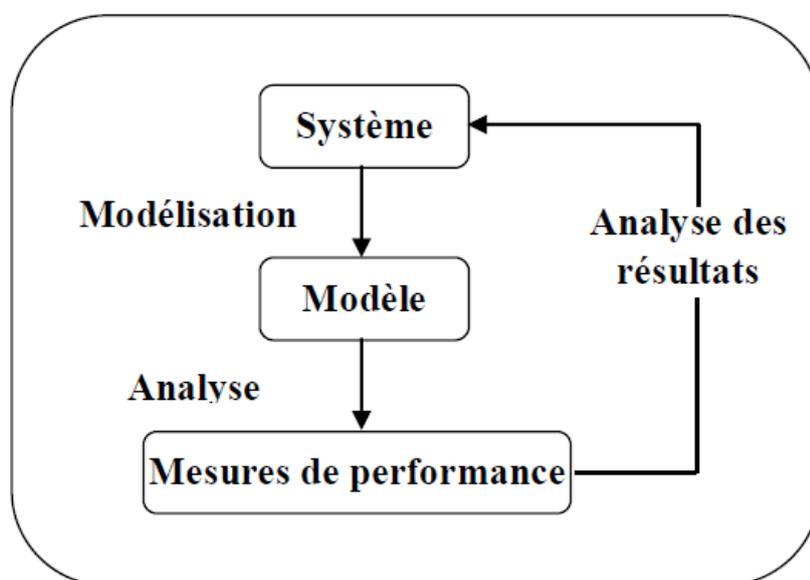


FIGURE 1.8 – Processus d'évaluation de performance.

## 1.6 Techniques d'évaluation de performances

Il existe deux techniques fondamentales qui peuvent être employées pour évaluer l'exécution des systèmes informatiques [3] :

- ◇ La prise de mesures des systèmes réels.
- ◇ La modélisation d'un système d'approximation du système réel par une approche mathématique (en utilisant par exemple les files d'attente) ou par l'approche de simulation en utilisant des logiciels.

### 1.6.1 Modélisation et validation du modèle

La modélisation est le processus de production d'un modèle. Un modèle est une représentation de l'architecture et le fonctionnement d'un système donné. Un modèle est similaire mais plus simple que le système qu'il représente. Le but d'un modèle est de permettre à l'analyste de prévoir l'effet des changements sur le système réel. Le modèle doit être une approximation forte du système réel et contenir la plupart de ses importantes caractéristiques [4].

#### 1.6.1.1 Modèles analytiques

Un modèle analytique tente de capturer le comportement du système dans une équation mathématique. Les modèles analytiques sont très utiles pour obtenir rapidement quelques informations sur l'exécution globale du système.

Des modèles plus sophistiqués tel que les réseaux de files d'attente peuvent être développés pour déterminer le comportement que fournit un système global dans différentes conditions. Ces types de modèles analytiques font des hypothèses sur la durée de temps écoulée entre les tâches arrivant au système, et le temps requis au traitement des tâches. Les modèles analytiques sont également très utiles pour analyser rapidement l'impact de changement des valeurs de certains paramètres. Cependant, les résultats finaux obtenus sont bons seulement si les hypothèses faites lors de la modélisation sont bonnes.

**Validation d'un modèle analytique et sa résolution :** bien que le modèle analytique est supposé être une représentation simplifiée du système réel, la résolution de quelques modèles analytiques peut être complexe et donc peut faire appel à d'autres méthodes de validation du modèle telle que la simulation.

### 1.6.1.2 Simulation

Un modèle destiné à une étude de simulation, est un modèle développé à l'aide d'un simulateur. Un simulateur n'est autre qu'un programme informatique écrit dans un langage informatique, tels que C, C++, Java,... Le programme est conçu pour modéliser les caractéristiques d'un système informatique dont l'analyse de performance lui est destinée. Puisque le simulateur est juste un programme, il peut être souvent facile à modifier pour changer le comportement du système étudié [4].

## 1.6.2 Formalismes de Modélisation

Historiquement, les recherches en modélisation et l'évaluation de performances sont toujours deux sujets très liés. En général, la modélisation permet de représenter un système de production par des paramètres et de considérer les relations entre ces différents paramètres [3].

Les travaux les plus anciens viennent de l'analyse directe des processus stochastiques et plus généralement des chaînes de Markov. Ce formalisme des chaînes de Markov est l'un des formalismes de modélisation le plus ancien et aussi un des plus employés dans l'évaluation de performances.

Vers la fin des années 50, Jackson a développé une nouvelle approche basée sur les réseaux de files d'attente. Les recherches dans ce domaine ont connu un formidable essor jusqu'à la fin des années 70, ce formalisme est devenu très populaire à la fin des années 80. Dans l'objectif de répondre à la complexité des nouvelles générations de systèmes de production, plusieurs techniques et formalismes de modélisation ont été développés au cours des dernières années. La forme structurée de ces formalismes de haut-niveau permet de prendre en compte l'aspect compositionnel et hiérarchique des systèmes.

Un grand nombre d'approches ont adopté les Réseaux de Pétri (RdP) comme formalisme de base qui permet de modéliser le comportement de systèmes et de capturer divers phénomènes qui les caractérisent. Des extensions ont été ajoutées aux RdP comme par exemple les réseaux de Pétri stochastiques (RDPS) qui sont souvent utilisés pour la modélisation et l'évaluation de performances des systèmes de production.

## 1.7 Problématique

La détection d'une panne d'une machine au niveau de la chaîne de production avec un système de réseau de capteurs filaire (système classique) se fait en moyenne en un temps de

15 minutes, et cela est un temps important. Ce qui engendre des charges indirectes pour l'entreprise, en perdant pour 15 minutes de retard une production de 420 pots.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit essentiellement les outils issus de la théorie des processus stochastiques de la modélisation et de l'évaluation de performance des systèmes de production.

# Généralités sur les réseaux de capteurs

## 2.1 Introduction

Les récentes avancées technologiques dans le domaine de la micro-électronique, de l'informatique et des technologies sans fil ont permis de développer des dispositifs miniatures capables de relever des mesures physiques, généralement dans un environnement hostile. Ces dispositifs sont appelés *capteurs sans fil*.

La transmission des données collectées se fait d'un nœud capteur à un autre jusqu'à atteindre une station de collecte (Sink ou station de base), formant ainsi un réseau de capteurs sans fil (RCSF) [5]. Pour leurs caractéristiques très variées et leurs faible coût de production, les réseaux de capteurs sans fil sont très utilisés dans plusieurs domaines, allant du domaine militaire au domaine médical, en passant par l'industrie, l'écologie, la domotique, l'agriculture... [6].

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'architecture de communication d'un capteur sans fil, et les différents domaines d'application de cette technologie.

## 2.2 Définitions

### 2.2.1 Capteur

Un capteur est le dispositif qui transforme une grandeur observée (température, pression, niveau...) en une grandeur utilisable (intensité électrique, position d'un flotteur)[7].

Pour cela, il possède au moins un transducteur dont le rôle est de convertir une grandeur physique en une autre.

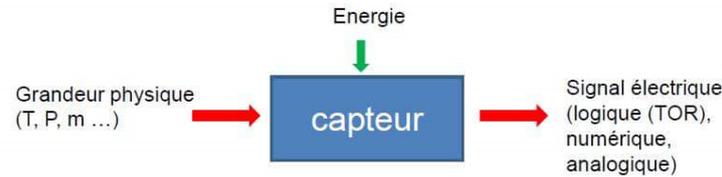


FIGURE 2.1 – Architecture matérielle simplifiée d'un capteur.

### 2.2.2 Capteur intelligent

Le terme *capteur intelligent* (Smart sensor ou intelligent sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques. Par rapport à un capteur classique, un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement des données, aux calculs et à la communication numérique. Il est donc caractérisé par sa capacité à effectuer une collecte des mesures, les traiter et à les communiquer au monde extérieur.

