

---

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

### Thème

# Diagnostic des pannes des machines par la technique de l'arbre de défaillance

Préparé par :

**HORKOUS** Younes et **KHOUIDMI** Ahmed

Soutenu publiquement le : 17 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

M. <b>ABED</b> Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. <b>SAAD</b> Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. <b>HAMMOU</b> Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. <b>GUEMMOUR</b> Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

---

---

# *Dédicaces*

*Nous dédions ce mémoire avec tous nos cœurs*

*A nos chers parents*

*A nos frères et sœurs*

*A nos familles*

*A tous nos chers amis*

*HORKOUS Younes*

*KHOUIDMI Ahmed*

---

## REMERCIEMENTS

On tient avant tout à remercier chaleureusement Monsieur **GUEMMOUR Mohamed Boutkhal**, Maître de conférences classe "B" à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, il a su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. On le remercie non seulement pour la qualité de son encadrement mais également pour l'inestimable qualité humaine dont il a toujours fait preuve.

On remercie tout autant Monsieur **ABED Belkacem** Maître de conférences classe "A" à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Messieurs **SAAD Mohamed** Maître de conférences classe "B" et **HAMMOU Mahmoud** Maître de conférences classe "B" tous les deux de l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret qui nous ont fait l'honneur d'être examinateur de notre mémoire, et qui ont consacré de leur précieux temps à l'examen et à l'évaluation de notre travail.

On les remercie vivement pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail afin de l'expertiser avec une grande efficacité et une grande rapidité, ainsi que pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document.

---

ABREVIATIONS .....	IX
NOMENCLATURES.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
INTRODUCTION GENERALE .....	2

## CHAPITRE 1 : SUPERVISION – SURVEILLANCE – DIAGNOSTIC

1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 DEFAILLANCE.....	4
1.2.1 Définition de la défaillance.....	4
1.2.2 Classification des défaillances.....	5
1.2.3 Caractéristiques d’une défaillance.....	6
1.2.4 Mode de défaillance.....	6
1.2.5 Origines des défaillances .....	7
1.2.6 Conséquences de la défaillance .....	8
1.3 SUPERVISION INDUSTRIELLE.....	9
1.3.1 Définition.....	9
1.3.2 Objectifs de la supervision .....	9
1.3.3 Tâches de la supervision.....	10
1.3.4 SYSTEME SCADA.....	12
1.4 SURVEILLANCE.....	13
1.4.1 Définition.....	13
1.4.2 Architecture de la surveillance .....	13
1.4.3 Surveillance classique et dynamique.....	14
1.5 SUPERVISION, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC .....	15
1.6 LE DIAGNOSTIC .....	16
1.6.1 Définitions .....	16
1.6.2 Rôle du diagnostic .....	16
1.6.3 Méthodes de diagnostic .....	17
1.6.4 Méthode internes .....	18
1.6.5 Méthode externes.....	18
1.6.6 Méthodes inductives et déductives.....	18
1.6.7 Méthode quantitatives et qualitatives .....	18
1.7 CONCLUSION .....	22

## CHAPITRE 02 : L'ARBRE DE DEFAILLANCE

2.1	INTRODUCTION .....	24
2.2	ARBRE DE DEFAILLANCE .....	24
2.1.1	Définition et Objectives.....	24
2.2.2	Etapas de la mise en œuvre de l'AdD .....	26
2.2.3	Représentation graphique de l'AdD.....	26
2.2.4	Démarche et construction de l'AdD .....	28
2.2.5	Analyses qualitatives de l'AdD.....	31
2.2.6	Analyse quantitative de l'AdD.....	32
2.3	METHODES DE CALCUL DE PROBABILITE .....	34
2.3.1	Probabilité directe .....	34
2.3.2	Probabilité statique.....	34
2.3.3	Probabilité totale .....	35
2.3.4	Probabilité conditionnelle .....	35
2.3.5	Probabilité composée .....	35
2.3.6	Formule des probabilités totales.....	35
2.3.7	Formule de BAYES .....	36
2.4	LES TECHNIQUES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.....	36
2.4.1	Systèmes experts .....	36
2.4.2	Réseaux neurones .....	37
2.4.3	Reconnaissance des formes .....	37
2.4.4	Réseaux de Petri .....	38
2.4.5	L'approche Bayésiennes [26].....	38
2.5	RESEAUX BAYESIENS .....	39
2.5.1	Théorème de Bayes .....	39
2.5.2	Définition des réseaux bayésiens .....	40
2.5.3	Inférence.....	41
2.5.4	Interprétation de l'AdD en RB.....	41
2.6	CONCLUSION.....	41

