

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA - Béjaïa



Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'Obtention du Diplôme de Master
En Recherche Opérationnelle

Option : Fiabilité et Evaluation de Performances des Réseaux

THÈME

***Evaluation de performances d'une chaîne de production
à base de réseaux de capteurs sans fil
Cas de la ligne de conditionnement d'huile Cevital***



Réalisé par :

M^{elle} BELHABIB Siham

M^{elle} HABTICHE Sonia

Soutenu devant le jury composé de :

Président	M ^r	M. Yazid	M.A.B	Université de Béjaïa
Rapporteur	M ^r	D. Aissani	Professeur	Université de Béjaïa
Co-Rapporteur	M ^r	F. Semchedine	M.C.B	Université de Béjaïa
Examinatrice	M ^{me}	S. Ouyahia	M.A.A	Université de Béjaïa
Examinatrice	M ^{me}	S. Hakmi	M.A.B	Université de Béjaïa
Invité	M ^r	A. Chemali	Service maintenance	Cevital

Jun, 2012



**Louange A Dieu, le miséricordieux, sans Lui rien de tout cela
n'aurait pu être.**

Nous tenons à remercier *M^r* D. Aissani ainsi que *M^r* F. Semchedine d'avoir accepté de diriger notre travail avec une 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 adressons des remerciements particuliers à notre encadreur au niveau de l'entreprise Cevital *M^r* A. Chemali, responsable du service maintenance de Direction Conditionnement d'huile.

Nous n'oublierons pas de remercier l'ensemble du personnel du bureau " Service Méthode et Maintenance " pour leur bon accueil et leur disponibilité, ainsi que le service informatique en particulier *M^r* A. Boukhercha et *M^r* M. Slimani pour leur bon accueil.

Nous tenons aussi à remercier *M^r* M. Yazid d'accepter de présider le jury de soutenance.

Nous remercions également, *M^{me}* S. Ouyahia et *M^{me}* S. Hakmi qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer notre travail.

*F*inalement, nous tenons à remercier vivement nos parents pour leur soutien constant et leur amour qui est le meilleur des encouragements.

*Ce travail est dédié à nos parents
à toutes nos familles...
et nos meilleurs amis...*

Table des matières

Liste des Tableaux	iv
Liste des Figures	v
Introduction Générale	vi
1 L'Entreprise Cevital et l'Evaluation des Performances	1
1.1 Présentation et historique de l'entreprise	1
1.2 Activités et missions de Cevital	2
1.3 Organisation de l'entreprise	3
1.4 Les différentes unités de production du pôle corps gras	4
1.4.1 L'unité de raffinage	4
1.4.2 L'unité de conditionnement	4
1.5 Présentation du conditionnement de l'huile	4
1.5.1 Services de conditionnement d'huile	4
1.6 Etude de l'existant	5
1.6.1 Les utilités	5
1.6.2 Présentation des différentes lignes de conditionnement d'huile	6
1.6.3 Etude d'une ligne de conditionnement d'huile 5LA	7
1.6.4 Présentation des machines	7
1.7 La Recherche Opérationnelle à Cevital	8
1.8 Problématique	9
1.8.1 Contexte de travail	10
1.8.2 Positionnement du sujet	10
1.9 Généralités sur les systèmes de production	10
1.9.1 Les composants d'un système de production	10
1.9.2 Types de systèmes de production	11
1.10 Modélisation	12
1.10.1 Modélisation des systèmes de production	13
1.11 Évaluation de performances	13
1.11.1 Rôle de l'évaluation de performances	14
1.11.2 Concept de l'évaluation de performances	14
1.11.3 Étapes d'évaluation de performances	14

1.11.4	Techniques de l'évaluation de performances	15
1.11.5	Obtention des indices de performances	16
2	Réseaux de capteurs sans fil	18
2.1	Capteur	18
2.2	Architecture d'un capteur	18
2.3	Réseaux de capteurs sans fil	19
2.4	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	20
2.5	Caractéristiques d'un réseau de capteurs	20
2.6	Applications des réseaux de capteurs	21
3	Réseaux de Petri	24
3.1	Notion de : Condition-Place et Évènement-Transition	24
3.2	Définitions et concepts de base	25
3.2.1	Structure d'un réseau de Petri	25
3.2.2	Représentation d'un réseau de Petri	26
3.2.3	Dynamique des RdP	27
3.3	Propriétés des réseaux de Petri	29
3.3.1	Réseau borné	29
3.3.2	Réseau sans blocage	30
3.3.3	Vivacité	30
3.4	Classes des réseaux de Petri	30
3.4.1	Réseaux de Petri généralisés	31
3.4.2	Réseaux de Petri à arcs inhibiteurs	31
3.4.3	Réseaux de Petri colorés	31
3.4.4	Réseaux de Petri temporisés	32
3.4.5	Réseaux de Petri temporels	33
3.5	Réseaux de Petri stochastiques	33
3.5.1	Réseaux de Petri stochastiques	34
3.5.2	Types de réseaux de Petri stochastiques	35
3.5.3	Graphe des marquages	35
3.5.4	La chaîne de Markov associé à un RdPSG	36
3.5.5	Les probabilités d'état	36
3.5.6	Evaluation des indices de performances	36
4	Modélisation et évaluation de performances de la chaîne de production à base d'un réseau de capteurs sans fil	38
4.1	Description du système de conditionnement	38
4.2	Modélisation de la chaîne de production	39
4.2.1	Objectif de la modélisation	39
4.2.2	Choix de l'outil de modélisation	39
4.2.3	Principe de la modélisation	39
4.2.4	Modèle d'un stock	40
4.2.5	Modèle de la chaîne de production	41
4.3	Emplacement des capteurs sans fil	43
4.3.1	Conduites 40 bars et 7 bars	43

4.3.2	Les bacs	44
4.3.3	Cuve à filtre	44
4.4	Modèle réduit	44
4.5	Evaluation de performances de la chaîne réduite	45
4.5.1	Description du logiciel TimeNet	45
4.5.2	Application	46
4.5.3	Interprétation des résultats	47
4.6	Modèle de la chaîne avec une maintenance	47
4.6.1	Principe de la modélisation	48
4.6.2	Modélisation d'un cycle de maintenance	48
4.6.3	Principe de modélisation	48
4.6.4	Explication	49
4.6.5	Analyse du RdPS par TimeNet	49
4.7	Utilité des réseaux de capteurs sans fil	50
4.7.1	Analyse du réseau	51
4.8	Comparaison des résultats	51
	Conclusion Générale	53
	Bibliographie	55

Liste des tableaux

Table des figures

1.1	Structure du complexe CEVITAL.	3
1.2	Organigramme des services de conditionnement d'huile	5
1.3	Les différentes lignes de production d'huile.	6
1.4	Schéma d'évaluation de performances d'un système	15
2.1	Architecture d'un capteur	19
2.2	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.	20
3.1	Les composants d'un réseau de Petri	25
3.2	Représentation graphique d'un RdP	26
3.3	Représentation d'un arc inhibiteur.	31
4.1	Schéma de la ligne de conditionnement.	39
4.2	Modèle générique d'un stock.	41
4.3	Modèle de la chaîne de production.	42
4.4	L'emplacement des capteurs de pression.	43
4.5	L'emplacement des capteurs de température et de niveau.	44
4.6	Modèle réduit de la chaîne de production.	45
4.7	Résultat.	47
4.8	Modèle de la chaîne de production avec une maintenance.	48
4.9	Modèle d'un cycle de maintenance.	49

Introduction Générale

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

La première décision à prendre avant de 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, des facteurs de performances, de la charge et le choix des méthodes à utiliser. Cet ensemble de choix de base représente les entrées du processus d'évaluation de performances d'un système.

Les réseaux de Petri ont été développés en 1962 par Carl Adam Petri dans sa thèse "Kommunikation mit automaten" à Darmstadt (Allemagne). Sa technique de modélisation est constituée de places, de transitions et de jetons. Elle consiste à représenter les états par des places et des jetons et les processus de chargement d'états par des transitions. Les réseaux de Petri offrent des propriétés d'analyse qualitative très puissantes et largement exploitées pour vérifier le comportement de différents types de matériels et logiciels informatiques.

La modélisation des systèmes de production à l'aide des réseaux de Petri (RdP) présente de nombreux avantages. Elle fournit une base mathématique à l'étude des modèles. Elle permet d'exprimer de manière simple des propriétés liées au parallélisme, telles que l'absence de blocage, la vivacité,... et débouche sur de nombreux outils de preuve, tels que la construction du graphe des marquages accessibles, les invariants et les réductions.

Cependant, les réseaux de Petri se sont vite avérés un modèle trop limité face aux exigences des concepteurs d'applications informatiques et/ou industrielles. De plus, si l'on étudie des systèmes conformes à la réalité, la taille du modèle rend

rapidement son étude impossible. En effet, il n'est pas rare que le nombre d'états du système étudié soit de plusieurs centaines d'états. En outre, la preuve des propriétés qualitatives du réseau n'est généralement pas suffisante pour assurer son bon fonctionnement. C'est pourquoi, des outils de modélisation, tels que les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) ont été développés. En effet, en introduisant une temporisation dans les RdP, le but est de concevoir un modèle unique permettant à la fois une validation qualitative et quantitative de réseaux.

L'unité de production d'huile 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 l'huile 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.

Vu l'importance que le conditionnement prend actuellement, un système de supervision s'avère nécessaire. Le but est d'installer une supervision extensible (salle de contrôle) afin de visualiser les informations des différents processus de plusieurs endroits du conditionnement d'huile.

Les informations seront centralisées au niveau du bureau du chef de quart. A temps réel, le chef de quart aura les informations visuelles des états de la machine.

Notre travail a pour principal objectif de contribuer à l'évaluation des performances d'une chaîne de production de la direction de conditionnement d'huile 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 capteurs sans fil.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons le complexe Cevital dont la chaîne de conditionnement d'huile est sujet d'étude dans ce mémoire. Après un aperçu général sur le complexe, nous présentons quelques généralités sur les systèmes de production ainsi que sur l'évaluation de performances.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, en commençant par définir un capteur et son architecture ensuite, un réseau de capteurs sans fil et quelques propriétés, et nous terminons par citer quelques domaines d'application.

Le troisième chapitre est consacré au formalisme des réseaux de Petri. Dans un premier temps, nous donnons des définitions et notations de base. Nous introduisons les propriétés de ce formalisme. Finalement, nous abordons quelques extensions des réseaux de Petri en détaillant un peu sur les réseaux de Petri stochastiques généralisés qui sont utilisés pour l'évaluation de performances du système de production.

Dans le quatrième chapitre, nous abordons la modélisation et l'évaluation de performances de la chaîne de conditionnement d'huile. Nous présentons en premier lieu la modélisation de notre chaîne. Par la suite, la réduction de système s'avère nécessaire pour mieux gérer la problématique. 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 RdPSG résultants afin de déterminer le temps moyen de séjour d'une bouteille dans la chaîne de production, ainsi que le temps moyen d'une détection d'une panne et de les comparer avec ceux de l'entreprise.

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

CHAPITRE 1

L'Entreprise Cevital et l'Evaluation des Performances

Introduction

Cevital est un complexe d'industrie agroalimentaire spécialisé dans le raffinage des huiles, qui a pour mission principale de développer la production et assurer la qualité du conditionnement.

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

La première partie de ce chapitre, nous donne une petite présentation de l'entreprise Cevital, ses activités et ses missions, ainsi que son organisation. La deuxième partie, nous donne des généralités sur les systèmes de production. La troisième partie, traite les différentes méthodes d'évaluation de performances et l'évaluation de performances des systèmes de production.

1.1 Présentation et historique de l'entreprise

Cevital fait partie des entreprises agroalimentaires algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays en économie de marché. Elle a été créée par des fonds privés en 1998 d'un capital de 970.000.000.00 DA. Son complexe de production se situe dans le port de Bejaia et s'étend sur une superficie de $45000m^2$.

Cevital contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale. Elle vise à satisfaire le marché national et exporter le surplus, en offrant une

large gamme de produits de qualité. En effet les besoins du marché national sont de 1200 T/J d'huile, l'équivalent de 12 litres par personne et par an. Les capacités actuelles de CEVITAL sont de 1800 T/j, soit un excédent commercial de 600T/J.

Les nouvelles données économiques nationales dans le marché de l'agroalimentaire, font que les meilleurs sont ceux qui maîtrisent d'une façon efficace et optimale les coûts, les charges et ceux qui offrent le meilleur rapport qualité prix. Ceci est nécessaire pour s'imposer sur le marché, que CEVITAL négocie avec les grandes sociétés commerciales internationales. Actuellement ses produits se vendent dans des différentes villes africaines (Lagos, Niamey, Bamako, Tunis, Tripoli...) [1].

1.2 Activités et missions de Cevital

Le complexe Cevital a débuté son activité par le conditionnement le 12 décembre 1998.

Le 17 février 1999, les travaux de génie civil de la raffinerie ont été entamés. Elle est devenue fonctionnelle le 14 août 1999.

Les principales activités du complexe Cevital concernent la production et la commercialisation des huiles végétales, de margarine et de sucre et se présentent comme suit :

- Raffinage des huiles avec une capacité de production de 1800 tonnes/jour ;
- Conditionnement des huiles ;
- Production de margarines avec une capacité de 600 tonnes/jour ;
- Fabrication d'emballages Poly-Ethylène-Téréphtalique (PET) ;
- Raffinage du sucre avec une capacité de production de 1600 tonnes/jour ;
- Sucre liquide.

Ces activités sont organisées sous forme de structures (unités) indépendantes, permettant une gestion souple et décentralisée.

L'entreprise se dévoue au développement de la production tout en assurant la qualité et le bon conditionnement des huiles, des margarines et du sucre à des prix nettement plus compétitifs et cela dans le but de satisfaire le client et le fidéliser.