La deuxième définition étant la plus utilisée pour définir un capteur, on constate que le mot capteur est utilisé par abus de langage pour désigner un capteur intelligent.

Il est composé de quatre unités principales [5][8]. Une plate-forme générique d'un nœud capteur est illustrée dans la figure(2.2)[7]. Nous expliquons le rôle de chaque composant ci-dessous :

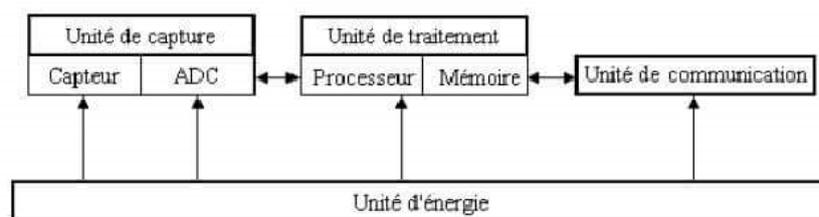


FIGURE 2.2 – Les composants d'un nœud capteur.

• **Unité de capture (Sensing Unit)** : elle permet de capter le phénomène observé et le convertir depuis un signal analogique en numérique. Il sera, ensuite, fourni à l'unité de traitement ;

• **Unité de traitement (Processing Unit)** : généralement, on la trouve sous le nom de l'unité de micro contrôleur (MCU : Micro Controller Unit). Les données captées sont communiquées au processeur où elles sont stockées dans la mémoire.

• **Unité de communication (Transceiver Unit)** : elle est composée d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau.

• **Unité d'énergie (Power Unit)** : c'est la batterie qui n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les RCSF. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique.

## 2.3 Classification des capteurs

Il existe plusieurs modes pour classifier les capteurs mais le plus répandu est celui qui tient compte de l'apport énergétique.

- **Capteurs actifs** Ce type de capteurs est constitué d'un ou plusieurs transducteurs alimentés tels que les chronomètres mécaniques. Ce sont des capteurs que l'on pourrait modéliser par des générateurs comme les systèmes photovoltaïques et électromagnétiques. D'où ils génèrent soit un courant, soit une tension en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré.
- **Capteurs passifs** Ces capteurs n'ont pas besoin d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner. Ils sont modélisables par une impédance. Ainsi une variation du phénomène physique mesuré engendre une variation de l'impédance.

## 2.4 Réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil ou WSN (Wireless Sensor Network) sont un type particulier de réseau Ad-hoc. Ils se composent généralement d'un grand nombre de capteurs communicants entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif [9]. Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations par exemple sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée, qui est rendue accessible à l'utilisateur

externe par un ou plusieurs nœud(s). Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via les autres capteurs de proche en proche à un "point de collecte", appelé station de base (ou SINK s'il s'agit d'un nœud). Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite. En outre, l'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt [10]. La figure (2.3) représente un exemple d'un réseau de capteurs sans fil.

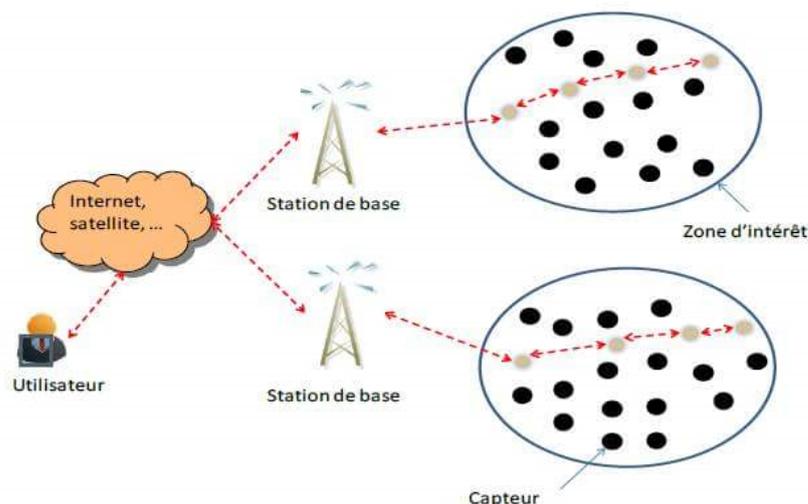


FIGURE 2.3 – Exemple d'un réseau de capteurs.

## 2.5 Domaines d'application des réseaux de capteurs

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibration...) et l'évolution des supports de communication sans fil, ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. Parmi elles, nous citons[9] :

- **Applications militaires** : on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des ennemis, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) [9].

- **Applications environnementales** : le déploiement des capteurs (thermo-capteurs) dans une forêt, par exemple, peut détecter un éventuel début de feu et informer les pompiers pour

accélérer leur intervention avant la propagation du feu [5].

• **Applications agricoles** : dans les champs agricoles, les capteurs peuvent être semés avec les graines [9]. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc plus efficace.

• **Applications sécuritaires** : plusieurs projets ont été lancés pour assurer la sécurité en utilisant les RCSFs, notamment, dans le domaine militaire. On trouve des applications dédiées à la protection des unités militaires contre toutes éventuelles attaques [5].

• **Applications domotiques** : nous imaginons très bien les maisons de futur où une véritable interaction avec les capteurs embarqués permettra de contrôler localement ou à distance des appareils domestiques. Ces smart home, c'est à dire ces maisons intelligentes, vont faciliter les activités domestiques quotidiennes telles que l'automatisation de l'activation/l'extinction de la lumière qui existe déjà dans certains garages ou encore la mise en marche automatique de la télévision, la climatisation ou le chauffage lorsqu'il y a présence dans le salon [10].

• **Applications médicales** : les réseaux de capteurs ont aussi des développements dans le domaine de diagnostic médical. Par exemple, des micro-caméras sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures [9].

• **Applications industrielles** : intégration des micro-capteurs dans un processus de stockage et de livraison de marchandises peut être utilisée pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Pour les entreprises manufacturières [6], les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré.

La figure (3.4) [6] ci-dessous montre quelques domaines d'application cités précédemment.

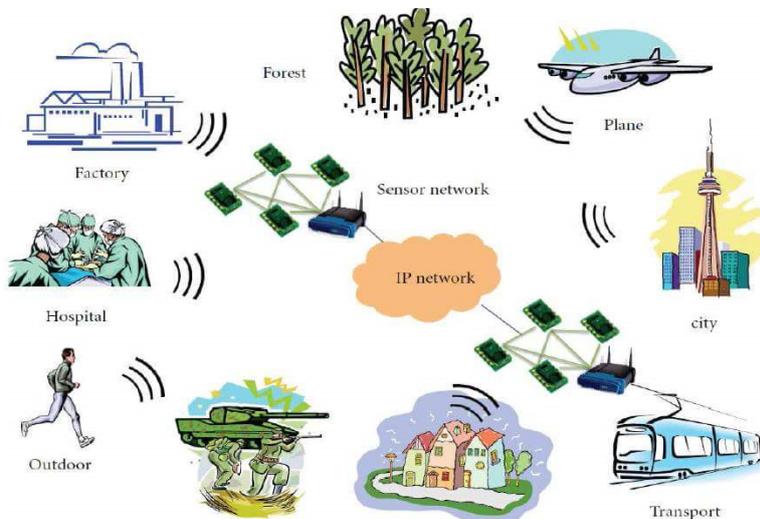


FIGURE 2.4 – Quelques domaines d'application des RCSFs.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une présentation des réseaux de capteurs, leurs domaines d'applications. Cette étude nous permet de poser les briques de base et fédérer quelques concepts nécessaires à la compréhension de la problématique.

# Systemes et reseaux de files d'attente

## 3.1 Introduction

Les origines de la théorie des files d'attente remontent à 1904, lorsque Erlang en a posé les bases dans ses recherches sur le trafic téléphonique. Plusieurs auteurs ont utilisé la théorie des files d'attente dans différents domaines, à savoir l'informatique, les systèmes de production, la logistique militaire et dans d'autres domaines régis par le phénomène d'attente.