## CHAPITRE 03 : ETUDE DE CAS – COMPRESSEUR BCL 406

3.1 INTRODUCTION .....	46
3.2 GENERALITES SUR LES COMPRESSEURS .....	46
3.2.1 Définition .....	46
3.2.2 Types des compresseurs.....	46
3.2.3 Buts de compression .....	47
3.2.4 Domaines d’application et critères de choix des compresseurs.....	47
3.3 LE COMPRESSEUR CENTRIFUGE BCL 406.....	48
3.3.1 Identification .....	48
3.3.2 Présentation du compresseur BCL 406.....	49
3.3.3 Caractéristiques de la machine .....	50
3.3.4 Mise en place du compresseur BCL 406 .....	50
3.3.5 Modes des défaillances .....	51
3.4 Application .....	52
3.4.1 Logiciel de simulation .....	52
1°. Netica application .....	52
2°. Objectifs de Netica .....	52
3°. Interface de Netica.....	52
3.4.2 Mise en œuvre.....	53
1°. Fichier historique du compresseur BCL 406.....	53
2°. Construction de l’Add.....	53
3°. Tableau des probabilités .....	55
4°. Calcul des probabilités a postériori .....	55
5°. Quantification de l’Add .....	56
6°. Modélisation l’Add en RB.....	57
7°. Diagnostic des défaillances par réseaux bayésiens.....	57
3.5 CONCLUSION .....	62

CONCLUSION GENERALE .....	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	66
ANNEXE A1.....	69
ANNEXE A2.....	71
ANNEXE A3 .....	73
ANNEXE B1 .....	74
ANNEXE B2 .....	77
ANNEXE B3.....	78
ANNEXE B4.....	80
ANNEXE B5.....	83
RESUME .....	85

## ABREVIATIONS

<b>SCADA</b>	Superviser control and data acquisition
<b>AMDEC</b>	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité
<b>AMDE</b>	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets
<b>AdD</b>	Arbre de défaillance
<b>5M</b>	Matières, matériels, milieu, méthodes, main d'œuvre
<b>IA</b>	Intelligence artificielle
<b>SE</b>	Systèmes experts
<b>RdP</b>	Réseaux de Petri
<b>RB</b>	Réseaux bayésiens
<b>M</b>	La partie mécanique
<b>H</b>	La partie hydraulique
<b>T</b>	La partie thermique
<b>C</b>	Défaillance du compresseur
<b>TPC</b>	Table de probabilité conditionnelle
<b>HP</b>	Haute pression
<b>M1</b>	Augmentation de bruit
<b>M2</b>	Bruit et patinage
<b>H1</b>	Fuite d'huile
<b>H2</b>	Fermeture de circulation
<b>T1</b>	Echauffement
<b>T2</b>	Haute température et augmentation de bruit

## NOMENCLATURE

<b><i>SYMBOLE</i></b>	<b><i>DÉSIGNATION</i></b>
<b>EI</b>	Evènement indésirable
<b>P(E)</b>	La probabilité de l'évènement E
<b>P(E1.E2)</b>	Probabilité composée
<b>A</b>	Evènement observé
<b>B</b>	Evènement étudié
<b>P(A)</b>	Probabilité à priori
<b>P(B A)</b>	La probabilité que B se produise lorsque A est vraie
<b>F(t)</b>	La fonction de défaillance
<b>P (T≤t)</b>	la probabilité d'occurrence d'un mode de défaillance avant l'instant <i>t</i> .

## LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 1

## SUPERVISION, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC

Figure 1.1 :	Défaillances, causes et effets	6
Figure 1.2 :	Poste de pilotage d'une supervision	9
Figure 1.3 :	Les différentes étapes de la supervision	10
Figure 1.4 :	Composantes de la surveillance industrielle	13
Figure 1.5 :	Surveillance classique et surveillance dynamique	14
Figure 1.6 :	Schéma générale de supervision	15
Figure 1.7 :	Classification des méthodes de diagnostic	17
Figure 1.8 :	Diagramme de Pareto ou courbe ABC	19
Figure 1.9 :	Classification des principes méthodes de l'analyse qualitative	20
Figure 1.10 :	Diagramme d'Ishikawa	21
Figure 1.11 :	Présentation graphique de l'AMDEC	21
Figure 1.12 :	L'arbre de défaillance.	22

## CHAPITRE 2

## L'ARBRE DE DEFAILLANCE

Figure 2.1 :	Les étapes d'analyse de l'AdD	26
Figure 2.2 :	Démarche de l'AdD	28
Figure 2.3 :	Exemple d'utilisation de la technique des barrières	32
Figure 2.4 :	Porte ET	33
Figure 2.5 :	Porte OU	33
Figure 2.6 :	Méthodes de calcul de probabilité	34
Figure 2.7 :	Représentation graphiques d'un réseau de neurones artificiels	37
Figure 2.8 :	Étapes de diagnostic par reconnaissance des formes	38
Figure 2.9 :	Principe de l'approche Bayésienne	40
Figure 2.10 :	Algorithme simplifié pour représenter un AdD en RB	41
Figure 2.11 :	Exemple de structure d'AdD	42
Figure 2.12 :	Structure du réseau bayésien obtenu à partir de la Figure 2.11	42