Les objectifs visés par Cevital sont :

1. L'extension de la distribution de ses produits sur tout le territoire national ;
 2. L'importation de graines oléagineuses pour l'extraction directe des huiles brutes ;
 3. L'encouragement des agriculteurs par des aides financières pour la production locale de graines oléagineuses ;
 4. La modernisation de ses équipements industriels et de ses modes de gestion pour améliorer sa productivité ;
 5. Le positionnement de ses produits sur le marché étranger par leurs exportations.
-

1.3 Organisation de l'entreprise

Pour présenter le complexe agroalimentaire CEVITAL d'une manière générale, la figure suivante nous montre la structure hiérarchique du complexe ainsi que les différentes directions et services [1] :

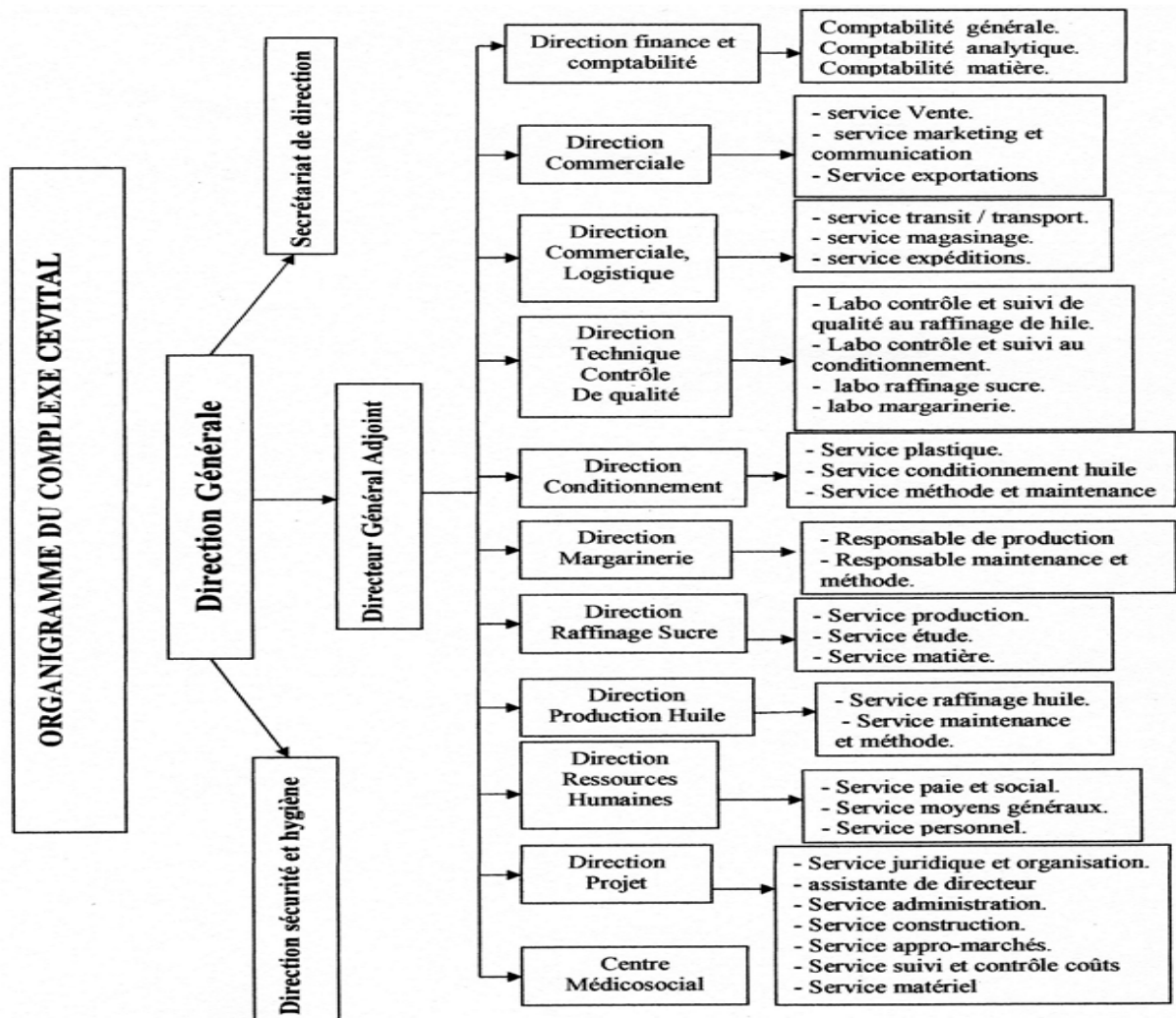


FIGURE 1.1 – Structure du complexe CEVITAL.

1.4 Les différentes unités de production du pôle corps gras

Afin de cibler ses objectifs, Cevital a subdivisé sa production en trois unités principales [2] :

1.4.1 L'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 (C) de capacité 1000 tonnes/jour ;
- La ligne (A) et la ligne (B) de capacités de 400 tonnes/jour chacune.

Les différentes huiles brutes raffinées par Cevital sont classées en :

- huiles fluides ;
- huiles saturées (concrètes).

1.4.2 L'unité de conditionnement

Cette unité permet de mettre en bouteilles les huiles raffinées qui seront ensuite stockées pour la livraison. Elle comporte cinq lignes :

- Une ligne de 5 litres et 4 litres boxées d'une capacité de 3000 bouteilles/heure ;
- Une ligne de 2 litres (1200b/h) ;
- Deux lignes de 1 litre (1200b/h chacune) dont l'une conditionne aussi les bouteilles de 0.75litres ;
- Une ligne de 5 litres ronde d'une capacité de 9000 bouteilles/heure.

1.5 Présentation du conditionnement de l'huile

1.5.1 Services de conditionnement d'huile

La direction de conditionnement d'huile est constituée de plusieurs services qui sont représentés dans l'organigramme suivant [1] :

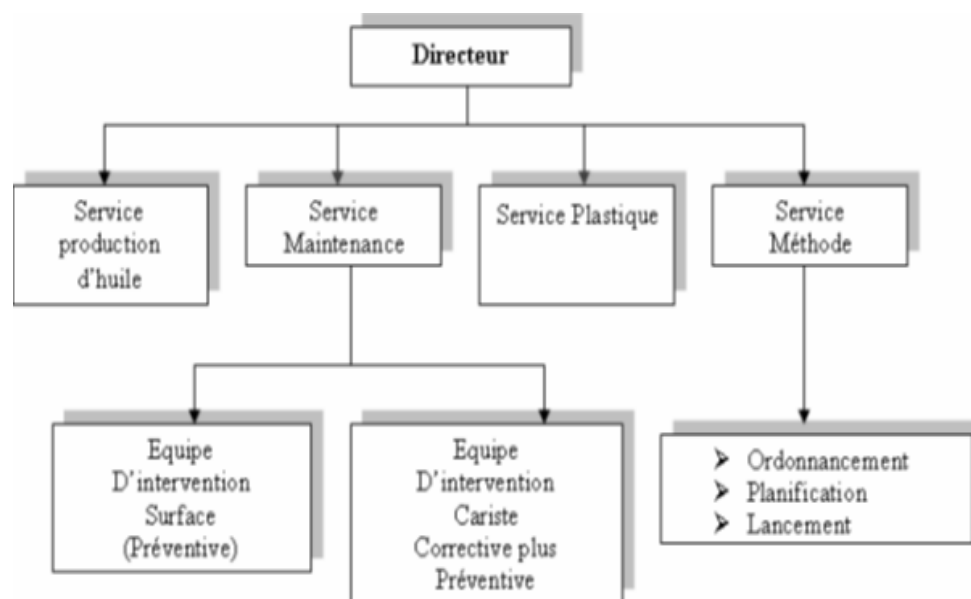


FIGURE 1.2 – Organigramme des services de conditionnement d'huile

1.6 Etude de l'existant

Une bonne compréhension de l'environnement de la production aide à mieux évaluer ses performances. Il est essentiel de disposer d'informations précises sur le fonctionnement de la chaîne de production. En effet, ces informations affectent une grande partie de la réalisation de notre objectif.

1.6.1 Les utilités

Les compresseurs

Les compresseurs sont destinés à produire de l'air comprimé, qui est utilisé dans l'alimentation pneumatique. L'unité de conditionnement d'huile comporte deux types de compresseurs. Des compresseurs de 40 bar utilisés pour le soufflage des préformes. Des compresseurs de 7 bar, pour la production d'air comprimé sous pression, utilisés pour la commande pneumatique (vérins).

Les refroidisseurs

Les refroidisseurs sont installés avec les compresseurs pour le refroidissement des canalisations. Ils sont utilisés dans les souffleuses, pour refroidir le col et le fond de la bouteille.

Table générale de basse tension (TGBT)

La table TGBT est utilisée pour distribuer de l'énergie électrique pour l'alimentation des différentes machines. Elle est divisée en plusieurs tableaux.

1.6.2 Présentation des différentes lignes de conditionnement d'huile

L'unité de conditionnement d'huile est constituée de plusieurs lignes illustrées sur la présentation suivante [1] :

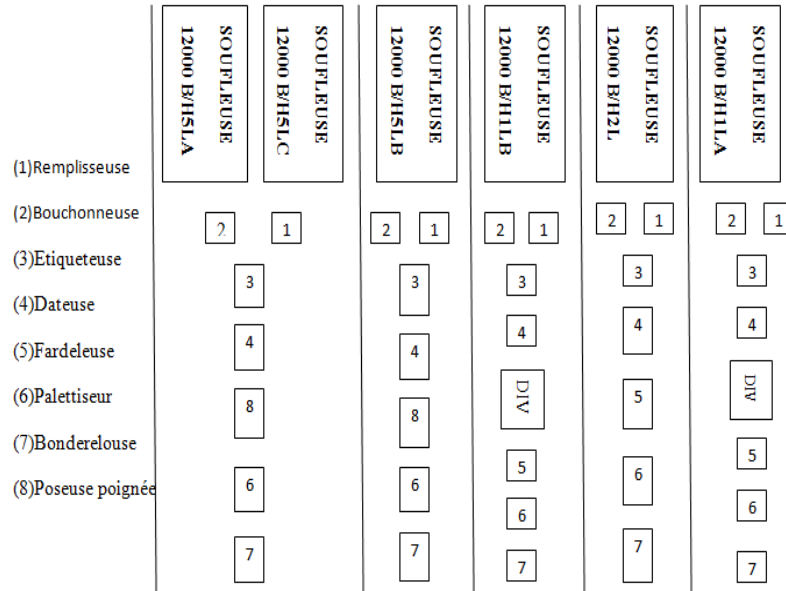


FIGURE 1.3 – Les différentes lignes de production d'huile.

1.6.3 Etude d'une ligne de conditionnement d'huile 5LA

L'étude de la chaîne de conditionnement de l'huile (bouteilles de 5L) du complexe CEVITAL consiste à faire une analyse fonctionnelle dont le but est de comprendre son fonctionnement.

Les instruments et les machines principales qui composent la chaîne sont les suivants :

- ✓ Deux souffleuses ;
- ✓ La remplisseuse ;
- ✓ La poseuse poignée ;
- ✓ L'étiqueteuse ;
- ✓ Le dateur ;
- ✓ Fardeleuse ;
- ✓ Palettiseur ;
- ✓ La banderoleuse.

1.6.4 Présentation des machines

Dans ce paragraphe, on définit le parcours de la bouteille, qui commence par la souffleuse jusqu'à la banderoleuse passant par les différentes machines citées précédemment.

Les souffleuses

La chaîne commence par deux souffleuses (l'une de 6000b/h (SBO6) et l'autre 3000b/h (SBO4)), chacune utilise comme matière première des préformes qui sont sous forme de tubes, fabriqués à côté de l'unité.

La préforme rentre à la souffleuse automatiquement à travers un convoyeur spécial pour arriver à l'intérieur de la machine où elle passe par deux étapes :

- Elle passe à l'intérieur d'un four de 180° pour la chauffer ;
- Elle subit un étirage axial mécanique, suivi d'un étirage radial par soufflage d'air à 40bar (à l'intérieur d'un moule).

La préforme a maintenant la forme d'une bouteille, qui est transportée avec le convoyeur vers la remplisseuse, les bouteilles provenant de la souffleuse 3000b/h et celle de la souffleuse 6000b/h sont organisées par un aiguilleur de partage (il est situé à l'intersection des convoyeurs de SBO6 et de SBO4).

Le partage des bouteilles dans les conditions normales est 5 bouteilles pour SBO4 et le double pour SBO6.

Remplisseuse

La remplisseuse est une machine qui fait remplir les bouteilles de l'huile fini, de cadence 150 b/mn. Elle est suivie d'une bouchonneuse à la même place.

La poseuse poignée

Cette machine place pour chaque bouteille d'huile une poignée.

Etiqueteuse

L'étiqueteuse sert à coller les étiquettes sur les bouteilles, et cette dernière nous informe sur le produit et le constructeur.

Dateur

Le dateur est une machine destinée à inscrire la date sur chaque bouteille avec l'heure de fabrication du produit. Le dateur est précédé d'une cellule qui contrôle la position et la présence de la bouteille.

Fardeleuse

Cette machine met chaque deux bouteilles d'huile dans un fardeau.

Palettiseur

Son rôle est de mettre les fardeaux dans des palette, chaque palette contient 168 bouteille d'huile de 5L.

Banderoleuse

Pour assurer la bonne tenue des bouteilles, la banderoleuse entoure toute la palette d'un film en silicone.

1.7 La Recherche Opérationnelle à Cevital

Dans le cadre des relations la recherche operationnelle - entreprises, de divers problèmes ont été formulés. Dans cette partie, nous présentons quelque cas formulés au niveau du complexe industriel Cevital et traités par les étudiants du département de Recherche Opérationnelle de l'Université de Béjaïa ces dernières années.

Contribution à la modélisation de la chaîne logistique à l'aide du calcul de besoin en composant (MRP) cas de l'Unité de conditionnement d'huile de l'entreprise Cevital de Béjaïa

Comme toute autre entreprise, Cevital est confrontée à une concurrence accrue, les enjeux stratégiques et financiers sont tels que la planification et la gestion de

production sont devenus une nécessité et un outil de survie. L'idéal pour l'entreprise Cevital est évidemment de produire exactement les produits que ses clients vont acheter.

Pour mieux cerner la gestion de produit de production à l'entreprise Cevital, les données indispensables à la mise en œuvre de cette étude ont été fournies à l'étudiante. Dans un premier temps, elle a effectué une étude prévisionnelle pour le produit Elio II 5L de cette entreprise, et cela afin d'estimer les demandes.

Dans un deuxième temps, elle a appliqué la méthode MRP afin de gérer et de calculer les besoins nets du produit étudié. Ainsi, elle a déterminé pour chaque composant, la date de lancement de l'ordre d'achat ou de l'ordre de fabrication.