La théorie des files d'attente est une technique de la recherche opérationnelle qui permet de modéliser un système admettant un phénomène d'attente, de calculer ses performances et de déterminer ses caractéristiques pour aider les gestionnaires dans leurs prises de décisions [11].

## 3.2 Caractéristiques d'un système d'attente

### 3.2.1 Définition des files d'attente

Une file d'attente est un système stochastique composé d'un certain nombre (fini ou non) de places d'attente d'un ou de plusieurs serveurs et bien sûr des clients qui arrivent, attendent se font servir selon des règles de priorité données et quittent le système.

La description précédente d'une file d'attente, dont une représentation schématique est donnée en figure (4.1), ne saurait capturer toutes les caractéristiques des différents modèles que comptent la littérature mais elle identifie les éléments principaux permettant la classification de la grande majorité des files d'attente simples.

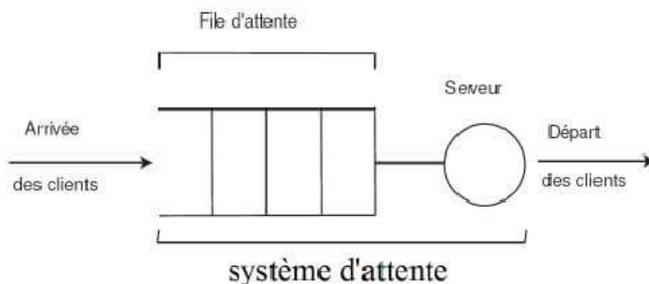


FIGURE 3.1 – Un système de files d'attente.

### 3.2.2 Notion de Kendall

Afin de simplifier la description des 3 ou 6 éléments décrivant une file, Kendall a introduit la notion suivante [12].

Formule abrégée :  $A/S/m$

Formule complète :  $A/S/m/K/P/D$

La signification de chacun de ces symboles est :

- A : processus d'arrivée ;
- S : processus de service ;
- m : nombre de serveurs ;
- K : capacité de la file ( $\infty$ ) ;
- P : taille de la population ( $\infty$ ) ;
- D : discipline de service (FIFO).

Pour les processus d'arrivée et de service, les symboles les plus courants sont :

- M loi exponentielle (memoryless) ;
- D loi déterministe (temps d'inter-arrivée ou de service constants) ;
- G loi générale (les résultats sont vrais pour toute loi) ;

Pour la discipline de service, ils sont :

- FIFO premier arrivé, premier servi (*first in, first out*) ;
- LIFO dernier arrivé, premier servi (*Last in, first out*) ;
- PS temps partagé (*processor sharing*).

### 3.2.3 Mesures de performances

L'étude d'une file d'attente a pour but de calculer ou d'estimer les performances d'un système dans des conditions de fonctionnement donnée. Ce calcul se fait le plus souvent pour le régime stationnaire uniquement et les mesures les plus fréquemment utilisées sont :

- $\bar{N} = E(X)$  = nombre moyen de clients dans le système ;
- $\bar{Q}$  = nombre moyen de clients dans la file d'attente ;
- $\bar{T}$  = temps moyen de séjour d'un client dans le système ;
- $\bar{W}$  = temps moyen d'attente d'un client dans la file ;

Ces valeurs ne sont pas indépendantes les unes des autres, mais sont liées par les relations suivantes :

- $\bar{N} = \lambda \bar{T}$  (Formule de Little), où  $\lambda$  représente le taux d'arrivées ;
- $\bar{Q} = \lambda \bar{W}$  ;
- $\bar{T} = \bar{W} + \frac{1}{\mu}$ , où  $\mu$  représente le taux de service ;
- $\bar{N} = \bar{Q} + \rho$  ;

Généralement, une file est stable si et seulement si le nombre moyen d'arrivées de clients par unité de temps, noté  $\lambda$ , est inférieur au nombre moyen de clients pouvant être servis par unité de temps. Si chaque serveur peut traiter  $\mu$  clients par unité de temps et si le nombre de serveurs est  $m$ , une file est stable si et seulement si

$$\lambda > m\mu \iff \rho = \frac{\lambda}{m\mu} < 1.$$

. Où  $\rho$  est appelé l'intensité du trafic.

### 3.3 Files d'attente Markoviennes

#### 3.3.1 File d'attente $M/M/1$

Cette file modélise un guichet unique où chaque client reçoit un service dont la durée est une variable exponentielle de paramètre  $\mu$  (indépendante de tout autre élément affectant le système) et où l'arrivée des clients correspond à un processus de Poisson de taux  $\lambda$  (les temps entre deux arrivées successives sont des variables aléatoires i.i.d, selon une loi exponentielle de paramètre  $\lambda$ ). Les caractéristiques de ce système sont données par les relations suivantes :

- La probabilité qu'il y ait  $n$  clients dans le système à l'instant d'entrée est :

$$P_n = P_0 \rho^n, n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad \text{avec} \quad P_0 = 1 - \rho$$

- Le taux d'utilisation du serveur est :

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}.$$

- Le nombre moyen de clients présents et en attente sont :

$$\bar{N} = \frac{\rho}{1 - \rho}, \bar{Q} = \frac{\rho^2}{1 - \rho}.$$

– Le temps moyen de réponse et d'attente sont :

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu - \lambda}, \bar{W} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}.$$

### 3.3.2 File d'attente $M/M/m/K$

La file  $M/M/m/K$  est une file markovienne composée de  $m$  serveurs et disposant de  $K$  places au total. Le nombre maximal de clients en attente est donc  $K - m$ . Si un client arrive alors que le système est plein, il ne peut y entrer et doit repartir. Elle est donc toujours stable quel que soit l'intensité du trafic  $\rho = \lambda/m\mu$

Le taux de service de cette file est :

$$\mu_k = : \begin{cases} k\mu, \text{ pour } k=1,2,\dots,m-1; \\ m\mu, \text{ pour } k=m,m+1,\dots,K. \end{cases}$$

Comme tout client arrivant alors que le système est plein doit repartir, le taux effectif d'arrivées dans le système n'est pas  $\lambda$  mais  $\lambda = \sum_{k=0}^{K-1} \lambda P_k = \lambda(1 - P_K)$

Où,  $P_k$  est la probabilité qu'il y ait  $k$  clients dans le système.

Ayant calculé comme suit :

$$\bar{N} = \sum_{k=1}^K kP_k \quad \text{et} \quad \bar{Q} = \sum_{k=m+1}^K (k - m)P_k,$$

C'est ce taux effectif  $\lambda$  qu'il faut utiliser pour calculer  $\bar{T}$  et  $\bar{W}$  à l'aide de la formule de Little.

## 3.4 Files d'attente non Markoviennes

Les files d'attente non markoviennes sont des processus stochastiques complexes, voire très difficiles à traiter de manière exacte et en toute généralité. Les développements se simplifient parfois pour les files où  $m = 1$ , mais les résultats exacts existent essentiellement pour des cas particuliers. De nombreuses approximations sont cependant disponibles, de plus ou moins bonne qualité. L'une des plus simples est directement issue de la formule de Pollaczek-Khinchin.

### 3.4.1 File d'attente $G/G/1$

Malgré l'apparente simplicité du modèle [13], la file  $G/G/1$  est un système complexe pour lequel seules des approximations et des bornes existent dans le cas général. En effet, soit  $\bar{A}$  le temps moyen entre deux arrivées successives de clients ( $\lambda = 1/\bar{A}$  est le taux d'arrivée) et  $\bar{S}$  le

temps moyen de service d'un client ( $\mu = 1/\bar{S}$  est le taux de service).