---

CHAPITRE 3  
L'ETUDE DE CAS : COMPRESSEUR BCL406

Figure 3.1 :	Les principales catégories de compresseurs.	47
Figure 3.2 :	Codification du compresseur centrifuge BCL406	48
Figure 3.3 :	Compresseur centrifuge BCL 406	49
Figure 3.4 :	Compresseur centrifuge BCL 406.	50
Figure 3.5 :	Schéma simplifié d'un train de compresseur	51
Figure 3.6 :	Interface graphique de Netica 6.09	52
Figure 3.7 :	AdD qualitative pour le compresseur BCL 406	54
Figure 3.8 :	AdD quantitative pour la défaillance du compresseur BCL 406	56
Figure 3.9 :	Modélisation de l'AdD en RB	57
Figure 3.10 :	TPC de l'évènement redouté sous Netica	59
Figure 3.11 :	Probabilités de M, H, T sous Netica	60
Figure 3.12 :	Inférence avec Netica, pour le compresseur	60
Figure 3.13 :	Cas de défaillance total du système	61

## LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1  
SUPERVISION, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC

Tab. 1.1 :	Classification des défaillances	4
Tab. 1.1 :	Classification des défaillances (suite)	5
Tab. 1.2 :	Liste des modes des défaillances génériques	7
Tab. 1.3 :	Causes de défaillance et type d'entités concernées	8
Tab. 1.4 :	Quelques logiciels de supervision	11

CHAPITRE 2  
L'ARBRE DE DEFAILLANCE

Tab. 2.1 :	Symboles des évènements dans l'AdD	26
Tab. 2.2 :	Symboles des portes logiques dans l'AdD	27
Tab. 2.3 :	Symboles de transfert sous l'AdD	27
Tab. 2.4 :	TPC de la porte logique « Ou »	43
Tab. 2.5 :	TPC de la porte logique « et »	43

CHAPITRE 3  
L'ETUDE DE CAS : COMPRESSEUR BCL 406

Tab 3.1 :	Caractéristiques de fonctionnement du compresseur 2 <sup>ème</sup> étage	50
Tab 3.2 :	Modes des défaillances fréquentes du compresseur	51
Tab. 3.3 :	Fichier historique du compresseur BCL 406	53
Tab. 3.4 :	Tableau des probabilités	55
Tab 3.5 :	Probabilités à postériori	56
Tab 2.6 :	Probabilité conditionnelle	58
Tab 2.7 :	Probabilité des évènements M, H, T	58

---

---

# ***INTRODUCTION GENERALE***

---

---

Le contenu du présent travail s'intègre dans un contexte technologique, en relation avec le secteur énergétique et en particulier le transport par canalisation des hydrocarbures par compression du gaz naturel à partir des gisements. Le processus de ce transport, est assuré par des turbomachines telles que les compresseurs.

Dans notre cas, il s'agit des stations de compressions implantées le long des lignes de transport des hydrocarbures. Les moyens autour desquels sont construites ces stations sont les pompes et les compresseurs. Ces derniers convertissent l'énergie mécanique fournie par un organe moteur en énergie cinétique pour faire mouvoir et accélérer la quantité de fluide le long de la canalisation. Pour garantir la disponibilité d'une station de compression, la fonction maintenance a pour mission de maintenir l'outil de production, en l'occurrence les compresseurs. Elles doivent être aptes à offrir aux différentes stations de pompage ainsi qu'aux équipements qui leur sont annexés, une prestation de service de qualité qui permet d'atteindre les objectifs tracés par l'entreprise pour satisfaire la demande de ses clients.

Dans le cadre de notre travail, on a traité l'une des deux activités de la fonction maintenance, à savoir l'activité technique et en particulier le diagnostic machine. Notre centre d'intérêt était un compresseur centrifuge multi étages BCL 406.

Dans le but de mettre en pratique et valoriser nos connaissances théoriques acquises durant notre cursus universitaire dans la spécialité maintenance industrielle, notre objectif était de fournir aux hommes de maintenance un outil d'aide pour diagnostiquer qualitativement et quantitativement les défaillances qui peuvent survenir au niveau des compresseurs centrifuges multi-étages afin d'améliorer son taux de disponibilité et garantir sa longévité.

Pour ce faire, notre travail, a été synthétisé en un mémoire structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré d'une manière générale à la présentation de la défaillance, puis nous représentons la supervision, le système SCADA, la surveillance et le diagnostic avec ses différentes méthodes.

Le deuxième chapitre sera présenté l'une de ses méthodes de diagnostic savoir l'arbre de défaillance dans l'aspect qualitative et quantitative, quelques calculs de probabilité, les techniques d'intelligence artificielle et on a aperçu l'approche bayésienne avec sa conversion en AdD.

Enfin le troisième chapitre est une étude de cas réservée à l'application de l'arbre de défaillance comme outil de diagnostic des défauts de compresseur BCL 406, avec une analyse quantitative mettant en œuvre les réseaux bayésiens. À la fin, une conclusion a été donnée pour clôturer notre travail.