Pour mieux gérer et calculer ces besoins en composants, elle a programmé la procédure des calculs des besoins en composants (Algorithme de Javel 2001) sous R. Ensuite, elle a programmé la méthode MRP en adaptant un logiciel dénommé MRP-Cevital qui peut être exécuté sur n'importe quel ordinateur et sans aucune restriction [9].

Contribution à l'implantation de la TPM 'Total Productive Maintenance' au sein de la raffinerie d'huile de Cevital

Dans cette étude [19], les étudiants ont analysé les conditions favorables à la mise en place de la 'Total Productive Maintenance' (TPM) dans une entreprise, il s'agit d'une démarche globale d'amélioration des ressources de production (équipements, humains, organisation). A cet effet, ils ont pris la raffinerie d'huile de Cevital comme unité de pilote.

Dans un premier temps, ils ont fait un diagnostic de l'état actuel de la maintenance au niveau de la raffinerie selon deux axes : l'analyse des performances en calculant les indicateurs de performance et l'analyse de fiabilité en appliquant les tests paramétriques et non paramétriques. Pour ces différentes estimations, les données ont été collectées au sein du service maintenance de la raffinerie. L'analyse de fiabilité leur a permis d'affirmer que les équipements des différentes sections sont en période de jeunesse et l'analyse des performances a révélé que les taux de performance sont en dessous de la valeur admise. Par conséquent, les possibilités d'amélioration sont importantes.

L'amélioration de ces performances peut se faire par l'implantation de la TPM qui s'articule autour de trois axes à savoir : action d'organisation, automaintenance et la maintenance préventive. Ces points ont été traduits en douze étapes de mise en œuvre.

1.8 Problématique

Afin d'améliorer la performance des unités de conditionnement d'huile, l'entreprise Cevital réfléchit à la création d'un poste de contrôle. Il s'agit de munir les principales machines de capteurs afin de détecter en temps réel l'apparition de pannes. Il y a donc mise en place d'un réseau de capteurs sans fil.

1.8.1 Contexte de travail

L'étude de ce thème consiste à :

- ✓ Connaître et comprendre le fonctionnement de la chaîne de production de Cevital;
- ✓ Découvrir la nécessité d'utiliser un réseau de capteurs sans fil au niveau de cette chaîne;
- ✓ Modéliser et évaluer les performances de la chaîne de production actuelle en utilisant les réseaux de Petri;
- ✓ Evaluer les performances de la chaîne de production à base de réseau de capteurs sans fil;
- ✓ Comparer les performances dans le but de montrer l'apport de la solution technique dans les systèmes de production.

1.8.2 Positionnement du sujet

Afin de modéliser et d'évaluer les performances d'un système de production, il est nécessaire de passer en revue tous les aspects intervenants dans ce système. Il s'agit par exemple :

- ✓ du schéma du système de production ;
- ✓ du fonctionnement de chaque machine ;
- ✓ des utilités ;
- ✓ de l'emplacement des capteurs sans fil.

1.9 Généralités sur les systèmes de production

Définition 1.1 *La production est le processus conduisant à la création de produits par l'utilisation et la transformation de ressources. Les opérations sont les activités composant le processus de production.*

1.9.1 Les composants d'un système de production

Les composants d'un système de production se regroupent en deux grandes parties, qui définissent un modèle conceptuel [3] :

- Le système physique ;
- Le système de gestion de production ou conduite de production.

Le système physique

Le système physique transforme les composants et les matières premières en produits finis. Il se compose :

- ✓ d'hommes (opérateurs, agents de maintenance,...);
- ✓ de machines;
- ✓ de produit;
- ✓ de moyen de transport (véhicules guidés automatiquement, convoyeurs, robot, chariots de manutention);
- ✓ de système de stockage.

Le système de gestion

Le système de gestion pilote le système physique pour qu'il atteigne les objectifs fixés.

1.9.2 Types de systèmes de production

Nous allons d'abord classer les ateliers selon un aspect fonctionnel, ensuite nous donnons le lien entre le système de production et son environnement [3].

Types fonctionnels d'ateliers

La classification des ateliers selon un aspect fonctionnel nous donne deux types d'ateliers :

Atelier de fabrication

La fabrication d'un produit est généralement effectuée par le passage sur plusieurs machines successivement. Les ateliers de fabrication peuvent se décomposer en trois grandes classes :

- **Ligne de fabrication** : cette ligne est composée d'une suite de machines où chaque pièce passe successivement sur toutes les machines dans un ordre immuable. Son routage commence par la machine M_1 , et après la machine M_i la pièce passe sur la machine M_{i+1} (des stocks tampons peuvent éventuellement être disposés entre les machines).
 - **Atelier à flot (Flow-Shop)** : dans un atelier à flots, les machines sont ordonnées comme dans une ligne de fabrication, mais chaque pièce ne passe pas nécessairement sur toutes les machines.
Après passage sur la machine M_i une pièce peut aller sur n'importe quelle machine M_j telle que $j > i$. Le routage d'une pièce ne commence pas nécessairement à la machine 1.
 - **Atelier à tâche (Job-Shop)** : Ici les machines n'ont pas l'ordre. Tous les routages sont possibles. Après passage sur la machine M_i , une pièce peut aller sur n'importe quelle machine. Le passage d'une pièce peut commencer et se terminer à n'importe quelles machines.
-

Atelier d'assemblage

Une ligne d'assemblage est une généralisation de ligne de fabrication, c'est à dire où l'ordre de passage sur les machines est défini. Dans une telle ligne, il y a des machines d'assemblages auxquelles sont associées des convergences de routage.

Le système de production et son environnement

Un système de production doit réaliser des pièces pour satisfaire un besoin, qui peut s'exprimer de plusieurs façons. Nous allons considérer trois types de fonctionnement d'un tel système.

- **Production maximale** : on suppose que le stock de pièces brutes en amont du système de production n'est jamais vide, et que le stock où dépose les pièces qui sortent de ce système n'est jamais plein. Lorsqu'une pièce est terminée, elle est déchargée et on charge une pièce brute à la place libérée. On peut observer que la production dépend de la capacité du système.
- **Production pilotée par l'amont** : on suppose qu'il n'y a pas toujours des pièces en amont du système de production. Les pièces à traiter arrivent en s'échelonnant dans le temps (de façon aléatoire ou déterministe). Une pièce qui arrive rentre dans le système s'il y a une pièce libre. La production dépend alors du processus d'arrivée des pièces.
- **Production pilotée par l'aval** : dans ce cas, on produit en fonction des besoin. L'idée qui sous-tend ce pilotage est celle qui consiste à produire juste à temps. On a un stock aval qui est limité. On voit que dans ce cas la production du système sera fonction du processus d'arrivée des commandes.

1.10 Modélisation

L'étude d'un système réel n'est que rarement réalisable dans un environnement opérationnel, encore faut-il que ce système existe. Une façon détournée d'analyser un système consiste à représenter son fonctionnement d'une manière plus ou moins précise ; pour cela, on va s'appuyer sur des outils (descriptifs, mathématiques ou autres) permettant d'approcher le comportement du système. Cette phase de substitution du système par un modèle se nomme *modélisation*, le résultat fournit un symbolisme de représentation et de description des opérations du système.

La modélisation a un objectif bien déterminé qui consiste à fédérer en un seul objet les parties du système que l'on veut analyser. Dans ce contexte, la modélisation est un processus à priori, qui ne conduit que très rarement à un résultat unique. En effet, suivant les buts recherchés, les modèles vont tendre à concentrer les comportements et les paramètres permettant de cerner au mieux le fonctionnement à étudier.

La modélisation est une étape importante car les performances calculées sont celles du modèle et pas du système réel.

1.10.1 Modélisation des systèmes de production

La modélisation d'un système de production est un problème complexe. Nous allons montrer qu'un système de production est généralement analysé comme un système à événement discrets. Précisons tout d'abord cette notion de système à événements discrets.

Selon la terminologie de la théorie des systèmes, un système est composé d'objets et de relation entre ces objets. Un objet est caractérisé par un ou plusieurs attributs. Il sont de deux types [5] [3] :

1. Attributs fixes : qui définissent la nature de l'objet ;
2. Attributs variables : qui évoluent au cours du temps (état d'occupation d'une machine, position d'une pièce dans l'atelier).

De la même façon, les relations sont décrites à l'aide des attributs fixes qui précisent certaines caractéristiques de la relation.

L'état d'un objet à un instant donné est l'ensemble de valeurs de tous les attributs variables de cet objet à cet instant. L'état instantané du système est l'ensemble des états de tous les objets.

Si les changements d'états ont lieu de façon continue, on a un **système continu**, si ces changements d'états ne peuvent avoir lieu qu'à certains instants et de façon discontinue, on a un **système à événements discrets**.

Les systèmes de production font partie des systèmes (dynamiques) à événements discrets (un modèle est à événements discrets lorsque l'espace d'état est à événements discrets c'est-à-dire, les transitions entre états sont associées à l'occurrence). Parmi les modèles utilisés pour l'étude de ces systèmes, il y a :

- Les réseaux de files d'attente → évaluation analytique de performances ;
- Les réseaux de Petri → analyse des propriétés, évaluation de performances, simulation ;
- Les modèles (et programmes) de simulation.

1.11 Évaluation de performances

L'évaluation de performances consiste à calculer des paramètres de performances d'un système. Les paramètres de performances que l'on souhaite obtenir sous forme de grandeurs quantitatives peuvent se présenter sous différents ordres. On peut par exemple citer [18] :

- ▷ Dans les réseaux de communication, le paramètre de performance le plus important est le temps de réponse (délai d'acheminement) qui mesure le temps qui sépare l'émission d'un message de sa réception par le destinataire.

- ▷ Dans les systèmes de production, le paramètre de performance le plus retenu est le débit en produit fini.
- ▷ Dans un domaine plus pratique (celui d'un guichet d'un organisme), on peut distinguer deux paramètres importants. Pour l'utilisateur, celui-ci s'intéresse au temps d'attente, mais pour la direction de l'organisme, c'est le nombre de clients qui importe le plus.

1.11.1 Rôle de l'évaluation de performances

L'évaluation des performances d'un système s'avère indispensable dès l'instant où l'on souhaite obtenir les performances de celui-ci et que l'on ne peut pas effectuer de mesure directe sur le système réel. Elle peut intervenir à deux niveaux :

- a) En conception : cela signifie que le système n'existe pas encore et qu'il s'agit de le créer et de le dimensionner.
- b) En exploitation : à ce niveau, on évalue souvent les performances d'un système dans le but de modifier (extension) ou l'expérimenter au delà de son point de fonctionnement normal.

1.11.2 Concept de l'évaluation de performances

Pour faire de l'évaluation de performances on doit disposer de deux éléments :

1. Un système : c'est l'entité dont on évalue les performances. En gros, un système est considéré comme étant un ensemble de ressources partagées entre différentes tâches. La caractéristique commune pour de tels systèmes est la présence de temps d'attente pour l'accès à ces ressources partagées.
2. Une charge : la charge du système représente généralement le trafic en entrée, qui pourrait être l'ensemble de messages servis par un dispositif du réseau, le nombre de tâches à exécuter par un processeur. Le trafic est généralement décrit par des lois probabilistes (Poisson, Exponentielle, . . .).

1.11.3 Étapes d'évaluation de performances

L'évaluation de performances d'un système se résume en trois étapes :

- **Étape1** : Comprendre le fonctionnement du système.
 - **Étape2** : Élaborer un modèle plus fidèle aux caractéristiques et fonctionnement du système.
 - **Étape3** : Évaluer les performances du système selon le formalisme du modèle.
-

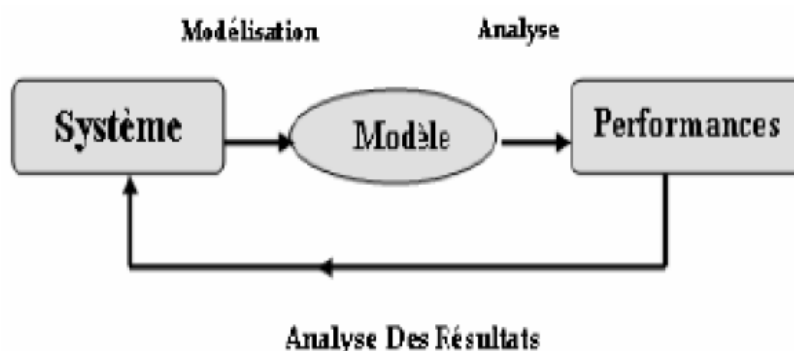


FIGURE 1.4 – Schéma d'évaluation de performances d'un système

Ce schéma se décompose en une étape de modélisation permettant de passer du système au modèle et une étape d'analyse des performances du modèle. Le rebouclage n'a lieu que si les performances obtenues ne sont pas celles espérées. Une fois un modèle construit dans le formalisme choisi, il s'agit de l'analyser. On distingue deux grands types d'analyse, l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

1.11.4 Techniques de l'évaluation de performances

Il existe différentes techniques pour l'évaluation de performances d'un système [18] :

Les techniques de mesure

Il s'agit de faire des mesures et de les analyser directement sur un système réel. Cette technique permet de comprendre le vrai comportement du système ; mais faire des mesures sur des systèmes réels n'est pas toujours possible car ça pourrait gêner le fonctionnement du système ou aussi pour des problèmes de coûts (système non encore existant, instruments de mesure complexes, . . .). Les résultats issus de la mesure ne sont pas génériques et ne reflètent qu'une seule trajectoire du système.

Les méthodes analytiques

Il s'agit de réduire le système en un modèle mathématique et l'analyser numériquement. L'approche analytique est parfois rapide à réaliser, mais présente le souci de la représentation fidèle du système. Il est parfois très complexe voire impossible de modéliser le comportement réel du système mathématiquement. Généralement, on se pose des hypothèses qui simplifient l'étape de modélisation du système et rendent l'évaluation numérique faisable. Ces hypothèses simplificatrices peuvent toucher à la fidélité de la représentation du système, mais permet toute fois de traduire son comportement approché. Il existe de nombreux outils mathématiques permettant de telles évaluations, en l'occurrence :

- *Les chaînes de Markov* : ils facilitent l'analyse des performances des systèmes dynamiques dans de nombreux domaines d'application grâce à un ensemble de théorèmes qui permettent de mettre en oeuvre des calculs matriciels pour l'obtention des indices de performances attendus ;
- *La théorie des files d'attente* : les publications sur la théorie des files d'attente ont adapté un langage de plus en plus mathématiques ce qui a freiné son utilisation toute fois la situation a changé quand les gens ont commencé à appliquer la théorie des files d'attente à l'évaluation des performances . On les rencontre en permanence dans la vie courante, par exemple, dans un guichet, dans un atelier de fabrication, dans une central téléphonique, etc. ;
- *Les réseaux de Petri* : Les chaînes de Markov permettent de faire une analyse quantitative sur un système. Nous allons voir un modèle de plus haut niveau qui est « les réseaux de Petri », ça va nous permettre de faire une analyse qualitative et quantitative.