Le temps moyen d'attente dans la file est

$$\bar{Q}_{G/G/1} \simeq \left( \frac{C_A^2 + C_S^2}{2} \right) \bar{Q}_{M/M/1}$$

## 3.5 Réseaux de files d'attentes

La modélisation d'un système à l'aide d'une seule file d'attente n'offre qu'un champ d'application restreint. Bien souvent, un client a besoin de recevoir plusieurs traitements consécutifs et de différentes natures avant de quitter un système.

Les réseaux de files d'attentes permettant de modéliser de telles situations et correspondent à des systèmes composés de plusieurs files d'attentes reliées entre elles [17]. Lorsqu'un client quitte une file, il peut se diriger vers une nouvelle station du réseau ou sortir définitivement du système. Ces décisions sont dictées par des règles de routage qui peuvent être déterministes ou stochastiques [14].

Un réseau de file d'attente est simplement un système composé d'une ou plusieurs files d'attentes reliées entre elles. Les clients (dans les cas les plus simples, tous identiques) une fois leur service termine dans une station (file), se déplace vers une autre station ou quittent le système selon des règles de routage.

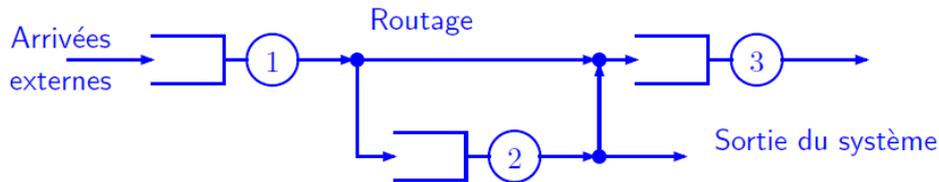


FIGURE 3.2 – Exemple d'un réseau de files d'attente.

### 3.5.1 Caractéristiques d'un réseau de files d'attente

Un réseau de files d'attente est caractérisé par [15] :

- **Le chemin suivi par les clients dans le système** : ce chemin peut être soit statique (chaque client va de serveur en serveur suivant une route prédéterminée), soit dynamique (après le service dans une station, le client a le choix entre plusieurs autres stations pour poursuivre son traitement. Ce choix est éventuellement pondéré par les fonctions de probabilité).
- **Les classes de clients** : plusieurs classes de clients peuvent être présentes dans le système.

Tous les clients appartenant à une même classe suivront le même chemin. Par contre, à l'intérieur de la station, les différentes classes restent en compétition pour recevoir leur traitement.

### 3.5.2 Différents types de réseaux

Principalement, on distingue trois types de réseaux [16] :

- Réseaux ouverts : un réseau est ouvert si tout client présent ou entrant dans le système peut le quitter.
- Réseaux fermés : un réseau est fermé si les clients ne peuvent le quitter. Dans un réseau fermé, le nombre de client est généralement fixe et ces derniers sont présents dans le système dès le début de son évolution.
- Réseaux mixtes : un réseau est mixte s'il est ouvert pour certains clients et fermé pour d'autres.

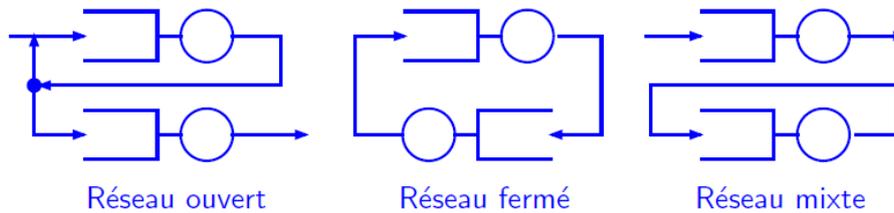


FIGURE 3.3 – Exemples de réseau de files d'attente (ouvert, fermé et mixte).

### 3.5.3 Réseaux à forme produit

La définition la plus simple de l'état d'un réseau consiste à définir l'état  $x(t)$  du système au temps  $t$  comme le vecteur  $(x_1(t) \dots x_n(t))$  où  $x_j(t)$  est le nombre de clients présents à l'instant  $t$  dans la file  $j$  [18].

Sous certaines conditions, un réseau stable possède une distribution stationnaire  $\pi^*$  de la forme :

$$\pi^* = \pi^*(x_1 \dots x_n) = \prod_{j=1}^n \pi_j^*(x_j) .$$

Un tel réseau est dit à forme produit et se comporte comme autant  $n$  files indépendantes de distributions stationnaires respectives  $\pi_j^*$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

### 3.5.4 Réseaux de Jackson

Un réseau de Jackson est composé de  $n$  files exponentielles c'est-à-dire de files d'attente :

- Comportant chacune un ou plusieurs serveurs identiques ( $m_j$  pour la file  $j$ ) ;

- Fournissant des services de durée exponentielle (le taux de service de la file  $j$  est noté  $\mu_j$ );
- De capacité infinie;
- Utilisant une discipline de service FIFO.

Les clients (appartenant tous à la même classe) arrivent dans le système selon des processus de Poisson indépendants, le taux d'arrivée externe dans la file  $j$  étant égal à  $\gamma_j$ .

### 3.5.4.1 Règles de routage

Après avoir terminé son service à la station  $j$ , un client se déplace à la station  $k$  avec une probabilité  $r_{jk}$  et quitte le système avec une probabilité  $r_{j0}$  où :

$$r_{j0} = 1 - \sum_{k=1}^n r_{jk}.$$

De telles règles définissent un **routage markovien**.

## 3.6 Système multi-phases

On convient d'appeler ainsi le réseau de configuration particulière représenté sur la figure suivante[20] :

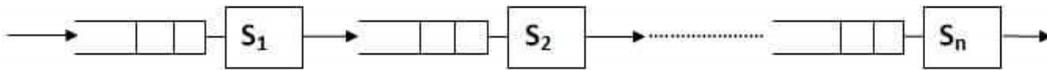


FIGURE 3.4 – Structure d'un système "multi-phase"

Un tel système est constitué de  $n$  stations  $S_1, S_2, \dots, S_n$  disposées en série. Chaque station  $S_i$  est constituée de  $m_i$  serveurs statistiquement identiques et fonctionne selon le schéma classique. L'itinéraire de chaque usager est donné par l'algorithme suivant :

$a = (i, i + 1, \dots, j_1, j)$ , où  $i$  est le numéro de la phase initiale de service de l'utilisateur et  $j$  celui de la dernière phase.

Le flot des arrivées dans le système  $S_i$  est la somme du flot des arrivées en provenances de la source extérieure et de celui des usagers qui quittent  $S_{i-1}$  pour se rendre dans  $S_i$ .

Soit :

- Les taux du flot des arrivées dans  $S_i$  en provenances de l'extérieur;
- Le taux du flot des départs de  $S_i$  vers l'extérieur;

- Le taux du flot total des arrivées dans  $S_i$  ;
- La probabilité pour qu'à l'issue de son séjour à la phase  $S_i$  le client quitte la station.

Dans le paragraphe suivant nous démontrons un résultat analogue pour les réseaux exponentiels.

Un modèle plus complexe à analyser est le système multi-phases avec blocage. Les phénomènes de blocage résultent généralement de la limitation de la capacité des files d'attente. Lorsque la file de  $k^{ime}$  phase est pleine[20], alors le service à la  $(k - 1)^{ime}$  phase est bloqué jusqu'à ce qu'une place se libère, un exemple de ce type modèle est représenté sur la figure suivante :

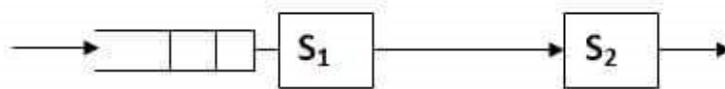


FIGURE 3.5 – Modèle simple de réseau à deux phase avec blocage

Dans ce système, il ne peut y avoir formation de file d'attente à la seconde phase. Cette disposition des stations entraîne des situations de blocage du premier serveur (les requêtes n'ont pas accès au service) même dans le cas où le service de la requête est terminé et que la file n'est pas vide. Le service reprend dès que le second serveur se libère et la requête bloquée accède à la seconde phase. Soit :

$$S(t) = \begin{cases} 1, & \text{si une requête est en cours dans } S_1 ; \\ 0, & \text{si une requête est bloqué.} \end{cases}$$

$$E(t) = \begin{cases} 1, & \text{Si le serveur } S_2 \text{ est libre ;} \\ 0, & \text{S'il est bloqué.} \end{cases}$$

### 3.7 Conclusion

Chaque file d'attente est caractérisée par son processus d'arrivée, taux de service et la discipline de la file. Dans certains systèmes, un client accomplit son travail en passant par plusieurs serveurs d'où la notion des réseaux de *files d'attente*.