---

# *Chapitre 1*

---

## ***LA SUPERVISION – LA SURVEILLANCE – LE DIAGNOSTIC***

---

---

## 1.1 INTRODUCTION

Pour répondre aux besoins de qualité et quantité de production et concurrence sur le marché, les industriels ont tendance à améliorer et à agrandir leurs installations, qui deviennent ainsi de plus en plus complexes, contribuant en même temps à augmenter le risque des défaillances, donc ils sont obligés de maîtriser des bonnes techniques de supervision, surveillance et de diagnostic.

Dans ce chapitre, on va présenter la notion de défaillance avec leur caractéristiques et classification, puis on va aborder la supervision, leur tâche et le système SCADA comme un outil pour superviser. Ensuite, nous présentons la surveillance, le processus de diagnostic machine.

## 1.2 DEFAILLANCE

### 1.2.1 Définition de la défaillance

Selon *la norme CEI-271-1974* c'est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Cette cessation peut être complète (l'entité ne remplit plus sa fonction) ou partielle (la fonction est assurée dans certaines limites, on parle alors de mode dégradé).

Les défaillances peuvent être momentanées (indisponibilité du composant à remplir sa fonction pendant un temps donné. Le composant redevient disponible sans répartition) ou permanentes (la défaillance du composant est irréversible, une maintenance est nécessaire pour remettre le composant en service). Les défaillances peuvent être qualifiées et classées de différentes manières : en fonction de la rapidité de manifestation ; en fonction du degré d'importance ; en fonction des causes, en fonction des conséquences, etc....

*Tab. 1.1 : Classification des défaillances [0]*

<b>1. Défaillance à taux constant</b>	<i>C'est une défaillance qui apparaît avec un taux de défaillance sensiblement constant pendant la durée de vie utile de l'entité. Cette défaillance est généralement catalectique. Elle est encore appelée « défaillance aléatoire ».</i>
<b>2. Défaillance complète</b>	<i>C'est une défaillance qui résulte de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise (Norme CEI-271-1974).</i>
<b>3. Défaillance partielle</b>	<i>C'est une défaillance résultante de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise (Norme CEI-271-1974). Les limites sont des limites spéciales spécifiées à cette fin (CEI-271-1974).</i>
<b>4. Défaillance de commande</b>	<i>C'est une défaillance d'une entité dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'une autre entité et pour laquelle cette entité a été qualifiée et dimensionnée.</i>

*Tab. 1.1 : Classification des défaillances (suite) [0]*

<b>5. Défaillance d'usure</b>	<i>C'est une défaillance qui apparaît avec un taux de défaillance rapidement croissant par suite de processus inhérents à l'entité.</i>
<b>6. Défaillance non pertinente</b>	<i>C'est une défaillance à exclure pour l'interprétation ou l'évaluation d'une mesure de la sûreté de fonctionnement. On parle aussi de "défaillance à ne pas prendre en compte" (Norme CEI-271A-1978).</i>
<b>7. Défaillance par dégradation</b>	<i>C'est une défaillance qui est à la fois progressive et partielle (Norme CEI-271-1974). A la longue, une telle défaillance peut devenir une défaillance complète (Norme CEI-271- 1974).</i>
<b>8. Défaillance pertinente</b>	<i>C'est une défaillance à prendre en compte pour interpréter ou évaluer une mesure de la sûreté de fonctionnement. On parle aussi de "défaillance à prendre en compte" (CEI- 271A-1978).</i>
<b>9. Défaillance progressive</b>	<i>C'est une défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité. En général, une défaillance progressive peut être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.</i>
<b>10. Défaillance de cause commune</b>	<i>C'est une défaillance dépendante ayant pour origine la même cause directe.</i>

### 1.2.2 Classification des défaillances

Selon la norme **NF X 60-011** il existe plusieurs familles des défaillances

#### ➤ *Suivant leurs causes*

- Défaillances de causes intrinsèques : défaillances dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure (liées à la durée de vie d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.
- Défaillance de causes extrinsèques : défaillances de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance.

#### ➤ *Suivant leur degré* : défaillance complète, partielle, permanente, fugitive, intermittente, etc.

- Défaillance Complète : défaillance entraînant l'inaptitude complète de l'équipement à accomplir toutes les fonctions
- Défaillance Partielle : défaillance à la suite de laquelle l'équipement ne peut plus accomplir qu'une partie des fonctions prévues initialement ou ne peut les accomplir qu'avec des performances dégradées. **[1]**

#### ➤ *Suivant leur vitesse d'apparition* : soudaine ou progressive.

- Défaillance soudaine : défaillance qui ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.
- Défaillance progressive : défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité.

### 1.2.3 Caractéristiques d'une défaillance

La dégradation étant la conséquence inévitable de l'existence et/ou de l'apparition de phénomènes complexes et couplés, elle est caractérisée par des modes de défaillance ayant des origines (ou causes) qui induisent des conséquences (ou effets).