La simulation

La simulation est une technique largement utilisée dans l'évaluation de performances des systèmes informatiques et réseaux de communication. Il s'agit d'implanter un modèle simplifié du système à l'aide d'un programme de simulation adéquat. Elle présente l'avantage par rapport aux méthodes analytiques de traduire le comportement du système à l'évaluer d'une manière plus réaliste et représente un moyen utile pour prédire les performances d'un système et les comparer sous différentes configurations.

La simulation permet en plus de visualiser les résultats sous formes de graphes faciles à analyser et à interpréter. Elle rend possible l'analyse systématique des systèmes lorsque les solutions analytiques ne sont pas disponibles et l'expérimentation sur le système considéré est impossible ou non pratique.

1.11.5 Obtention des indices de performances

Nous sommes intéressés par calculer l'état stationnaire du modèle. c'est-à-dire, la proportion de temps que la chaîne de markov reste dans chacun de ses états sur une trajectoire de durée infinie. Cette solution est exprimée par un vecteur de probabilité associant une probabilité à chaque état de la chaîne. A partir de ce vecteur, nous pouvons calculer plusieurs informations sur le système modélisé, par exemple le nombre moyen de tâches traitées, les délais moyens, etc.

Cette résolution correspond à l'obtention du vecteur π solution du système :

$$\pi A = 0 \tag{1.1}$$

Avec :

$$\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$$

Où A est une matrice décrivant le processus de Markov appelée générateur infinitésimal.

Parmi les méthodes de résolution nous pouvons faire la distinction entre :

- Les méthodes analytiques ;
- Les méthodes numériques ;
- Les simulation.

Les méthodes analytiques sont les méthodes qui donnent une solution sans passer par la solution numérique du système $\pi A = 0$.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'organisme d'accueil et le contexte général de notre étude. Nous fournissons essentiellement les outils issu de la théorie des processus stochastiques de la modélisation et de l'évaluation de performances des systèmes de production.

CHAPITRE 2

Réseaux de capteurs sans fil

Au cours de ces dernières années, la technologie des réseaux sans fil n'a cessé de croître grâce aux développements technologiques dans divers domaines liés à la micro-électronique. En plus, avec l'émergence des réseaux de capteurs sans fil (RdC ou WSN : Wireless Sensor Networks), de nouvelles thématiques ont été ouvertes et de nouveaux défis ont vu le jour pour répondre aux besoins des personnes et aux exigences de plusieurs domaines d'application (industriel, culturel, environnemental).

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs domaines d'application.

2.1 Capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, niveau, pression, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base [16].

2.2 Architecture d'un capteur

La figure suivante nous montre les différents équipements d'un nœud capteur [16] :

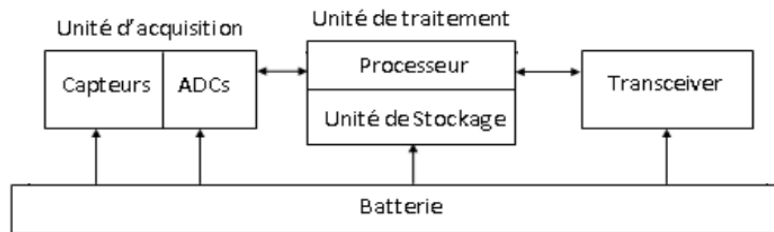


FIGURE 2.1 – Architecture d'un capteur

Tel que :

1. L'unité d'acquisition : est généralement composée de deux sous-unités
 - Les capteurs : ils obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques ;
 - Les convertisseurs analogique-numériques (ADCs) : ils convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.
2. L'unité de traitement : est composée de deux interfaces : une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition, et stocke les données collectées ;
3. Un module de communication (Transceiver) : il est responsable de toutes les communications via un support de communication radio qui relie le nœud au réseau ;
4. Batterie : alimente les unités citées précédemment.

2.3 Réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sont une nouvelle famille de réseaux sans fil qui a pu voir le jour grâce aux avancées conjointes des systèmes microélectroniques et mécaniques (ou Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS), des technologies sans fil, et de la microélectronique embarquée. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines pour surveiller et contrôler des phénomènes physiques [17].

Le réseau de capteurs ne sert qu'à faire remonter les mesures, les applications traitant ces informations étant exécutées sur la machine de l'utilisateur final.

2.4 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Le fonctionnement global de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil consiste donc à ce que les capteurs fassent des mesures qu'ils font remonter au puits via les agrégateurs. L'application finale tournant sur une machine se situant sur un autre réseau a ainsi accès aux valeurs via une passerelle, et la figure suivante nous résume cette architecture [15] :

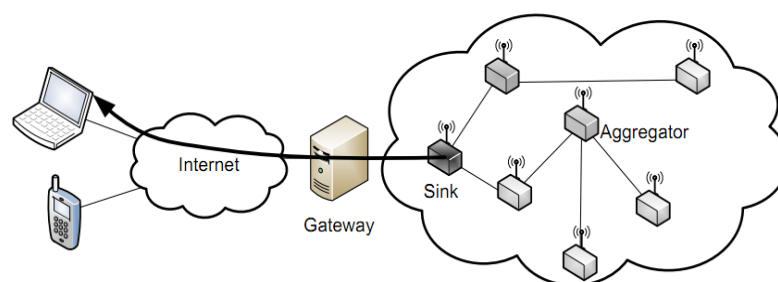


FIGURE 2.2 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.

Où

✘ Le capteur (sensor)

Il est en charge de mesurer une valeur relative à son environnement (température, pression, présence, etc.) ;

✘ L'agrégateur (aggregator)

Il est en charge d'agréger les messages qu'il reçoit de plusieurs capteurs puis de les envoyer en un seul message au puits (sink). Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau et donc de prolonger la durée de vie globale du réseau de capteur ;

✘ Le puits (sink)

Le puits est le noeud final du réseau. C'est à lui qu'est envoyé l'ensemble des valeurs mesurées par le réseau. Il peut arriver qu'il y'ait plusieurs puits sur un même réseau de capteurs ;

✘ La passerelle (gateway)

La passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il permet de relier le réseau de capteurs sans fil à un réseau plus traditionnel, typiquement l'internet.

2.5 Caractéristiques d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs présente les caractéristiques suivantes [17] :

- **Absence d’infrastructure** : les réseaux de capteurs se distinguent des autres réseaux par la propriété d’absence d’infrastructure préexistante et de tout genre d’administration centralisée.
- **Taille importante** : un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds.
- **Interférences** : les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.
- **Topologie dynamique** : les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d’une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.
- **Sécurité physique limitée** : les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- **Bande passante limitée** : une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l’utilisation d’un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée.
- **Contrainte d’énergie, de stockage et de calcul** : la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d’énergie (batterie). Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud. Ainsi, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont limitées dans un capteur.

2.6 Applications des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs peuvent être composés, suivant leur utilisation, de différents types de nœuds capteurs, tels que les capteurs sismiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques et radar, ils sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants, notamment [7] :

- Température ;
 - Humidité ;
 - Mouvement des véhicules ;
 - Pression ;
 - Taux de bruits ;
 - Présence ou absence de certains types d’objets ;
-

Les nœuds capteurs peuvent être utilisés pour la surveillance continue d'un phénomène, la détection et l'identification d'un évènement, ou la surveillance d'un terrain et le contrôle local d'objets déclencheurs d'évènements (actionneurs).

En effet, le nouveau concept de micro-capteurs connectés via un support sans fil promet la réalisation de plusieurs types d'applications. Ces dernières peuvent être subdivisées en plusieurs domaines, entre autres le domaine militaire, environnement, santé, maisons ainsi que d'autres applications commerciales.

- Dans le domaine militaire, un réseau de capteurs peut être rapidement déployé dans un environnement sans infrastructure, notamment pour surveiller les troupes ou encore détecter des agents chimiques sur le terrain ;
 - Dans le domaine environnemental, un réseau de capteurs peut permettre :
 - de détecter des incendies ;
 - de surveiller des catastrophes naturelles (inondations, séismes, éruptions volcaniques) ;
 - de surveiller des phénomènes météorologiques, de détecter de la pollution (qualité des eaux) ;
 - de suivre des écosystèmes (espèces protégées,...) ;
 - d'améliorer l'agriculture (détection de parasites, mesures de l'irrigation).
 - Le domaine médical peut aussi être intéressé par exemple pour :
 - suivre les patients ou le personnel au sein des bâtiments ;
 - surveiller à distance des données physiologiques (rythme cardiaque, taux de glucose) ;
 - le biomédical (rétine artificielle) ;
 - gérer certains produits sensibles (drogues...).
 - On peut également voir des applications domestiques pour :
 - l'économie d'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes ;
 - les relevés automatiques de capteurs (eau, électrique, gaz) ;
 - la localisation d'objets.
 - Enfin des réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour des applications commerciales ou professionnelles pour :
 - le génie civil (surveillances des fondations, des bâtiments, des structures) ;
 - le contrôle des stocks ;
-

- la surveillance de trafic ;
- le contrôle des équipements (éclairage, chauffage, ventilation, climatisation...).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les briques de base et fédéré quelques concepts nécessaires à la compréhension de notre problématique.

CHAPITRE 3

Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri ont été introduits par Carl Adam Petri dans les années 60 puis développés et utilisés dès les années 70. Leur intérêt est de modéliser et de spécifier les systèmes dont l'étude est souvent complexe et nécessitant une modélisation fine. Le principe de base des réseaux de Petri est de représenter par un graphe les relations entre les diverses parties du système [13].

Dans ce chapitre, nous introduisons des définitions de base, des notions et propriétés générales des réseaux de Petri.

3.1 Notion de : Condition-Place et Évènement-Transition

Condition : une condition est la description de l'état d'une ressource du système modélisé :

- Une machine est au repos ;
- Une machine est en réparation ;
- Une commande est en attente.

Évènement : un évènement est une action qui se déroule au sein du système et dont la réalisation dépend de l'état du système :

- Début de traitement sur une machine ;
- Panne d'une machine ;
- Début de traitement d'une commande.

Dans le formalisme des réseaux de Petri, la condition est modélisée par une place, et l'évènement est modélisé par une transition.



FIGURE 3.1 – Les composants d’un réseau de Petri

3.2 Définitions et concepts de base

Un réseau de Petri (RdP) est un outil mathématique et graphique qui permet de décrire les relations existantes entre les conditions et les événements. Il permet de modéliser le comportement des systèmes à événements discrets.

3.2.1 Structure d’un réseau de Petri

D’un point de vue graphique, un RdP est un graphe biparti orienté constitué de places, de transitions et d’arcs qui relient les transitions aux places et les places aux transitions [20].

Définition 3.1

Une structure de RdP non marqué est donnée par un quadruplet $PN = (P, T, Pre, Post)$ où :

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$: est un ensemble fini de places ;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$: est ensemble fini de transitions ;
- $Pre : P \times T$: est l’application d’incidence avant (places précédentes, W^-) ;
- $Post : T \times P$: est l’application d’incidence arrière (places suivantes, W^+).

La relation de flux de RdP représente un ensemble fini d’arcs orientés qui assurent la liaison entre les places et les transitions.

On note :

- t : L’ensemble des places d’entrée (places en amont) de la transition t ;
- t^\bullet : L’ensemble des places de sortie (places en aval) de la transition t ;
- p : L’ensemble des transitions d’entrée (transitions en amont) de la place p ;
- p^\bullet : L’ensemble des transitions de sortie (transitions en aval) de la place p .

3.2.2 Représentation d'un réseau de Petri

Un réseau de Petri peut être représenté de deux manières différentes :

- Représentation graphique ;
- Représentation matricielle.

Représentation graphique

Un réseau de Petri peut être vu comme un graphe biparti où :

- Les places sont représentées par des cercles ;
- Les transitions sont représentées par des rectangles ;
- La fonction de poids W est représentée par des arcs valués :
 - Un arc relie une place p à une transition t ssi $W(p, t)^- \neq 0$;
 - Un arc relie une transition t à une place p ssi $W(p, t)^+ \neq 0$.
- Le marquage M est représenté par des jetons ou par des nombres à l'intérieur des places ;
- Une transition sans places d'entrée est une transition source ;
- Une transition sans places de sortie est une transition puit.

La figure suivante nous montre la représentation graphique d'un RdP :

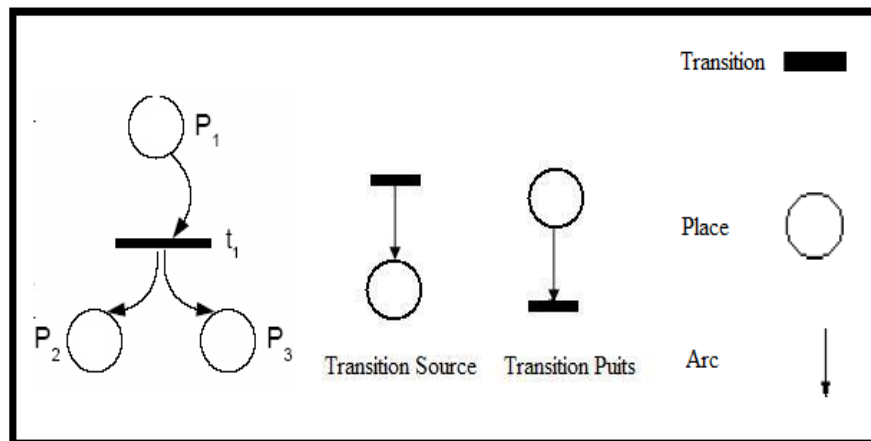


FIGURE 3.2 – Représentation graphique d'un RdP

Représentation matricielle

Si les ensembles P et T sont ordonnés (numérotés), les fonctions W^- et W^+ peuvent être définies comme des matrices dont les lignes sont indiquées par les m numéros de places et les colonnes par n numéros de transitions.