Les réseaux de files d'attente ont une très grande importance car ils servent à modéliser des systèmes physiques ; ils permettent d'évaluer les performances et ils aident à mieux comprendre le comportement de ces systèmes.

# Modélisation et évaluation de performances d'une chaîne de production à base d'un réseau de capteurs sans fil

## 4.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont un cas particulier des réseaux ad-hoc. Ces derniers possèdent typiquement des contraintes supplémentaires, les rendant massivement accessibles et à faible coût; de tels capteurs représentent une solution idéale dans l'industrie, ceci en comparaison avec les équipements traditionnels, par exemple ces dispositifs sont plus efficaces que les capteurs filaires, de part de leur facilité de mise en place, etc

Tout d'abord, nous détaillons les principes de fonctionnement des capteurs sans fil (la manière dont ces derniers peuvent détecter les pannes). Ensuite, nous modélisons le système à étudier constitué des quatre machines de la chaîne de conditionnement de la margarine de l'entreprise CEVITAL.

## 4.2 Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil

Le besoin d'observer et éventuellement de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore le niveau est essentiel pour de nombreuses applications industrielles, pour cela le service de production de la margarine de l'entreprise Cevital a adopté

un système de contrôle, qui est un système de réseau de capteurs filaire. Les câbles sont généralement coûteux, encombrant, difficiles à installer et peu pratiques à l'usage. De plus, dans des domaines industriels où l'appareil est soumis à des contraintes vibratoires très importantes, leur connectique représente une faiblesse qui augmente considérablement le risque de panne.



FIGURE 4.1 – Les câbles des capteurs dans la chaîne de production.

Les câbles représentent un poids non négligeable qu'il est absolument nécessaire de limiter par une infrastructure plus légère. Dans cette démarche de forte limitation des câbles, le sans fil permet d'aller encore plus loin.

L'installation d'un réseau de capteurs sans fil permet non seulement de réduire le câblage et les coûts d'installation, mais offre aussi plus de flexibilité pour faire évoluer une installation existante et favorise les actions de diagnostic et de maintenance, donc l'utilisation des capteurs intelligents fait :

- Repousser la limite du nombre de capteurs ;
- Supprimer le coût du câblage ;
- Rendre le processus plus souple.

### 4.3 La contrainte énergétique

Il serait erroné de penser que le passage d'un réseau de capteurs filaires à un réseau de capteurs sans-fil s'effectuerait par le simple remplacement des fils par des modules radio et l'intégration d'une alimentation de type batterie au niveau de chaque capteur.

La communication sans-fil consomme généralement beaucoup d'énergie. L'énergie disponible au niveau d'un capteur sans-fil est souvent très limitée, voire inexistante. Plus un capteur est distant, plus il a besoin d'énergie pour communiquer.

Dans notre cas l'emplacement des capteurs sans fil au niveau de la chaîne de conditionnement, la contrainte d'énergie ne pose pas des problèmes, puisque on peut facilement effectuer

des changements des batteries, vue de leur emplacement accessible. Ou on peut directement les brancher à une alimentation.

## 4.4 Utilisation des RCSFs dans l'industrie

Dans cette partie, nous allons étudier l'utilisation des capteurs sans fil dans le milieu industriel afin de visualiser et de surveiller en temps réel les différents procès dans divers endroits de la chaîne de conditionnement de la margarine.

### 4.4.1 Emplacement des capteurs sans fil

La mise en place d'un réseau de capteurs sans fil s'avère une solution efficace pour visualiser et surveiller en temps réel les différents procès dans divers endroits et de transmettre plus rapidement l'information de panne au service de maintenance pour que les responsables puissent la réparer rapidement avant que ne se produise l'arrêt de la chaîne.

Les capteurs sans fil sont placés comme suit :

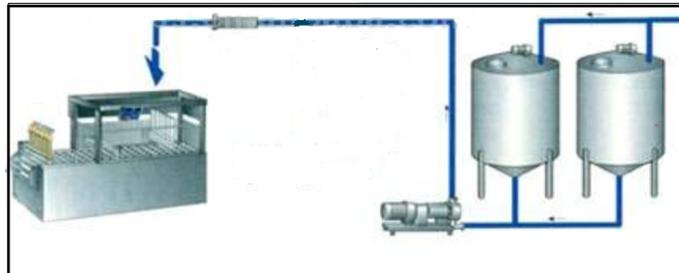


FIGURE 4.2 – Emplacement des capteurs sans fil au niveau de la chaîne.

### 1. Les bacs

Des capteurs de niveau et de température sont placés au niveau des deux bacs de Smen afin de mesurer et contrôler le niveau de produit et sa température.

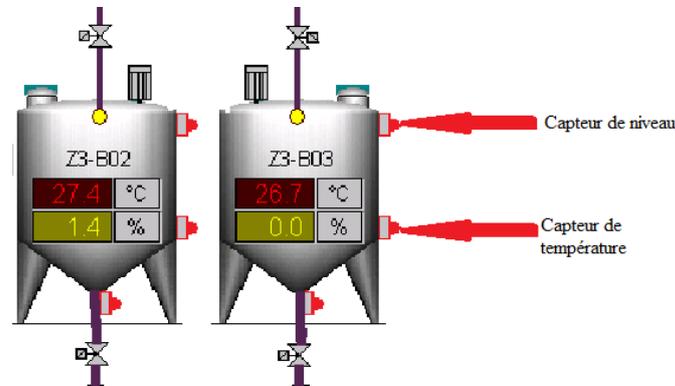


FIGURE 4.3 – Emplacement des capteurs au niveau des bacs.

### 2. Moteur à pompe

Lors du convoyage de produits, le débit doit être surveillé. L'utilisation des capteurs surveillent le débit pour éviter la marche à sec de la pompe de manière fiable.

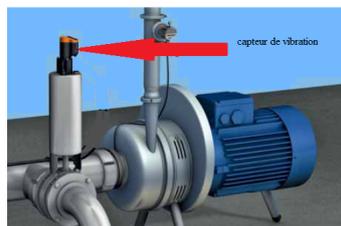


FIGURE 4.4 – Emplacement des capteurs au niveau de la pompe .

### 3. Chaîne de conditionnement

Il est bien connu qu'avant qu'une pièce d'un équipement technique tombe en panne, des changements se produisent dans son comportement opérationnel. La machine peut commencer à faire des sons différents ou à vibrer plus fortement, ou devenir chaude. Les capteurs sont conçus pour le montage fixe sur une machine (moteur, pompe, ventilateur,...). Ils surveillent continuellement le niveau des vibrations ou de la température, ainsi l'équipe de maintenance peut prendre des mesures à temps afin d'éviter une défaillance de la machine et des dommages secondaires.

- Remplisseuse : capteurs pour contrôler le remplissage et la position des pots.
- Encartonneuse : capteurs pour détecter le pot dans le carton ainsi les cartons mal fermés.
- Palettiseur : capteurs pour contrôler la hauteur et l'empilement correct pendant la mise en palette.

- Banderoleuse : capteurs pour le contrôle d'accès, pour positionner la palette pleine dans la banderoleuse aissi pour détecter le films transparents.