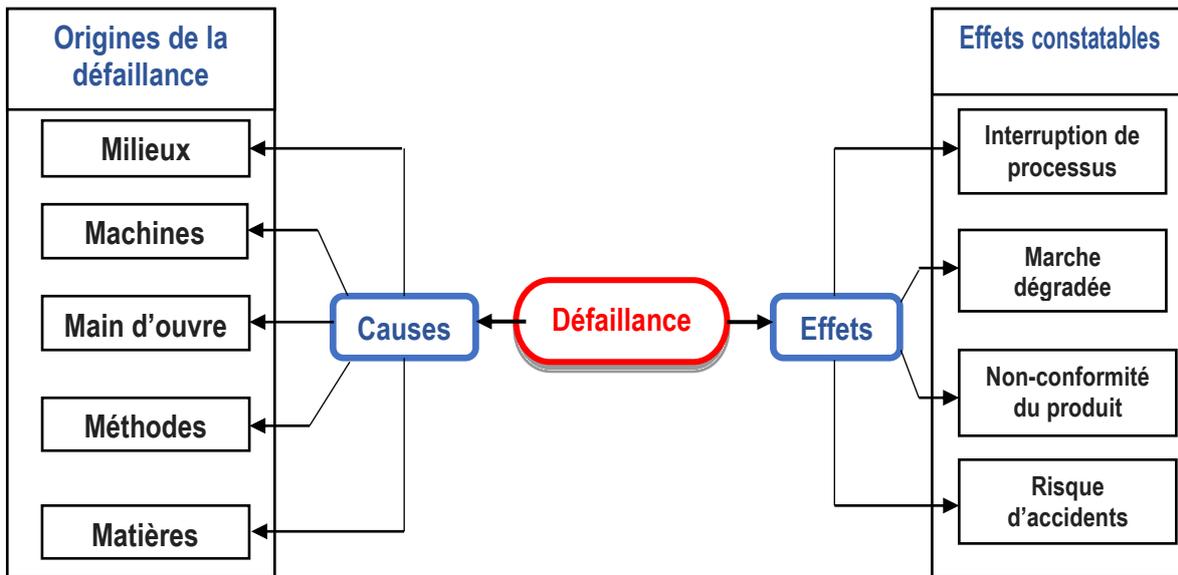


Figure 1.1 : Défaillances, Causes et effets.

### 1.2.4 Mode de défaillance

On entend par mode de défaillance, la manière dont une entité technique vient à ne pas fonctionner. Ils sont relatifs à la fonction de service devant être assurée par l'entité en question. Pour une entité technique donnée, sa fonction de service présente quatre situations différentes :

- **La fonction cesse de se réaliser**, dans ce cas, le système ne fonctionne plus ;
- **La fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite**, dans ce cas, le système ne fonctionne pas.
- **La fonction ne se réalise pas parfaitement** (altération de performance), dans ce cas, le système marche de moins en moins bien.
- **La fonction se réalise lorsqu'elle n'est pas sollicitée**, dans ce cas, le système marche de temps en temps.

Pour une entité considérée, les modes de défaillance sont d'une part fonction de leurs interactions avec leur environnement immédiat, et d'autre part fonction de leurs propriétés et de leurs caractéristiques intrinsèques. Dans, la phase de fonctionnement retenue, on peut identifier les modes de défaillance de l'élément en relation avec les fonctions à assurer. *Tab. 1.2* liste générique des modes de défaillance.

*Tab. 1.2 : Liste des modes des défaillances génériques [0]*

1	Fonctionnement (ou démarrage) prématuré	29	Sortie erronée (Augmentation)
2	Ne fonctionne (ne démarre) pas au moment prévu	30	Sortie erronée (Diminution)
3	Ne s'arrête pas au moment prévu	31	Perte de l'entrée
4	Défaillance au cours du fonctionnement	32	Perte de la sortie
5	Défaillance structurelle (rupture)	33	Court-circuit électrique
6	Blocage physique ou coincement	34	Circuit électrique ouvert
7	Vibrations	35	Fuite électrique
8	Ne reste pas en position	36	Autres conditions de défaillance exceptionnelle suivant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• les caractéristiques du système,</li> <li>• les conditions de fonctionnement,</li> <li>• les contraintes opérationnelles d'exploitation</li> </ul>
9	Ne s'ouvre pas		
10	Ne se ferme pas		
11	Défaillance en position ouverte		
12	Défaillance en position fermée		
13	Fuite interne		
14	Fuite externe		
15	Valeur au-dessus d'une limite supérieure tolérée		
16	Valeur au-dessous d'une limite inférieure tolérée		
17	Fonctionnement intempestif		
18	Fonctionnement intermittent		
19	Fonctionnement irrégulier		
20	Indication erronée		
21	Écoulement réduit		
22	Mise en marche erronée		
23	Ne s'arrête pas		
24	Ne démarre pas		
25	Ne commute pas		
26	Fonctionnement après le délai prévu		
27	Entrée erronée (Augmentation)		
28	Entrée erronée (Diminution)		