- On appelle matrice de précondition, notée Pre , la matrice de dimension (n, p) à coefficient dans \mathbb{N} , définie par :
 $Pre(i, j) = W^-(p_i, t_j)$: indique le nombre de marquages que doit contenir la place p_i pour que la transition t_j soit franchissable.
- On appelle matrice de postcondition, notée $Post$, la matrice de dimension (n, p) à coefficient dans \mathbb{N} , définie par :
 $Post(i, j) = W^+(p_i, t_j)$: indique le nombre de marquages déposées dans la place p_i à la suite du franchissement de la transition t_j .
- On appelle matrice d'incidence du réseau RdP , notée C , la matrice de dimension (n, p) à coefficients dans \mathbb{N} définit par :
 $C = W^+ - W^-$: donne la modélisation pour la place p_i , résultant du franchissement de t_j .

3.2.3 Dynamique des RdP

Remarque 3.2.1

- Dans un RdP , l'évaluation des arcs est donnée par les fonctions W^- et W^+ qui prennent leurs valeurs dans \mathbb{N} .
- Si dans un réseau de Petri l'évaluation d'un arc est omise, elle est par convention égale à 1.
- Lorsque les fonctions W^- et W^+ prennent leurs valeurs dans la paire $\{0, 1\}$, le réseau est dit ordinaire :

1. $W^-(p, t) = 0$: il n'y a pas d'arc orienté de p vers t .
2. $W^+(p, t) = 0$: il n'y a pas d'arc orienté de t vers p .
3. $W^-(p, t) = 1$: il existe un arc orienté de p vers t .
 p est une place d'entrée de t .
 t est une transition de sortie de p .
4. $W^+(p, t) = 1$: il existe un arc orienté de t vers p .
 p est une place de sortie de t .
 t est une transition d'entrée de p .

Réseau de Petri marqué

Pour définir l'état d'un RdP à un instant donné, il est nécessaire de le compléter par un marquage.

Définition 3.2 (*RdP Marqué*)

Un réseau de Petri marqué est un couple (PN, M_0) , où :

- PN est un réseau de Petri;
- M_0 est le marquage initial d'un RdP définissant ainsi l'état initial du réseau avant tout franchissement, c'est une application

$$M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$$

Définition 3.3 (*Couverture [8]*)

Un marquage M_k couvre un marquage M_l si pour chaque place, le nombre de marques de M_k est supérieur ou égal au nombre de marques de M_l :

$$\forall i, M_k(p_i) \geq M_l(p_i) \text{ et on note } : M_k \geq M_l.$$

La couverture est stricte si de plus :

$$\exists m, M_k(p_m) > M_l(p_m) \text{ et on note } : M_k > M_l.$$

Fonctionnement et circulation des jetons

La dynamique d'un réseau de Petri marqué est définie par la règle de franchissement des transitions, elle précise comment les transitions permettent de modifier les marquages dans les places [11].

• Le franchissement d'une transition**Définition 3.4**

Une transition t est dite franchissable pour un marquage M ssi : $\forall p \in P, M(p) \geq W^-(p)$. Le marquage M' alors obtenu est défini par :

$$\forall p \in P, M'(p) = M(p) - W^-(p, t) + W^+(p, t) = M(p) - W(p, t). \quad (3.1)$$

• Règles de franchissement d'une transition**Définition 3.5**

Le franchissement d'une transition t à partir d'un marquage M conduit au nouveau marquage M' . On note $M[t > M']$, tel que :

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1 & \text{si } p \in t^\bullet \text{ et } p \notin \bullet t; \\ M(p) - 1 & \text{si } p \notin t^\bullet \text{ et } p \in \bullet t; \\ M(p), & \text{autrement.} \end{cases}$$

Définition 3.6 (*Séquence de franchissement [12] [14]*)

Soit (PN, M_0) un réseau de Petri marqué, $s = t_1, t_2, \dots, t_n \in T^*$ une séquence de transitions. La séquence s est franchissable depuis M si et seulement si il existe des marquages M_1, M_2, \dots, M_n tels que :

$$M_1(t_1 > M_2(t_2 > \dots M_{n-1}(t_n > M_n. \quad (3.2)$$

Il est à noter que T^* est un sous ensemble de T constitué des transitions qui forment la séquence de franchissement.

Dans ce cas, le tir de s conduit au marquage M_n donc on note $M(s > M_n$.

Définition 3.7 (*Marquage accessible [8]*)

Soit (PN, M_0) un réseau de Petri marqué. Un marquage M est accessible si et seulement si il existe une séquence de franchissement $s \in T^*$ telle que $M_0(s > M$.

Définition 3.8 (*Ensemble d'accessibilité [8]*)

Soit (PN, M_0) un réseau de Petri. L'ensemble des marquages accessibles ou ensemble d'accessibilité d'un réseau est noté $A(PN, M_0)$ où A est l'ensemble des marquages atteints par une séquence de franchissement :

$$A(PN, M) = \{ M \in \mathbb{N}^p \mid \exists s \in T^* \text{ tel que } M_0(s > M. \quad (3.3)$$

Définition 3.9 (*Graphe de marquage accessible [8]*)

On appelle graphe de marquage accessible $GA(PN, M)$ le graphe ayant $A(PN, M)$ pour ensemble de sommets et dont les arcs (M', M'') sont définis par la relation :

$$\exists t \in T : M'(t > M''. \quad (3.4)$$

3.3 Propriétés des réseaux de Petri

3.3.1 Réseau borné

La bornitude d'un RdP exprime le fait que le nombre d'états que peut prendre le système modélisé par ce RdP est fini, autrement dit, le nombre de marquages accessibles est fini. Dans le cas contraire, où le RdP est non borné, le nombre d'états est infini et ceci est dû au fait que certains paramètres de ce système sont non bornés [12].

Définition 3.10

Soit un réseau de Petri $PN = (P, T, Pre, Post)$; une place $p \in P$ est dite k -borné

pour un marquage initial M_0 si et seulement si :

$$\exists k \in \mathbb{N}, \forall M \in A(PN, M_0), M(p) \leq k \quad (3.5)$$

Où $A(PN, M_0)$ est l'ensemble des marquages accessibles.

Si $k=1$, on dit que la place p est sauf.

Définition 3.11

Un réseau marqué (PN, M_0) est borné, si le nombre de marquages accessibles est fini.

3.3.2 Réseau sans blocage

Un RdP est dit bloqué si à une certaine étape son franchissement s'arrête et aucune transition n'est franchissable.

Définition 3.12

Un marquage M' d'un réseau (PN, M_0) est appelé marquage puits (mort) si aucune transition n'est franchissable à partir de M' . Un réseau (PN, M_0) est dit sans blocage si tout marquage accessible depuis M_0 n'est pas un marquage puits. Un réseau RdP est dit sans blocage s'il existe un marquage initial M_0 tel que (PN, M_0) soit sans blocage.

3.3.3 Vivacité

On dit qu'une transition T_j est vivante pour un marquage initial M_0 si pour tout marquage accessible de M_0 , il existe une séquence de franchissement T^* qui contienne la transition T_j , à partir de M_i .

Un RdP est dit vivant pour un marquage initial M_0 si toutes ses transitions sont vivantes.

Définition 3.13

Un réseau de Petri (PN, M_0) est vivant si :

$$\forall M \in A(PN, M_0), \forall t \in T, M' \in A(PN, M_0) \text{ telque } M'(t) > 0. \quad (3.6)$$

Autrement dit,

$$\forall M \in A(PN, M_0), \forall t \in T, \exists s \in T^* \text{ telque } M(st) > 0. \quad (3.7)$$

3.4 Classes des réseaux de Petri

Divers extensions ont été portées aux RdP classiques, ce qui a donné naissance à plusieurs formalismes de RdP. Ces formalismes introduisent entre autres l'aspect temporel, l'aspect stochastiques, etc. Ce qui a enrichi les structures des RdP [4]

3.4.1 Réseaux de Petri généralisés

Un RdP généralisé est un RdP dans lequel les poids associés aux arcs sont des nombres entiers strictement positifs. Ces poids peuvent être différents de 0 ou 1. Tous les arcs, dont le poids n'est pas explicitement spécifié, ont un poids de 1.

Soit un arc reliant une place p_i à une transition t_j ayant un poids égal à p , alors la transition t_j ne sera validée que si la place p_i contient au moins p jetons. Lors du franchissement de cette transition, p jetons seront retirés de la place p_i .

3.4.2 Réseaux de Petri à arcs inhibiteurs

Un arc inhibiteur est un arc orienté qui part d'une place pour aboutir à une transition (et non l'inverse). Son extrémité est marquée par un petit cercle [21].

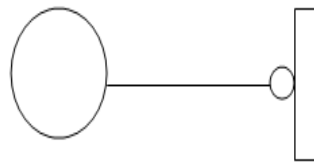


FIGURE 3.3 – Représentation d'un arc inhibiteur.

La présence d'un arc inhibiteur entre une place p_i et une transition t_j signifie que la transition t_j n'est franchie que si la place p_i ne contient aucun jeton.

Définition 3.14

Un réseau de Petri à arcs inhibiteur est défini par un 5-uplet $PN = (P, T, Pre, Post, Inh)$ où :

- P est un ensemble fini de places et T est un ensemble fini de transitions ;
- Pre et $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ sont des fonctions d'incidence avant et d'incidence arrière respectivement ;
- $Inh : P \times T \rightarrow \mathbb{N} \setminus \{0\}$ est une fonction d'inhibition.

3.4.3 Réseaux de Petri colorés

Lorsque le nombre d'entités du système à modéliser est important, la taille du réseau de Petri devient rapidement énorme et si les entités présentent des comportements similaires, l'usage des réseaux de Petri colorés (RdPC) permet de condenser le modèle.

Les RdPC sont des réseaux de Petri dans lesquels 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. Ainsi, les arcs ne sont pas seulement étiquetés par le nombre de jetons mais aussi par leurs couleurs.

Le franchissement d'une transition est alors conditionné par la présence dans les places en entrée du nombre de jetons nécessaires, qui en plus satisfont les couleurs qui étiquettent les arcs. Après le franchissement d'une transition, les jetons qui étiquettent les arcs d'entrée sont retirés des places en entrée tandis que ceux qui étiquettent les arcs de sortie sont ajoutés aux places en sortie de cette transition.

Les réseaux colorés n'apportent pas de puissance de description supplémentaire par rapport aux réseaux de Petri classiques, ils permettent juste une condensation de l'information.

A tout réseau de Petri coloré marqué correspond un réseau de Petri qui lui est isomorphe.

Définition 3.15

Un réseau de Petri coloré est un cinq-uplet $PN = (P, T, C, C_{tran}, C_p)$ tel que :

- P : est l'ensemble de places ;
- T : est l'ensemble de transitions ;
- C : est l'ensemble de couleurs ;
- $C_p : P \longrightarrow P(C)$ est une fonction qui associe à chaque place un ensemble de couleurs ;
- $C_{tran} : P \cup T \longrightarrow P(C)$ est la fonction qui associe à chaque transition un ensemble de couleurs (fonctions sur les arcs) ;

3.4.4 Réseaux de Petri temporisés

Les réseaux de Petri temporisés introduisent la notion de temps dans le parcours du réseau qui permettent de décrire un système à événements discrets dont le fonctionnement dépend du temps [11].

La temporisation représente la durée minimale de franchissement ou le temps de séjour minimum d'un jeton dans une place. Il existe deux sortes de RdP temporisés : RdP T-temporisés et des RdP P-temporisés.

Réseau de Petri T-temporisé

Les réseaux de Petri T-temporisés fonctionnent de la manière suivante : lorsqu'un jeton franchit une transition, celui-ci est réservé pendant un certain temps. C'est seulement après ce temps d'attente que le jeton franchira effectivement la transition.

Réseau de Petri P-temporisé

Ce modèle a été élaboré par Sifakis [22] tel que, une temporisation (valeur rationnelle positive) est associée à chaque place qui représente la durée de séjour minimale d'une marque dans cette place. On notera par d_i la temporisation de la place p_i .

Le RdP P-temporisé est défini par le couple $((PN, M_0), d)$ tel que :

- (PN, M_0) : Réseau marqué.
- $d : P \rightarrow Q^+$ est la fonction de temporisation ($d_i =$ temps que passent les marques dans la place p_i).

L'état de disponibilité d'un jeton permet de spécifier la durée nécessaire pour effectuer une opération sur un produit donné.

3.4.5 Réseaux de Petri temporels

Ces modèles ont été introduits par [10] pour la modélisation et l'analyse des systèmes de communication. Une transition dans ce RdP peut être franchie seulement lorsqu'une durée de temps comprise dans l'intervalle du temps associé à la transition ou bien à la place s'est écoulée depuis l'instant de sa validation. La transition t_i doit rester sensibilisée durant au moins $d_{i_{min}}$ unités de temps et au plus $d_{i_{max}}$ unités de temps avant d'être franchie. Par contre les jetons peuvent à tout moment être consommés par une autre transition.

3.5 Réseaux de Petri stochastiques

Les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) ont été définis par Florin dès 1978 pour répondre à des problèmes informatiques liés à la sûreté de fonctionnement [13] [23].

Bien entendu, ce concept a largement été développé dès le début des années 80 (Molloy, 1982, Florin et Natkin, 1985) pour répondre aux exigences de la modélisation de plus en plus complexes comme par exemple la modélisation des systèmes de production.

Dans un RdP temporisé, une durée fixe est associée à chaque place ou transition du réseau. On obtient des modèles qui sont bien adaptés pour étudier des systèmes où les durées opératoires sont fixes. Cependant, il existe des phénomènes qui ne peuvent pas être bien modélisés avec des durées opératoires constantes.

Dans ces cas, chaque durée est modélisée par une variable aléatoire. Nous obtenons alors un RdPS, dans lequel un temps aléatoire est associé au franchissement d'une transition. Différentes mesures de performances peuvent être effectuées en utilisant les RdPS telle que :

- la fréquence moyenne de franchissement d'une transition ;

- le temps moyen de séjour d'une marque dans une place.