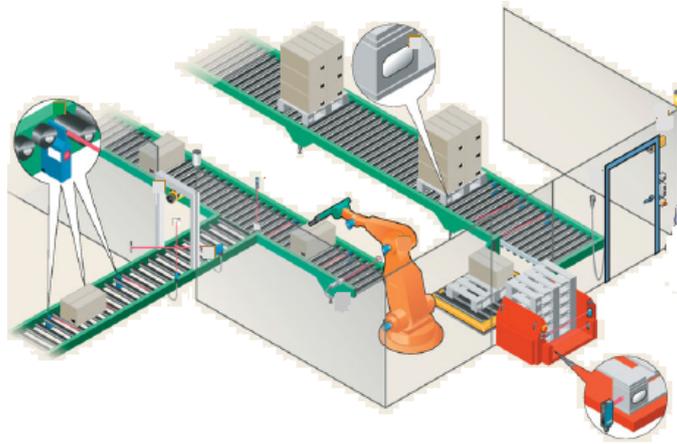


FIGURE 4.5 – Emplacement des capteurs au niveau de la chaîne de conditionnement.

## 4.5 Présentation de notre cas d'étude

Nous proposons d'étudier la chaîne de conditionnement de la margarine dans le cas classique (système filaire), et après l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil, où nous estimons les paramètres ( temps moyen d'attente, taille des files d'attente) par une simulation.

### 4.5.1 Présentation du système

La ligne de conditionnement de la margarine de l'entreprise Cevital est une suite de module de conditionnement. Chaque module est composé d'une station de travail (machine).

La ligne de conditionnement est schématisée comme suit :

### 4.5.2 Cycle de maintenance

Dans le cas où la machine est opérationnelle, souvent elle est sujet à une défaillance aléatoire. Dès qu'elle tombe en panne, le service de production lance une demande de travail au service de maintenance. La machine est mise en attente d'une opération de maintenance, un ordre de travail est envoyé par le service de maintenance pour favoriser la phase de réparation. La machine est maintenant réparée.

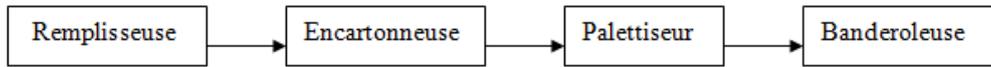


FIGURE 4.6 – Schéma de la ligne de conditionnement.

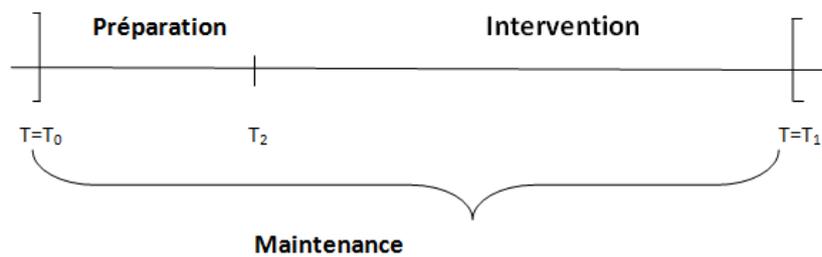


FIGURE 4.7 – Cycle de maintenance.

- $[T_0, T_1]$  : Arrêt de la machine ;
- $[T_0, T_2]$  : Préparation de l'intervention ;
- $[T_2, T_1]$  : Intervention.

### 4.5.3 Modélisation du système par un réseau de files d'attente

Afin de représenter le fonctionnement du processus de maintenance, on a eu recours à la modélisation par les réseaux de files d'attentes.

Le modèle du réseau de files d'attente correspondant à la chaîne de conditionnement en tenant en compte la maintenance figure (4.8) :

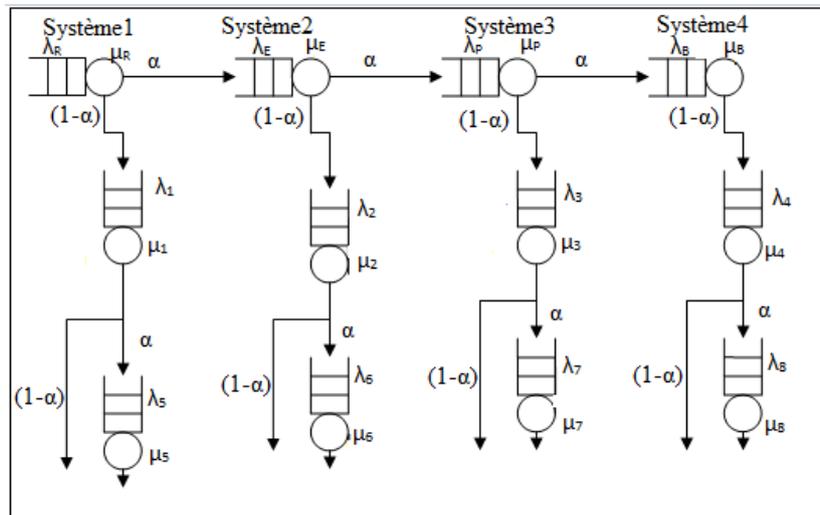


FIGURE 4.8 – Système de réseau de files d'attente de la chaîne de conditionnement.

**Système1** : Remplisseuse ;

**système2** : Encartonneuse ;

**système3** : Palettiseur ;

**système4** : Bandroleuse.

Les instants d'arrivées des pannes sur les machines suivent des processus de Poisson de paramètre  $\lambda$ , et que les durées de service de la panne sur les différents serveurs, suivent des lois exponentielles de paramètres  $\mu_i$ .

En cas ou la machine est opérationnelle, les arrivées passent directement à la machine suivante avec une probabilité  $\alpha$ . Sinon, si la machine tombe en panne, elle passe à la maintenance avec une probabilité  $(1 - \alpha)$ .

#### Processus de maintenance

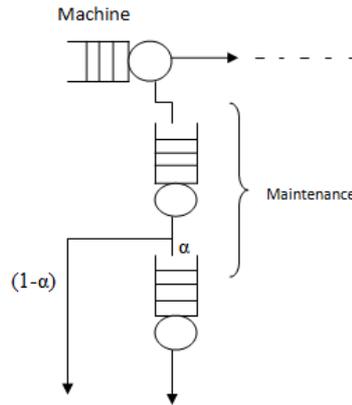


FIGURE 4.9 – Système de la maintenance.

Le réseau de files d'attente correspondant à la maintenance est composé de deux stations qui représentent les différents services de la maintenance :

- Sous système1 : représente la machine (remplisseuse, encartonneuse, palettiseur ou la banderoleuse).
- Sous système2 : préparation de l'intervention.
- Sous système3 : intervention.

Le sous système 2 et le sous système 3 représentent le cycle de la maintenance.

#### 4.5.4 Processus des arrivées

Les données dont nous disposons sont le nombre de pannes dans la chaîne de conditionnement sur une période de trois mois. Ces données sont résumées par les variables suivantes :

$A_i$  : Représente le nombre d'arrivées par seconde pour la  $i^{me}$  machine,  $i = \overline{1, 4}$ . Le traitement statistique appliqué aux données permet la détermination des lois des arrivées pour chaque machine. Pour cela, on a eu recours au test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov.

L'ajustement des lois des arrivées par des lois théoriques s'est fait grâce au logiciel **EasyFit**. Ce logiciel nous a permis de tester des ajustements par différentes lois discrètes ou continues. Il affiche à chaque essai les valeurs de Kolmogorov-Smirnov calculées, afin de pouvoir les comparer aux valeurs théoriques et de décider ensuite de rejeter ou d'accepter l'hypothèse  $H_0$  "  $A_i \rightarrow Poisson(\lambda_i)$  " contre  $H_1$  "  $A_i \not\rightarrow Poisson(\lambda_i)$  ".

Le risque d'erreur lors de la prise de décision est fixé à un seuil de confiance de 95%.