### 1.2.5 Origines des défaillances

On entend par origine de défaillance, la cause qui l'a fait apparaître ou qui a provoqué son occurrence. Les origines de la défaillance sont en relation directe avec les facteurs suivants : milieux, machines, main- d'œuvre, matière, méthode. Il existe trois types de causes amenant le mode de défaillance *Tabl. 1.3 :*

- Causes internes liées à l'entité étudiée.
- Causes externes liée à l'environnement, au milieu et à l'exploitation de l'entité étudiée.
- Causes externes liées à la main d'œuvre.

*Tab. 1.3 : Causes de défaillance et type d'entités concernées [0]*

Causes de défaillance	Composants électriques et électromécaniques	Composants hydrauliques	Composants mécaniques
<b>Causes Internes matériel</b>	- Vieillessement - Composant hors service	- Vieillessement - Composant hors service - Colmatage - Fuites	- Contraintes mécaniques - Fatigue mécanique - Etats de surface
<b>Causes externes milieu exploitation</b>	- Pollution (poussière, huile, eau) - Chocs - Vibrations - Echauffement local - Parasites - Perturbations électromagnétiques	- Température ambiante - Pollution - Vibrations - Echauffement local - Chocs, coups de bélier	- Température ambiante - Pollution - Vibrations - Echauffement local - Chocs
<b>Causes externes Main d'œuvre</b>	- Montage - Réglages - Contrôle - Mise en œuvre - Utilisation - Manque d'énergie	- Montage - Réglages - Contrôle - Mise en œuvre - Utilisation - Manque d'énergie	- Conception - Fabrication - Montage - Réglages - Contrôle - Mise en œuvre - Utilisation

### 1.2.6 Conséquences de la défaillance

On entend par conséquences de défaillance, les effets, les résultats ou la suite logique d'un fait, ou d'une action, observables ou constatables sur l'entité étudiée suite à une défaillance. Les effets qui peuvent émaner lors de l'occurrence d'une défaillance, peut être classés comme suit :

- *Effets mineurs* : légère dégradation des caractéristiques de l'entité étudiée.
- *Effets significatifs* : dégradation notable des marges de sécurité et des qualités de performance de l'entité.
- *Effets critiques* : dégradation dangereuse des marges de sécurité.
- *Effets catastrophiques* : bris de machine et / ou mort d'hommes.

### 1.3 SUPERVISION INDUSTRIELLE

Il est aujourd'hui vital pour un industriel d'exploiter au maximum tous les potentiels d'optimisation, pour assurer la disponibilité de système technique et augmenter l'ensemble des cycles de vie des équipements industrielles, pour ces dernières, les industriels implantent des procédures comme la supervision.

#### 1.3.1 Définition

La Supervision consiste à conduire une installation industrielle aux moyens d'écrans de supervision placés aux postes de pilotage, rafraîchis à chaque instant par les informations provenant des automatismes et des capteurs intelligents. [2]