3.5.1 Réseaux de Petri stochastiques

On peut supposer que la durée de sensibilisation est une variable aléatoire θ avec une distribution de probabilité exponentielle :

$$F_\theta(t) = P[\theta < t] = 1 - e^{-\mu t}$$

Cette distribution exponentielle permet d'exploiter les propriétés mathématiques d'un processus de Markov. La fonction $F_\theta(t)$ décrit la probabilité pour que le franchissement ait lieu avant t , c'est à dire pour que la durée de sensibilisation soit inférieure à t . On en déduit que la valeur moyenne de la durée de sensibilisation est :

$$\bar{\theta} = \int_0^\infty (1 - F_\theta(t)) dt = \int_0^\infty e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu}; \quad (3.8)$$

μ est appelé taux de transition.

Définition 3.16 *Un réseau de Petri stochastique est un cinq-uplets :*

$PN = (P, T, E, \mu, M_0)$

- P : ensemble fini de places $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$;
- T : ensemble fini de transitions $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, à chaque transition t_i est associé un taux de franchissement μ_i
- E : ensemble des arcs ;
- μ : ensemble des taux de franchissement $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$;
- M_0 : vecteur de marquage initial.

Règle de franchissement

Le franchissement d'une transition d'un RdPS s'effectue lorsque toutes les places en amont de cette transition contiennent au moins une marque, la transition est validée peut être franchie. Les marques sont alors enlevées à des places en amont et sont déposées dans les places en aval de la transition.

Temps de franchissement

Un temps est associé à chaque transition. Ce temps indique la durée pendant laquelle la marque doit attendre avant de franchir la transition. Pour être plus exact, il s'agit de la durée entre le moment où la transition est sensibilisée et le moment où la transition est franchie. Ce temps est une variable aléatoire qui suit une distribution exponentielle.

Le paramètre de la fonction densité de probabilité associée à la transition t_i est le taux de franchissement noté μ_i . C'est à dire que la transition temporisée est franchie avec un temps aléatoire de moyenne d_i avec $d_i = \frac{1}{\mu_i}$.

3.5.2 Types de réseaux de Petri stochastiques

De nombreuses classes de RdPS sont proposées pour l'analyse des performances des systèmes de production. Les caractéristiques des différentes classes de RdPS se situent essentiellement dans la nature des transitions utilisées. Initialement un RdPS a toutes ses transitions temporisées avec un temps aléatoire qui distribué avec une loi exponentielle, mais nous retrouvons d'autres types de transitions [6] :

Les réseaux de Petri stochastiques étendus

Le réseau se compose uniquement de transitions temporisées aléatoires. Le temps est distribué avec une loi quelconque. Le processus stochastique sous-jacent au graphe des marquages est avec quelques restrictions un processus semi-markovien.

Les réseaux de Petri stochastiques et déterministes

Cette classe de réseau contient des transitions immédiates, des transitions à temporisations déterministes et des transitions à temporisations stochastiques distribuées avec une loi exponentielle.

Les réseaux de Petri stochastiques régénérateurs markoviens

C'est une généralisation des réseaux de Petri stochastiques et déterministes. Le réseau comporte des transitions immédiates, des transitions à temporisations déterministes et des transitions à temporisations stochastiques distribuées avec une loi quelconque. Le processus sous-jacent est un processus de Markov régénérateur.

Les réseaux de Petri stochastiques généralisés

Le réseau se compose de transition avec une temporisation nulle (transition immédiate) et de transitions avec une temporisation aléatoire distribuées exponentiellement. Le processus stochastique sous-jacent au graphe des marquages est un processus de Markov à temps continu.

3.5.3 Graphe des marquages

A partir du réseau de Petri stochastique, on obtient un arbre d'admissibilité qui nous permet de visionner tous les marquages possibles à partir du marquage initial M_0 , et par franchissement successif des transitions sensibilisés du réseau de Petri stochastique, nous construisons le graphe des marquages accessibles. Chaque nœud du graphe représente un marquage et chaque arc reliant les marquages représente le franchissement d'une transition. Les arcs reliant un marquage i vers un marquage j sont affectés d'un taux de transition noté μ_{ij} , qui dépend du taux de franchissement associé à la transition provoquant le changement de marquage et du nombre minimum de marques des places en amont de la transition.

3.5.4 La chaîne de Markov associé à un RdPSG

Une chaîne de Markov (CTMC) peut être conduite à partir de l'arbre d'admissibilité où les états de la chaîne de Markov sont les marquages tangibles de l'arbre. Les marquages événementiels sont fusionnés avec leurs successeurs (marquages tangibles). Les taux de transition de la CTMC sont les taux de tir du RdPSG. Le générateur infinitésimal A de la CTMC est alors une matrice carrée de dimension $(r \times r)$ (r : est le nombre fini de marquages tangibles d'un RdPSG) qui regroupe l'ensemble des taux de transition d'un marquage vers un autre.

3.5.5 Les probabilités d'état

Pour calculer les divers indices de performances du RdPS, il faut nécessairement calculer les probabilités d'état en régime permanent, c'est à dire les probabilités de se situer dans un marquage bien précis. Pour effectuer ce calcul, le réseau de Petri stochastique généralisé doit être borné, ainsi le graphe des marquages possède un espace d'états fini.

3.5.6 Evaluation des indices de performances

Une fois le modèle obtenu, nous pouvons vérifier ses propriétés qualitatives, puis déduire son ergodicité pour faire l'analyse quantitative. Si le modèle est ergodique, alors la distribution de probabilité des marquages à l'état stationnaire existe et elle est unique.

Nous notons par $\pi_i = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_n)$ cette distribution des probabilités où π_i est la probabilité que le processus est à l'état M_i .

Ayant π , plusieurs indices de performances peuvent être calculés. Parmi ces indices les plus importants, on a [13] :

- **Le taux moyen de franchissement d'une transition $\bar{\lambda}(t_i)$:**

On appelle le taux moyen de franchissement d'une transition t_i , le nombre moyen de tirs de t_i en unité de temps.

$$\bar{\lambda}(t_i) = \sum_{M_j \in E(t_i)} \lambda_i(M_j) \pi_j; \quad (3.9)$$

Où :

- $E(t_i)$ est l'ensemble des marquages où la transition t_i est franchissable ;
- $\lambda_i(M_j)$ est le taux de franchissement associé à la transition t_i dans le marquage M_j .

- **Le nombre moyen de marques dans une place :**

Le nombre moyen de marques dans une place p est calculé en appliquant la formule :

$$n(p) = \sum_{i: M_i \in E} M_i(p) \pi_i; \quad (3.10)$$

Où :

- $M_i(p)$ est le nombre de jetons dans la place p pour le marquage M_i ;
- E est l'ensemble des marquages accessibles.

• **Le temps moyen de séjour d'une marque dans un sous-réseau :**

Le délai moyen qu'un jeton passe dans une partie S (sous-réseau) d'un RdPSG à l'état stationnaire, peut être calculé en utilisant la formule de Little.

$$E[T] = \frac{E[N]}{E[\beta]}. \quad (3.11)$$

tel que :

- $E[N]$: est le nombre moyen de jetons dans S ;
- $E[\beta]$: est le taux d'arrivée effectif des jetons dans S .

Conclusion

Les RdP est l'un des outils de modélisation les plus puissants et les plus performant des systèmes dynamiques réels. Actuellement, une immense démarche de recherche et de développement est en cours dans les différents instituts et laboratoires de recherches. Parmi les extensions des réseaux de Petri qui sont utilisées pour l'évaluation des performances, on cite les réseaux de Petri stochastiques dont le principe de l'évaluation quantitative repose sur l'analyse markovienne.

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les RdP, ces définitions et leurs différentes règles d'évolutions.

CHAPITRE 4

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

Pour décrire les phénomènes aléatoires qui surviennent dans la chaîne de conditionnement, nous optons pour l'extension des réseaux de Petri stochastiques généralisés, où les états du système sont représentés par des places et les processus de chargement d'états sont représentés par des transitions immédiates et des transitions temporisés auxquels on associe des temps de franchissement que l'on suppose distribués selon une loi exponentielle.

Dans ce chapitre, nous allons évaluer les performances de la chaîne de conditionnement afin de montrer l'intérêt de l'utilisation des capteurs au niveau de cette dernière. Nous commençons par une modélisation de toute la chaîne. Ensuite, nous allons réduire le modèle juste aux machines dont le service de conditionnement d'huile de Cevital a besoin d'introduire des capteurs pour vérifier l'états de ces dernières. Enfin, nous allons modéliser la situation d'une maintenance dans le but de signaler l'importance d'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil.

4.1 Description du système de conditionnement

La ligne de conditionnement de l'huile est une suite de modules de conditionnement. Chaque module est composé d'une station de travail (machine) et d'un stock d'entrée (stock intermédiaire).

La ligne de conditionnement est schématisée comme suit :

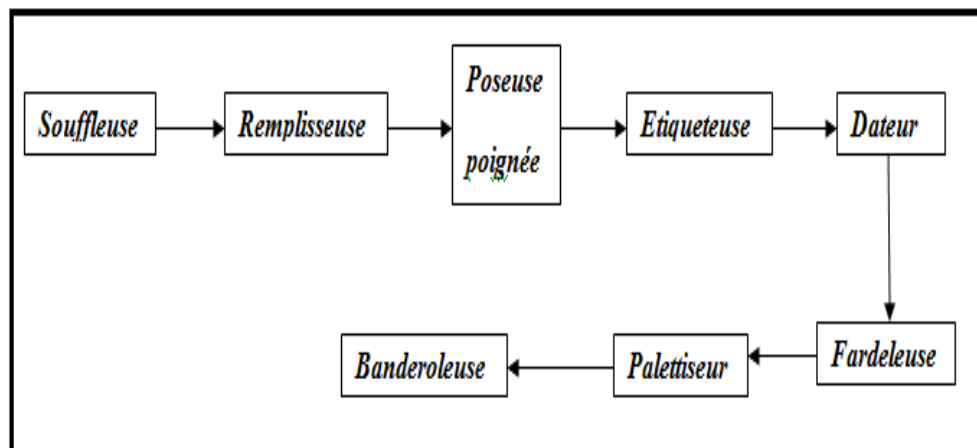


FIGURE 4.1 – Schéma de la ligne de conditionnement.

4.2 Modélisation de la chaîne de production

4.2.1 Objectif de la modélisation

L'objectif de la modélisation de la chaîne de production est de déterminer ses performances. Nous nous intéressons aux performances suivantes :

- Le taux de production ;
- Le temps moyen de séjour d'une bouteille dans la chaîne ;

4.2.2 Choix de l'outil de modélisation

Nous voulons modéliser les différentes actions des phases du processus de conditionnement d'huile. Ces actions sont conditionnées par des aléas du fonctionnement des machines, de l'opérateur humain et de la demande. Le choix d'un modèle stochastique s'avère nécessaire, nous optons alors pour la modélisation par les réseaux de Petri stochastiques généralisés (RdPSG).

L'intérêt majeur des RdPSG est de pouvoir combiner l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

Avec les RdPSG, on pourra calculer par exemple :

- Le temps de réparation d'une machine ;
- Les taux de production.

4.2.3 Principe de la modélisation

Nous répertorions d'abord les états des stocks intermédiaires et des stations de travail (machines) en relation avec les actions du processus de conditionnement. Ces états correspondent aux places du RdPSG. Ensuite, nous analysons les différents

processus qui permettent de basculer entre ces états. Ces processus sont représentés par des transitions temporisées et des transitions immédiates.

4.2.4 Modèle d'un stock

Notre modèle se base essentiellement sur un modèle de stock avec une succession d'étapes du conditionnement. C'est pour cela que nous modélisons d'abord un stock pour faciliter la modélisation de toute la chaîne.

Explication

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un stock, nous prenons comme exemple, le stock des préformes pour la souffeuse. A partir d'un stock plein, nous extrayons une quantité de préformes qui seront soufflées. Une fois que le stock soit vide, nous allons le recharger.

États du stock d'entrée

1. État de la quantité de la matière dans une cellule qui alimente une machine ;
2. État de la quantité de la matière extraite de la cellule qui alimente une machine ;
3. État plein du stock d'entrée ;
4. État vide du stock.

Les processus du stock d'entrée

1. Le processus de chargement effectué par les moyens de transport du système de production qui fait basculer l'état plein et l'état vide du stock d'entrée ;
2. Le processus de fonctionnement qui fait varier l'état de la quantité de la matière extraite et l'état de la quantité de la matière dans la cellule qui alimente un événement.

Description du modèle

À partir des états et des processus décrits, nous pouvons construire un modèle représentant les différents états d'un stock d'entrée d'un sous-module de production. Ce modèle est constitué de quatre places et de trois transitions. Les places correspondent aux états et les transitions aux processus de chargement d'états.

Les places

- La place P_2 représente l'état 4 ;
 - La place P_0 représente l'état 3 ;
 - La place P_3 représente l'état 2 ;
 - La place P_1 représente l'état 1.
-

Les transitions

- La transition T_0 représente le processus 1 ;
- La transition T_2 représente le processus 2 ;
- La transition T_1 représente la fin du processus 1 ;

La figure suivante nous montre le modèle du stock :

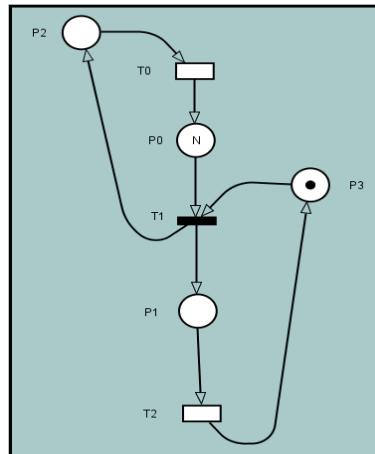


FIGURE 4.2 – Modèle générique d'un stock.

Les poids des arcs

$W^+(p_0, t_0) = W^-(p_2, t_0)$: capacité du stock plein.

$W^+(p_1, t_2)$: quantité de la matière à utiliser.

Le reste des poids sont égaux à 1.

4.2.5 Modèle de la chaîne de production

La chaîne de production comme nous l'avons déjà définie précédemment, contient plusieurs machines, ce qui suit nous montre la modélisation de chaque étape de conditionnement (chaque machine), qui est basé sur le modèle du stock et la succession des machines.