1. Les arrivées à la remplisseuse sont poissonniennes. En effet, la valeur de la statistique de Kolmogorov-Smirnov est **0.22808**. Elle est inférieure à la valeur critique qui est **0,43001** à un seuil de confiance de 5%. Donc l'échantillon prélevé nous permet d'accepter

l'hypothèse  $H_0$  (c-à-d les arrivées sont poissonniennes et cela au niveau de 95%) avec :

$$\lambda_R = 0.0012 \text{ pannes/minutes.}$$

2. Les arrivées de la remplisseuse au service de la préparation sont poissonniennes.

$$\lambda_1 = (1 - \alpha)\mu_R.$$

3. Les arrivées de service de la préparation au service de la réparation sont poissonniennes.

$$\lambda_5 = \acute{\alpha} * \mu_1.$$

4. Les arrivées à l'encartonneuse sont poissonniennes. En effet, la valeur de la statistique de Kolmogorov-Smirnov est **0.37299**. Elle est inférieure à la valeur critique qui est **0,45427** à un seuil de confiance de 5%. Donc l'échantillon prélevé nous permet d'accepter l'hypothèse  $H_0$  (c-à-d les arrivées sont poissonniennes et cela au niveau de 95%) avec :

$$\lambda_E = 0.0009 \text{ pannes/minutes.}$$

Les arrivées de l'encartonneuse au service de la préparation sont poissonniennes.

$$\lambda_2 = (1 - \alpha)\mu_E.$$

Les arrivées de service de préparation au service de réparation sont poissonniennes.

$$\lambda_6 = \acute{\alpha} * \mu_2.$$

5. Les arrivées au palettiseur sont poissonniennes. En effet, la valeur de la statistique de Kolmogorov-Smirnov est **0.38243**. Elle est inférieure à la valeur critique qui est **0,43001** à un seuil de confiance de 5%. Donc l'échantillon prélevé nous permet d'accepter l'hypothèse  $H_0$  (c-à-d les arrivées sont poissonniennes et cela au niveau de 95%) avec :

$$\lambda_P = 0.0005 \text{ pannes/minutes.}$$

Les arrivées de la palettiseur au service de préparation sont poissonniennes.

$$\lambda_3 = (1 - \alpha)\mu_P.$$

Les arrivées de service de préparation au service de réparation sont poissonniennes.

$$\lambda_7 = \acute{\alpha} * \mu_3.$$

6. Les arrivés à la bondroleuse sont poissonniennes. En effet, la valeur de la statistique de Kolmogorov-Smirnov est **0.22808**. Elle est inférieure à la valeur critique qui est **0,43001** à un seuil de confiance de 5%. Donc l'échantillon prélevé nous permet d'accepter l'hypothèse  $H_0$  (c-à-d les arrivées sont poissonniennes et cela au niveau de 95%) avec :

$$\lambda_B = 0.0001 \text{ pannes/minutes.}$$

Les arrivées de la bondroleuse au service de préparation sont poissonniennes.

$$\lambda_4 = (1 - \alpha)\mu_B.$$

Les arrivées de service de préparation au service de réparation sont poissonniennes.

$$\lambda_8 = \acute{\alpha} * \mu_4.$$

### Distribution des temps des services

· n : le nombre de panne de chaque machine pendant 3 mois.

Observation	n	La loi	Le paramètre	La valeur statique	Test KS $\alpha=0.05$	Remarque
Préparation	15	Exponentiel	$\mu_1=0.0065$	0.22808	0.4527	Accepter
Réparation	15	Exponentiel	$\mu_2=0.00885$	0.26432	0.3376	Accepter

TABLE 4.1 – Distribution des temps des services pour le système 1.

Observation	n	La loi	Le paramètre	La valeur statique	Test KS $\alpha=0.05$	Remarque
Préparation	9	Exponentiel	$\mu_3=0.0015$	0.36399	0.48342	Accepter
Réparation	9	Exponentiel	$\mu_4=0.00885$	0.45427	0.47757	Accepter

TABLE 4.2 – Distribution des temps des services pour le système 2.

Observation	n	La loi	Le paramètre	La valeur statique	Test KS $\alpha=0.05$	Remarque
Préparation	8	Exponentiel	$\mu_5=0.0071$	0.32472	0.51926	Accepter
Réparation	8	Exponentiel	$\mu_6=0.00789$	0.32225	0.39122	Accepter

TABLE 4.3 – Distribution des temps des services pour le système 3.

Observation	n	La loi	Le paramètre	La valeur statique	Test KS $\alpha=0.05$	Remarque
Préparation	10	Exponentiel	$\mu_7=0.0079$	0.49115	0.51926	Accepter
Réparation	10	Exponentiel	$\mu_8=0.0168$	0.39601	0.40925	Accepter

TABLE 4.4 – Distribution des temps des services pour le système 4.

### 4.5.5 Utilité des réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est une solution efficace pour réduire le temps de détection d'une panne, et par la suite la réduction du temps de maintenance. Ce dernier influe sur la chaîne de production en évitant l'arrêt momentanément de cette chaîne. Nous allons montrer cette influence par une étude d'un cycle de maintenance avec un temps de lancement d'une demande de travail plus petit que celui de la chaîne avec le système classique.

#### Processus des arrivées

En ajoutant des capteurs sans fil à la chaîne, avec un temps de lancement d'une demande de travail (préparation) plus petit que celui de la chaîne avec le système classique, on aura les taux des arrivées suivant pour chaque système :

- **Système 1** : taux d'attente d'une réparation  $\lambda= 0.05$  pannes /minute ;
- **Système 2** : taux d'attente d'une réparation  $\lambda= 0.0018$  pannes /minute ;
- **Système 3** : taux d'attente d'une réparation  $\lambda= 0.0078$  pannes /minute ;
- **Système 4** : taux d'attente d'une réparation  $\lambda= 0.005$  pannes /minute.

## 4.6 Simulation

Dans cette partie, nous simulons par événements discrets le réseau de files d'attente (figure 5.4). L'objectif de cette analyse est d'obtenir les mesures de performances nécessaires pour prouver l'intérêt de l'intégration des RCSFs dans les systèmes de production.

### 4.6.1 Étapes de la simulation

1. Construction du modèle de simulation ;
2. Implémentation du modèle ;
3. Validation du modèle de simulation ;
4. Exécution du simulateur et analyse de données.

### 4.6.2 Simulation à événements discrets

La simulation par événements discrets consiste à prendre en compte, dans la modélisation des tâches actives, les seuls instants où un événement se produit et à concentrer l'activité des tâches simulées sur ces instants là.

Dans ce cas, les variables décrivant un état ne changent qu'en un nombre fini de points sur l'axe des temps. Ces points sont des instants où se passent les événements [19]. Pour une station de files d'attente, les événements généralement considérés sont :

- L'arrivée d'une panne à la station,
- La prise en charge d'une panne par le serveur,
- La sortie de panne de la station.

### 4.6.3 Simulation et résultats numériques

Dans le but d'évaluer les performances du système en question, nous avons élaboré un modèle de simulation qui peut reproduire le comportement du système correspondant.

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de simulation pour la maintenance dans les quatre stations (Remplisseuse, Encartonneuse, palettiseur, et la banderoleuse). Nous utilisons MATLAB pour simuler le comportement du système.

Les paramètres de simulation d'intérêt principaux sont le temps moyen de la maintenance "W" et le temps moyen de séjour d'un pot dans la chaîne lors d'une panne "Q". Ces mesures sont choisies car elles montrent l'intérêt de l'utilisation des RCSFs dans la production et leur effets sur ce dernier.

#### Résultats de la simulation

Après la simulation sur MATLAB, on a obtenu les résultats suivants :

	Système de maintenance classique			
	Système1	Système2	Système3	Système4
W	22.9299	21.1581	19.9576	20.9803
Q	33.8399	32.0681	30.8676	31.8903

TABLE 4.5 – Résultats de la simulation pour le système de maintenance classique .

le temps moyen de la maintenance de chaque machine et le temps moyen de séjour d'un pot dans la chaîne lors d'une panne sont représentés respectivement dans les tableaux (TABLE 5.5) et (TABLE 5.6)

	Système de maintenance avec RCSF			
	Système1	Système2	Système3	Système4
W	10.6481	15.5026	14.8134	14.8497
Q	21.5581	26.4126	25.7234	25.7597

TABLE 4.6 – Résultats de simulation pour le système de maintenance avec RCSF.