*Figure 1.2 : Poste de pilotage d'une supervision.*

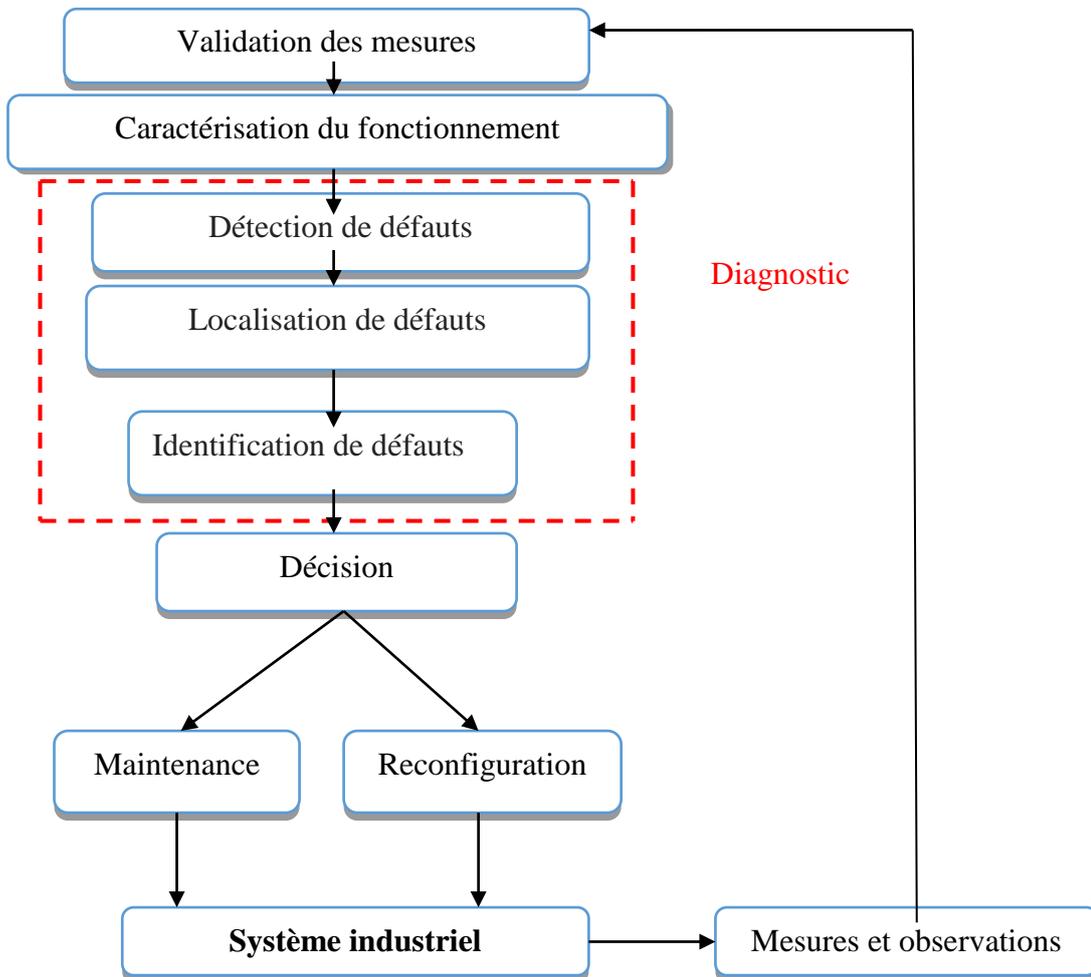
#### 1.3.2 Objectifs de la supervision

Il n'est pas concevable d'avoir une plateforme de production sans avoir une image de l'état de santé de celle-ci. Nous avons besoin d'un outil de supervision qui consolide et synthétise toutes les informations [2]. Nous supervisons pour avoir une visibilité sur le système d'information. Cela nous permet d'avoir des informations rapidement, de connaître l'état de santé du réseau, des systèmes, des performances. Parmi les objectifs de la supervision :

- Contrôler la disponibilité des services et des fonctions.
- Contrôler l'utilisation des ressources.
- Détecter et localiser des défauts.
- Diagnostic des pannes.
- Prévoir les évolutions.
- Suivi des variables.

### 1.3.3 Tâches de la supervision

La supervision est d'un niveau supérieur et qui superpose à la boucle de commande, elle assure les conditions d'opérations pour lesquelles les algorithmes d'estimation et de commande ont été conçus. Parmi les tâches principales de la supervision se trouve la surveillance, l'aide à la décision, le diagnostic et la détection. [4]



*Figure 1.3 : Les différentes étapes de la supervision [4]*

Ces différentes tâches sont détaillées dans ce qui suit :

1. L'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux, à partir des moyens de mesures appropriées ou d'observations réalisées hors des rondes par les personnels de surveillance.
2. La caractérisation des défauts est l'élaboration des caractéristiques et signatures associées à des symptômes révélateurs de défaillances et de dégradations en vue de la détection d'un dysfonctionnement.

3. La détection de défauts permet de déterminer si le système physique fonctionne normalement et a pour objectif de signaler la présence d'un défaut en comparant le comportement courant du système avec celui donné pour référence.
4. L'opération de localisation qui suit l'étape de détection a pour objet la localisation d'un défaut détecté survenant sur les actionneurs, les capteurs d'instrumentation, la commande ou le système commandé en indiquant quel organe ou composant est affecté par celui-ci.
5. La tâche d'identification a pour but de caractériser le défaut en durée et en amplitude afin de le classer par types et degrés de sévérité. Ainsi, il peut servir à assurer le suivi de son évolution, ce qui est fort utile dans le cas d'un changement de comportement lent dû au vieillissement et à l'usure. De plus, cette tâche peut comprendre une procédure visant à déterminer la cause du défaut, c'est-à-dire son origine.

*Ces trois dernières tâches constituent le corps d'une procédure de diagnostic*

6. La prise de décision en fonction des conséquences futures des défaillances et des dégradations. Cette prise de décision peut conduire à un arrêt de l'installation si ces conséquences sont importantes.

Toutes ces tâches seront implémentées et assurées par des logiciels commerciaux ou des progiciels que les entreprises industrielles peuvent mettre en œuvre pour la supervision de leurs installations. Le tableau 1.4 présente quelques logiciels qu'on trouve sur le marché.