Etats du système de production

1. État de la quantité de la matière dans la cellule qui alimente la machine ;
2. État de la quantité de la matière extraite de la cellule qui alimente la machine ;
3. État plein du stock d'entrée ;
4. État vide du stock d'entrée ;
5. État actif de la machine.

Les processus du système de conditionnement

1. Le processus de chargement qui fait basculer l'état plein et l'état vide du stock d'entrée ;
2. Le processus de fonctionnement de la machine.

Description du modèle

A partir des états et processus décrit, nous pouvons construire un modèle représentant les différents états de conditionnement. Il est constitué de trente-six places et de vingt-deux transitions dont sept sont immédiates. Les places correspondent aux états et les transition aux processus. Le RdPSG de notre chaîne est représenté dans la figure suivante :

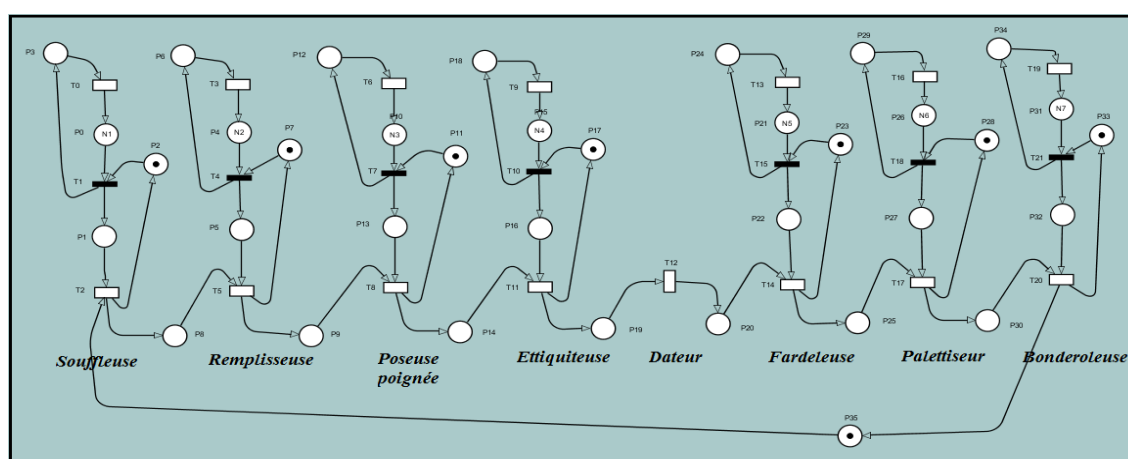


FIGURE 4.3 – Modèle de la chaîne de production.

Les places

- Les places $P_0, P_4, P_{10}, P_{15}, P_{21}, P_{26}, P_{31}$ représentent l'état 3 ;
- Les places $P_3, P_6, P_{12}, P_{18}, P_{24}, P_{29}, P_{34}$ représentent l'état 4 ;
- Les places $P_1, P_5, P_{13}, P_{16}, P_{22}, P_{27}, P_{32}$ représentent l'état 1 ;
- Les places $P_2, P_7, P_{11}, P_{17}, P_{23}, P_{28}, P_{33}$ représentent l'état 2 ;
- Les places $P_8, P_9, P_{14}, P_{19}, P_{20}, P_{25}, P_{30}, P_{35}$ représentent l'état 5 ;

Les transitions

- Les transitions $T_0, T_3, T_6, T_9, T_{13}, T_{16}, T_{19}$ représentent le processus 1 ;
- Les transitions $T_1, T_4, T_7, T_{10}, T_{15}, T_{18}, T_{21}$ représentent la fin du processus 1 ;
- Les transitions $T_2, T_5, T_8, T_{11}, T_{12}, T_{14}, T_{17}, T_{20}$ représentent le processus 2 ;

4.3 Emplacement des capteurs sans fil

Le service conditionnement de l'huile veut installer un poste contrôle commande afin de visualiser et surveiller en temps réel les différents procès dans divers endroits du conditionnement d'huile, et cela en utilisant des réseaux de capteurs sans fil pour différentes mesures (pression, niveau et température). Les endroits sensibles aux risques qui seront surveillés sont :

4.3.1 Conduites 40 bars et 7 bars

Le fonctionnement des équipements dans le conditionnement d'huile exige l'utilisation d'air comprimé 40 bars et 07 bars. Pour cela, deux conduites sont disponibles :

- Une conduite de 40 bars, dont le ballon sis à la salle des compresseurs dans le conditionnement d'huile, alimente les équipements fonctionnant avec 40 bars (souffleuses) ;
- Une conduite de 7 bars sis à la raffinerie d'huile, doit alimenter en air comprimé, les équipements fonctionnant avec 7bars, utilisée en général pour la commande pneumatique (vérins).

En cas de pannes ou d'insuffisance en air dans l'ancienne conduite de 7 bars, la conduite de 40 bars doit la secourir. C'est pour cela que des capteurs sans fil vont être placés au niveau de chaque conduite pour mesurer la pression de l'air.

La figure suivante nous montre l'emplacement de ces capteurs de pression :

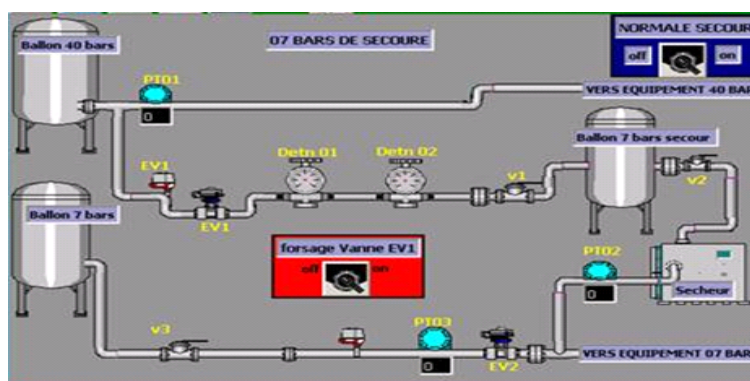


FIGURE 4.4 – L'emplacement des capteurs de pression.

Tel que :

Les PT01, PT02 et PT03 sont des indicateurs transmetteurs de pression :

1. transmetteur de pression réseau 40 bars ;
2. capteur de pression sortie sécheur de la conduite 7 bars ;
3. capteur de pression réseau de la conduite 7 bars.

4.3.2 Les bacs

Il existe trois bacs (A, B et C), un bac est un collecteur de l'huile produit par la raffinerie, qui sera rempli dans des bouteilles. Avant le remplissage, on a besoin de mesurer la température de l'huile et de savoir son niveau dans les bacs, ce qui a causé l'utilisation des capteurs de température et de niveau.

La figure suivante nous montre leurs emplacements :

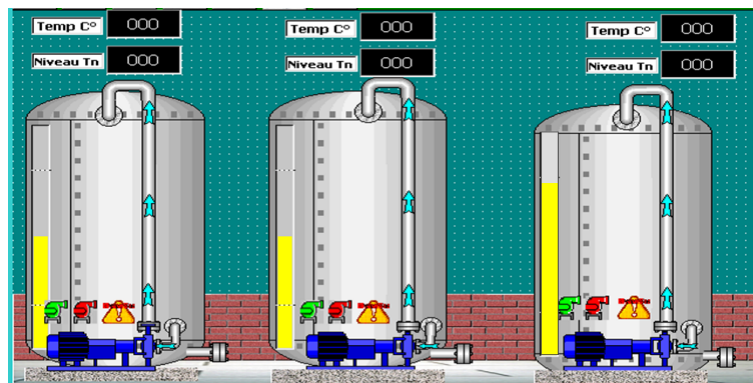


FIGURE 4.5 – L'emplacement des capteurs de température et de niveau.

4.3.3 Cuve à filtre

La cuve à filtre est le matériel responsable de filtrer des huiles venus des bacs avant le remplissage. Un seul transmetteur de pression différentielle pour chaque cuve.

4.4 Modèle réduit

Comme le but d'étudier la chaîne actuelle est de pouvoir montrer l'apport des réseaux de capteurs sans fil sur la production, nous nous sommes intéressés aux machines (la souffleuse et la remplisseuse) où les capteurs sans fil seront installés , c'est ce qui nous a amené à réduire le modèle général comme suit :

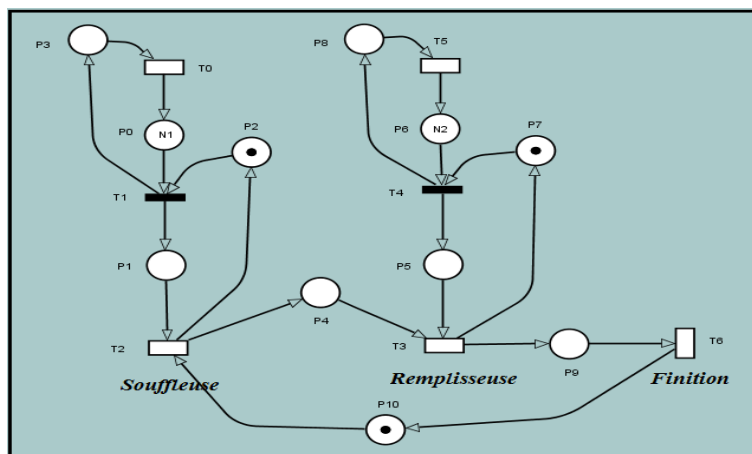


FIGURE 4.6 – Modèle réduit de la chaîne de production.

4.5 Evaluation de performances de la chaîne réduite

4.5.1 Description du logiciel TimeNet

Le logiciel TimeNet (TimeNet Evaluation Tool) [24] est une boîte à outil graphique et interactive qui permet la modélisation et l’analyse qualitative et quantitative des systèmes en utilisant les RdPSG et RdPSGC.

TimeNet a été développé per ” Real-Time System” et le groupe de ”Robotique” de Technische Universität à Berlin, Allemagne. La première version de cet outil a été développée en 1991. Le projet a été motivé par la nécessité d’un logiciel puissant pour une évaluation efficace des systèmes de RdPSG.

TimeNet fournit une interface graphique conviviale. Il est particulièrement adapté à l’analyse des réseaux de Petri déterministes, stochastiques et stochastiques généralisés.

La version TimeNet 4.0 est une version stable disponible depuis 2007 dans laquelle de nouveaux algorithmes ont été ajoutés. Elle comprend une interface graphique qui intègre les différents formalismes des réseaux de Petri et des algorithmes d’analyse générique en Java [24]. Elle prend en charge une nouvelle classe de réseaux de Petri stochastiques colorés (SCPN) qui permet la conception de systèmes complexes d’une manière compacte. Une simulation standard à événements discrets a été mise en œuvre pour l’évaluation de performances des modèles RdPSC.

Propriétés du modèle

Les propriétés du modèle réduit sont comme suit :

- Borné car le nombre de jetons dans chaque place est fini ;
- Vivant car chaque transition est vivante.

- Sans blockage.

Puisque notre réseau est borné et admet M_0 comme état d'accueil donc il est ergodique, l'évaluation des performances à l'état stationnaire est possible.

4.5.2 Application

Les taux de transition

Les taux de transition sont donnés dans le tableau suivant. Ces taux font partie des caractéristiques matérielles des machines (cadence de chaque machine).

Tel que :

- λ_i est le taux des arrivées des bouteilles à machine i ;
- μ_i est le taux de service de la machine i .

Machines	λ_i (bouteille/second)	μ_i (bouteille/second)
Souffleuse	2	2.5
Remplisseuse	2.5	3
Finition	3	13.1

Données de l'entreprise

Les performances présentées dans le tableau suivant, sont calculées au niveau du service de performances à l'aide de l'Excel.

Machines	$n(p)$	$E[T]$
Souffleuse	1.6666667	0.8333333
Remplisseuse	2.00000	0.800000
Finition	0.1308333	0.0436111

En utilisant les formules de Little, nous avons eu le temps moyen de séjour d'une bouteille dans chaque machine. Ensuite, nous les avons sommés, pour avoir le temps moyen de séjour d'une bouteille dans toute la chaîne qui est $T_s = 1.5769444$ secondes.

Résultats par RdPSG

La figure suivante nous montre le résultat obtenu par TimeNet :

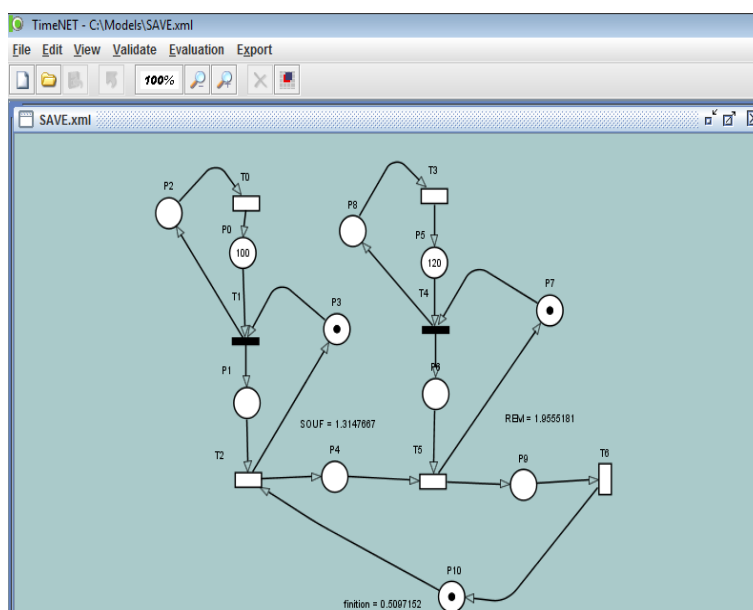


FIGURE 4.7 – Résultat.

Les indices de performances obtenu en utilisant le logiciel TimeNet tels que :

- La quantité stock des préformes pour la souffleuse est $N_1 = 100$ préformes ;
- La quantité stock des huiles pour la remplisseuse est $N_2 = 120$ unités, avec 1 unité = 5 litres ;

Machines	λ_i	μ_i	$n(p)$	$E[T]$
Souffleuse	2	2.5	1.3147667	0.65738335
Remplisseuse	2.5	3	1.9555181	0.78220724
Finition	3	13.1	0.5097152	0.16990506

Le temps moyen de séjour d'une bouteille dans la chaîne de production est $T_s = 1.60949565$ seconde.