### Discussions

D'après les résultats obtenus, on remarque que les mesures de performances évaluées (Q ,W) sont améliorées d'une manière significative, avec notre approche. En effet :

Le temps moyen de la maintenance d'une machine avec le réseau de capteurs sans fil est plus petit que dans le système classique.

Le temps moyen de séjour d'un pot dans la chaîne lors d'une panne de la machine avec le réseau de capteurs sans fil est plus petit que dans le système classique. En comparant les temps de maintenance de chaque machine obtenue pour le système classique avec le système avec réseau de capteur sans fil, l'entreprise gagne un temps de 7.5530 *minutes* pour chaque maintenance.

Ce résultat montre que la nouvelle approche est capable de minimiser le temps de la maintenance en réduisant le temps de détection de la panne grâce aux capteurs réagissant aux événement en temps réel.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons prouvé l'efficacité de notre approche basée sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons simulé le modèle correspondant avec un système classique et le modèle correspondant avec un système de contrôle avec RCSFs. Les résultats obtenus à partir de la simulation, nous indiquent clairement l'utilité des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de production.

# Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin de cycle, nous nous sommes intéressés à l'évaluation des performances de la chaîne de conditionnement de margarine à base des réseaux de capteur sans fil du complexe Cevital. En utilisant le réseau des fils d'attente pour atteindre notre objectif.

En premier lieu, nous avons modélisé la chaîne de conditionnement en utilisant le réseau des fils d'attente. Nous avons réduit notre modèle en nous intéressant aux machines qui vont être muni par le service de maintenance de réseaux de capteur sans fil. Puis, nous avons étudié son fonctionnement. Nous avons obtenu ses métriques de performances en utilisant MATLAB.

Notre étude a prouvé l'efficacité d'ajouter un cycle de maintenance à notre chaîne de conditionnement, afin d'estimer l'utilité de munir des réseaux de capteurs à la chaîne de production.

Nous avons constaté que l'installation des réseaux capteurs sans fil va réduire le temps de la maintenance au cours d'une panne, ce qui améliore les performances de la chaîne.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ouvrent de nouvelles perspectives telles que :

- Généraliser le contrôle de tout le système de production de l'entreprise par un RCSFs, ce qui nécessite la gestion du système de communication (Accès au médium et routage), afin d'éviter les interférences ;
- L'évaluation de performances du réseau des capteurs sans fil ;
- Faire une étude et généraliser la mise en place des réseaux de capteur sans fil sur les cinq lignes de productions, pris au niveau de toute l'unité de production.

# Bibliographie

- [1] *Catalogue et documentations techniques du constructeur CEVITAL.*
- [2] *Documentations commerciales et techniques de CEVITAL*
- [3] A. BENFARHI, "Réseaux d'automates stochastiques pour l'évaluation de performances des systèmes de production." Mémoire de Magister de l'université El-Hadj Lakhder Batna. 2012.
- [4] L. BOUKANTAR, "Evaluation de Performances de Protocoles de Validation Atomique dans l'Environnement sans Fil et Mobile." Mémoire de Magister Institut National d'Informatique. 2006.
- [5] M. ATMANI, "Proposition et validation formelle d'un mécanisme d'accès au medium pour les réseaux de capteurs sans fil". Thèse de Doctorat, Université de Béjaia. 2015.
- [6] Y. YOUNES, "Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs". Mémoire de Magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2012.
- [7] F. BRISSAUD, D. CHARPENTIER, A. BARROS et C. BÉRENGUER, "Capteurs intelligent : Nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sûreté de fonctionnement." Maître des Risques et de la Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon. 2008.
- [8] S. MOAD, "Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". Thèse de Doctorat de l'université de RENNES1. 2012.
- [9] M. LEHSAINI, "Diffusion et couverture basée sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique". Thèse de Doctorat de l'université de Tlemcen. 2009.
- [10] K. BEYDOUM, "Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs". Thèse de Doctorat de l'université de franche-comté. Décembre. 2009.
- [11] D. CHEDOM FOSTO, L. P. FOSTO, "Étude et simulation du phénomène d'attente dans un système bancaire : Approximations des mesures de performances des files d'attente M/G/c" Département d'informatique Université de Yaoundé I. 2010.

- [12] J-F. HÊCHE, "*Chaîne de Markov finies et homogènes à temps discret.*" Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2004.
- [13] T. M. LIEEBLIN, D. DEWERRA and J.F. HECHE, "*Recherche opérationnelle pour ingénieurs.*" Presses Polytechniques et Université Romandes. 2003.
- [14] S. HOUCINE, et N. ZAREB, "*Détermination du nombre optimal de camions remorqueurs au niveau du terminal à conteneurs BMT.*", Mémoire d'ingénieur de l'université de Béjaia. 2009.
- [15] S. FDIDA, et G. HERBUTERNE, "*Méthodes exactes d'analyse de performance des réseaux.*" Edition Lavoisier. 2004.
- [16] J-F. HÊCHE, "*Les réseaux de files d'attente*", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2010.
- [17] D. DJOUHRA, "*Modélisation et simulation du flux dans un réseau pour la régulation du trafic*", Mémoire de magister de l'université d'Oran. 2011.
- [18] I. ALIOUA, A. DJOUDER, "*Gestion de trafic Urbain à base de Réseau de Capteurs sans fil : Cas de la ville de bejaia.*" Mémoire de Master Béjaia. 2012.
- [19] L. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, "*Modélisation et simulation des systèmes Informatiques et réseaux de télécommunications*", Cours Ecole Doctorale Informatique, Université de Béjaia, 2009.
- [20] A. AISSANI, D. AISSANI, "*Réseaux de files d'attente.*" Institut d'informatique, U.S.T.H.B. Alger. 1988.
- [21] S. BELHABIB, S. HABTICHE, "*Evaluation de performances d'une chaîne de production à base de réseaux de capteurs sans fil.*" Mémoire de Master Béjaia. 2012.

## Résumé

---

*Pour évaluer les performances d'une ligne de production de l'entreprise CEVITAL, dont les machines peuvent être sujettes à des défaillances aléatoires, en utilisant des approches mathématiques, nous spécifions les réseaux de files d'attente pour modéliser un système de production. Dans ce travail, notre objectif principal est de contribuer à l'évaluation des performances d'une chaîne de production de la margarine. Il s'agit de proposer un modèle et d'étudier les performances de la chaîne actuelle en tenant compte le cycle de la maintenance. Pour montrer l'intérêt de l'implémentation des capteurs sans fils au niveau de la chaîne, nous proposons un nouveau modèle et nous calculons les performances de ce dernier. Nos résultats montrent clairement que l'utilisation des capteurs sans fils est une solution efficace pour réduire le temps de détection des pannes et par conséquent la réduction de temps de la maintenance.*

---

**Mots clés :** *Evaluation de performances, Système de production, Réseaux de files d'attente, Modélisation, Simulation.*

---

## Abstract

---

*To evaluate the performances a line of production the company CEVITAL, that machines can prone to random failures, by using mathematical approaches, we specify the networks of queues to model a system of production. In this work, our principal objective is to contribute to the performance evaluation of chains of production of the margarine. It is a question of proposing a model and studying the performances of the chains current by holding account the cycle of maintenance. To show the interest the implementation of the sensors without wire on the level of the chains, we propose a new model and we calculate the performances of this last. Our results show clearly that the use of the sensors without wire is an effective solution to reduce the time of detection of the breakdowns and consequently the reduction of time of maintenance.*

---

**Key words :** *Performances of evaluation , production of system, Networks of queues, Modeling, Simulation .*