4.5.3 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par les RdPSG à l'aide du logiciel TimeNet, sont validés par les résultats de l'entreprise. Nous constatons que les résultats obtenus par les RdPSG sont très proches de ceux de l'entreprise, ce qui nous amène à ne pas rejeter l'hypothèse sur la distribution exponentielle des durées de franchissement des transitions temporisées.

4.6 Modèle de la chaîne avec une maintenance

D'après les emplacements des capteurs sans fil, qui interviennent juste lors d'une réalisation d'une panne, nous avons eu l'idée de modéliser un cycle de maintenance

pour voir l'influence des capteurs sur les performances de la chaîne de conditionnement.

4.6.1 Principe de la modélisation

Les machines sont sujettes à des défaillances aléatoires de taux λ_1 . Une maintenance est alors appliquée.

Dans notre cas, nous traitons la défaillance de la souffleuse. Supposons que la défaillance est causée par la panne du compresseur qui l'alimente en d'air comprimé. La réparation de la machine est entamée avec un taux de réparation λ_2 .

Le modèle de réseau de Petri stochastique (RdPS) correspondant à la chaîne de production en tenant en compte de la maintenance est le suivant :

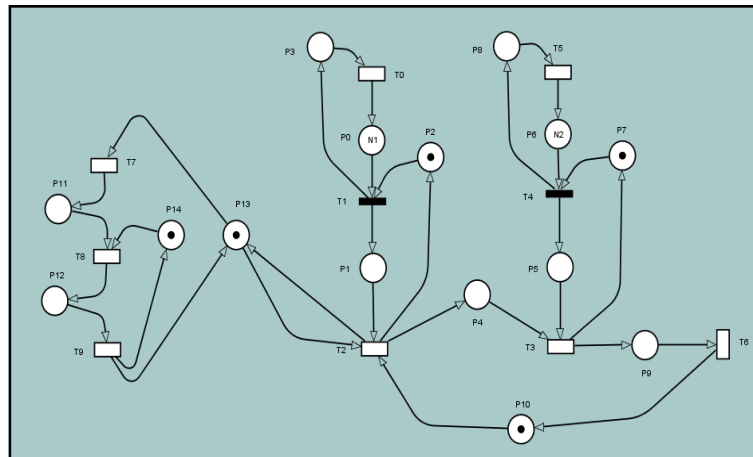


FIGURE 4.8 – Modèle de la chaîne de production avec une maintenance.

4.6.2 Modélisation d'un cycle de maintenance

4.6.3 Principe de modélisation

Afin de représenter le fonctionnement du processus de maintenance, on a eu recours à la modélisation graphique par les RdPS. Cette dernière s'appuie sur une décomposition structurelle des tâches.

Dans le but de réaliser notre modèle, on a jugé de représenter chaque tâche par une place et l'exécution de cette tâche par une transition. Les ressources sont indiquées par des jetons qui peuvent nous informer sur leur situation (libre, occupée). Les temps d'exécution ne sont pas fixes. On associe à chaque transition une variable aléatoire.

Le modèle est le suivant :

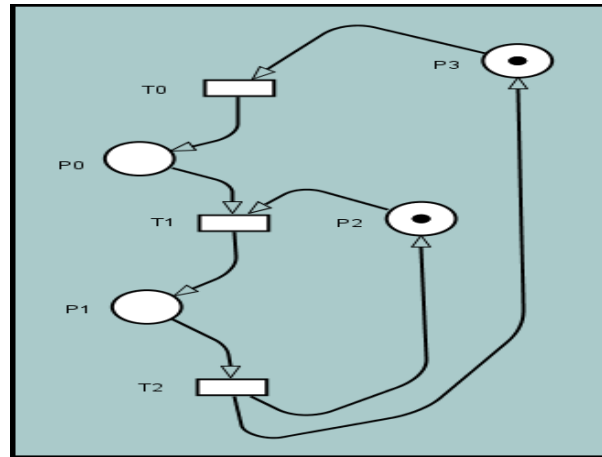


FIGURE 4.9 – Modèle d'un cycle de maintenance.

4.6.4 Explication

La machine est opérationnelle (P_3). Elle est sujette à une défaillance aléatoire. Dès qu'elle tombe en panne, le service de production lance une demande de travail (DT) au service de maintenance.

La machine est mise en attente d'une opération de maintenance corrective (P_0). La ressource est disponible en (P_2). Un ordre de travail (OT) est envoyé par le service maintenance pour favoriser la phase de réparation (P_1). La machine est maintenant réparée.

Signification des places

1. P_0 : L'attente de la demande de travail ;
2. P_1 : Réparation ;
3. P_2 : Disponibilité des ressources humaines ;
4. P_3 : Disponibilité de la machine (l'équipement est en état de marche).

Signification des transitions

- T_1 : L'arrivée de la demande de travail ;
- T_2 : L'arrivée de l'Ordre de Travail (OT) ;
- T_4 : La remise en marche.

4.6.5 Analyse du RdPS par TimeNet

Nous supposons que la machine (compresseur) est sujette à une défaillance qui est en moyenne égal à 2 pannes/jour (d'après le service maintenance). Ce qui nous

donne un taux de défaillance $\lambda_1 = 0.00138$ pannes/mn. Le temps que le service de maintenance prend pour recevoir l'information qu'il y ait une panne au niveau d'une machine, est égal en moyenne à 7 minutes. Ce dernier prend une durée de 15 minutes à 20 minutes pour réparer cette panne.

Taux de transition

Les taux de transition sont donnés comme suit :

1. Taux d'arrivée d'une demande de travail $\lambda_1 = 0.00138$ pannes/mn ;
2. Taux d'attente d'une réparation $\lambda_2 = 0.285$ pannes/mn ;
3. Taux de réparation $\lambda_3 = 0.066$ pannes/mn.

Résultats

Pour l'évaluation des performances du cycle de maintenance, on utilise le logiciel TimeNet. Les résultats obtenus en utilisant les taux de transition et les formules citées précédemment, sont donnés comme suit :

- Le temps moyen d'un lancement d'une demande de travail est égal à $T_{DT} = 6.79$ mn ;
- Le temps moyen de l'arriver de l'ordre de travail c'est-à-dire l'attente d'une réparation es égal à $T_{OT} = 1.705$ mn ;
- Le temps moyen d'une réparation est égal à $T_{Rep} = 14.7$ mn ;
- Le temps moyen de séjour d'une bouteille dans la chaîne lors d'une panne est égal à 23.221825 mn.
- Le temps moyen d'une maintenance est égal à $T_{maint} = 23.195$ minutes.

Interprétaion des résultats

La détection d'une panne au niveau des compresseurs qui sont utilisés pour le soufflage des préformes se fait en moyenne en un temps $T_{DT} = 6.79$ mn, et cela est un temps important. Ce qui engendre des charges indirectes pour l'entreprise en perdant pour 6 minutes de retard, une production de 229 bouteilles. Donc, il est important de minimiser ce temps afin d'optimiser le cycle d'intervention. Cette réduction du temps d'une détection d'une panne peut se faire par l'utilisation des capteurs sans fil.

4.7 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.

Dans ce qui suit, 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 sans réseaux de capteurs sans fil.

4.7.1 Analyse du réseau

Taux de transition

En ajoutant des capteurs sans fil à la chaîne, on aura les taux de transition suivant :

1. Taux d'arrivée d'une demande de travail $\lambda_1 = 0.00138$ pannes/mn ;
2. Taux de d'attente d'une réparation $\lambda_2 = 0.333$ pannes/mn ;
3. Taux de réparation $\lambda_3 = 0.066$ pannes/mn.

Résultats

Les résultats obtenus en utilisant les taux de transition cités précédemment, sont donnés comme suit :

- Le temps moyen d'un lancement d'une demande de travail est égal à $T_{DT} = 2.73$ mn ;
- Le temps moyen de l'arrivée de l'ordre de travail, c'est-à-dire l'attente d'une réparation, est égal à $T_{OT} = 1.705$ mn ;
- Le temps moyen d'une réparation est égal à $T_{Rep} = 14.7$ mn ;
- Le temps moyen de séjour d'une bouteille dans la chaîne lors d'une panne est égal à 19.161825 mn.
- Le temps moyen d'une maintenance est égal à $T_{maint} = 19.135$ minutes.

4.8 Comparaison des résultats

D'après l'étude que nous avons fait, nous remarquons bien que le temps moyen de lancement d'une demande de travail diminue ($T_{DT} = 2.73$ mn) en ajoutant des capteurs sans fil pour transmettre plus rapidement l'information de panne aux responsables pour qu'ils puissent la réparer rapidement avant que ne se produise l'arrêt de la chaîne de production. Donc, la solution technique est efficace pour contrôler les systèmes de production.

En comparant les temps de maintenance obtenus avec et sans capteurs, nous voyons bien qu'en utilisant le réseau de capteurs sans fil, l'entreprise gagne un temps de 4 minutes pour chaque maintenance. Ce qui influe sur les performances de la chaîne de conditionnement.

Conclusion

Après avoir décrit le système de production, une modélisation modulaire de ce dernier restreinte aux deux machines (souffleuse et remplisseuse), a été faite par les réseaux de Petri stochastiques généralisés. La résolution du modèle obtenu par le logiciel TimeNet a permis de calculer ses performances. Ensuite, nous avons pu montrer l'utilité des réseaux de capteurs sans fil au domaine de production, et cela en analysant un cycle de maintenance.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de performances de la chaîne de conditionnement d'huile à base d'un réseau de capteurs sans fil du complexe Cevital. L'un des moyens d'atteindre notre objectif, est d'utiliser les réseaux de Petri stochastiques généralisés.

En effet, nous proposons la mise en place d'une démarche pour améliorer les performances des chaînes de production. Il s'agit d'utiliser les réseaux de capteurs sans fil pour la réduction du temps de maintenance lors de l'occurrence des pannes dans le système de production.

En premier lieu, nous avons modélisé la chaîne de conditionnement en utilisant les réseaux de Petri stochastiques généralisés (RdPSG). Nous avons réduit notre modèle en nous intéressant aux machines qui vont être muni par le service de maintenance de réseaux de capteurs sans fil. Puis, nous avons étudié son fonctionnement. Nous avons obtenu ses métriques de performances en utilisant le logiciel des réseaux de Petri TimeNet.

Nous avons également étudié notre chaîne de conditionnement en ajoutant un cycle de maintenance, afin de d'estimer l'utilité de munir chaînes de production, de réseaux de capteurs sans fil.

En effet, nous constatons que l'installation d'un réseau de capteurs sans fil va réduire le temps de maintenance au cours d'une panne, ce qui améliore les performances de la chaîne de conditionnement.

Nous proposons comme perspectives :

- L'évaluation de performances du réseau de capteurs sans fil ;
- Faire une étude et de généraliser la mise en place des réseaux de capteur sans fil sur les six 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] L. Amodeo. Contribution à la simplification et à la commande des réseaux de petri stochastiques : Application aux systèmes de production. Thèse, Université de France-Compté, Janvier 1999.
- [4] C. Balague. *Les Systèmes Multi-agents en Marketing : Modélisation par Les Réseaux de Petri.* PhD thesis, Ecole des Hautes Etudes Commerciales, 2005.
- [5] R. B. Bekrar. *Identification des systèmes à événements discrets par réseaux de Petri.* Université de Reims Champagne Ardenne, 31 Mars 2009.
- [6] C. Boughani. Evaluation des performances d'un système de production : Cas de l'unité aliments de bétail el kseur. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur, Département de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, 2004.
- [7] C.Y. Chong and S.P. Kumar. *Sensor Networks : Evolution, Opportunities, and Challenges.* In Proceedings of the IEEE, vol.91, no.8, pp. 1247-1256, 2003.
- [8] M. Dias. Les réseaux de petri, modèles fondamentaux. Thèse, Hermès Science Publication, Paris, 2001.
- [9] S. Khebbache et D. Mazouz. Contribution à l'implantation de la tpm 'total productive maintenance' au sein de la raffinerie dihuile de cevital. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur, Département de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, 2004.
- [10] A. Haouchria et Z. Hakima. Etude bibliographique des réseaux de petri. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur, Département de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, 2001.
- [11] L. Gallon. *Le Modèle Réseaux de Petri Temporisés Stochastiques : Extensions et Applications.* Université de Paul Sabatier, 1997.
- [12] A. C. Geniet. *Les Réseaux de Petri : Un Outil de Modélisation Cours et Exercices Corrigés.* Springer-Verlag Berlin, 2006.
- [13] N. Gharbi. *Evaluation des Performances et de la fiabilité des Système Multi-Classes avec Rappel à l'aide des Réseaux de Petri Stochastiques Colorés.* PhD thesis, USTHB - Alger, 2007.

- [14] S. Hakmi. Evaluation des performances des systèmes prioritaires à l'aide des réseaux de petri stochastiques généralisés. Master's thesis.
 - [15] T. Melodia I.F. Akyildiz and K. Chowdhury. *A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks*. Computer Networks Journal, 2007.
 - [16] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. *Wireless sensor networks : a survey*. *Computer Networks (Elsevier)*. Vol.38, no.4, pp.393-422, 2002.
 - [17] H. Karl and A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. J. Wiley and Sons, 2005.
 - [18] A. Koubaa. *Introduction à l'Évaluation de Performances des Systèmes Informatiques et de Communication*. LORIA-TRIO-INPL, 2004.
 - [19] D. Medjani. Contribution à la modélisation de la chaîne logistique à l'aide du calcul de besoin en composant (mrp) cas de l'unité de conditionnement d'huile de l'entreprise cevital de béjaïa. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur, Département de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaïa, 2010.
 - [20] Y. Morère. *Cours de réseau de Petri*. Avril 2002.
 - [21] F. Peres. Réseaux de petri temporels à inhibitions/permissions application à la modélisation et vérification de systèmes de tâches temps réel. Technical report, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Janvier 2010.
 - [22] J. Sifakis. *User of Petri Nets for Performance Evaluation In Measuring, Modelling and Evaluating Computer Systems*. Publ. Co, North Holland, 1977.
 - [23] R. Valette. Cours réseaux de petri. Technical report, LAAS-CNRS Toulouse, Septembre 2000.
 - [24] A. Zimmermann and M. Knoke. *TimeNET 4.0 A Software Tool for the Performability Evaluation with Stochastic and Colored Petri Nets*. Technische Universität Berlin, Real-Time Systems and Robotics Group, August 2007.
-