**Tab. 1.4 :** Quelques logiciels de supervision

<b>Logiciel</b>	<b>Editeur</b>
<i>In Touch</i>	<i>Wonderware</i>
<i>Wizcon</i>	<i>PC Soft Intl</i>
<i>PCVue</i>	<i>Arc Informatique</i>
<i>Panorama</i>	<i>Europ Supervision</i>
<i>Fix32</i>	<i>Intellution</i>
<i>Induscreen</i>	<i>Ordinal</i>
<i>Cimview</i>	<i>AspenTech</i>

### 1.3.4 Système SCADA

#### 1°. Définition

SCADA est un acronyme qui signifie le contrôle et la supervision par acquisition de données (en anglais : **S**upevisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition). Le système SCADA collecte des données de diverses appareils d'une quelconque installation, puis transmet ces données à un ordinateur central, que ce soit proche ou éloigné, qui alors contrôle et supervise l'installation, ce dernier est subordonné par d'autres postes d'opérateurs. [2]

Le système SCADA fonctionne en acquérant des données de l'installation en temps réel. Les données acquises sont affichées sur une interface graphique sous un langage très proche du langage humain. Ainsi les systèmes SCADA donnent aux opérateurs le maximum d'informations pour une meilleure décision. Ils permettent un très haut niveau de sécurité, pour le personnel et pour l'installation et aussi la réduction des coûts des opérations. [2]

#### 2°. Avantages du SCADA

Les avantages du SCADA sont obtenus en combinant des outils, logiciels et matériels. Parmi les avantages du SCADA on retrouve :

- Le suivi de près du système, voire l'état du fonctionnement de procédé dans des écrans même s'il se situe dans une zone lointaine.
- Le contrôle et l'assurance que toutes les performances désirées sont atteintes, de visualiser les performances désirées du système à chaque instant, et s'il y aurait une perte de performance, une alarme se déclencherait d'une manière automatique pour prévenir l'opérateur.
- Produire une alarme lorsqu'une faute se produit et visualise même la position où se situe la faute et l'élément défectueux, ce qui facilite la tâche du diagnostic et de l'intervention de l'opérateur.
- Donne plusieurs informations sur le système ainsi aide l'opérateur à prendre la bonne décision, et ne pas se tromper dans son intervention.
- Diminue les tâches du personnel en les regroupant dans une salle de commande.
- Elimination ou réduction du nombre de visites aux sites éloignés, avec une interface graphique, on peut suivre l'état de l'installation à chaque instant, ainsi on n'aura pas besoin de faire des visites de contrôle.

## 1.4 SURVEILLANCE

### 1.4.1 Définition

*La surveillance* est un dispositif passif, informationnel, qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. [3]

### 1.4.2 Architecture de la surveillance

Dans la plupart des configurations industrielles, la surveillance se fait en ligne, en positionnant la surveillance dans le cadre de la supervision (Basseville et al. 1996)

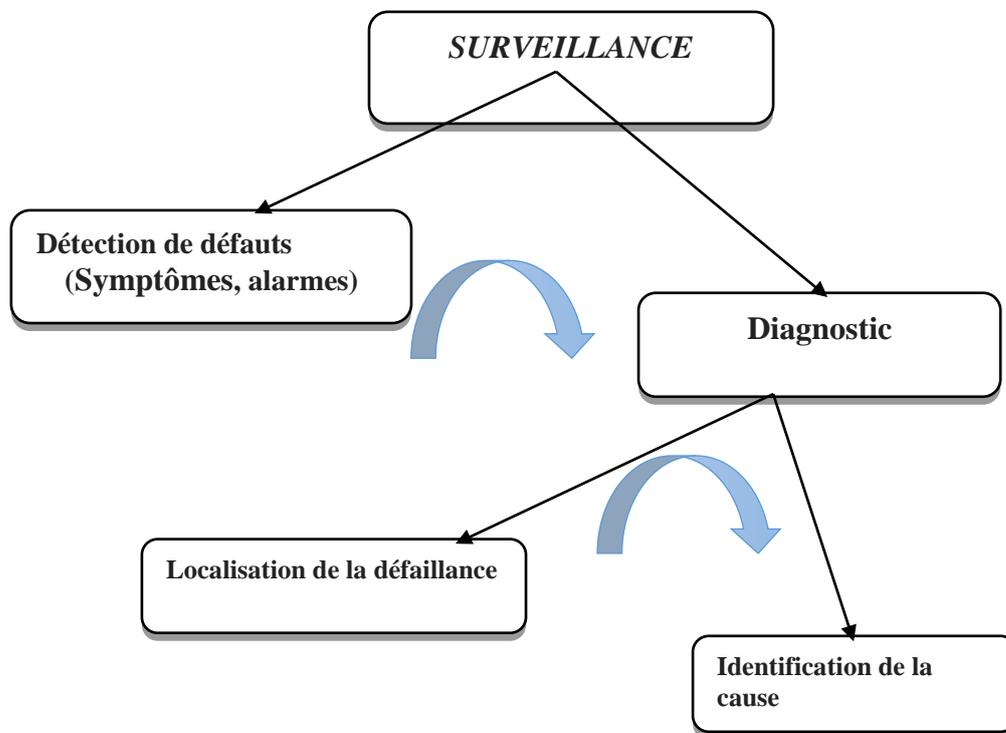


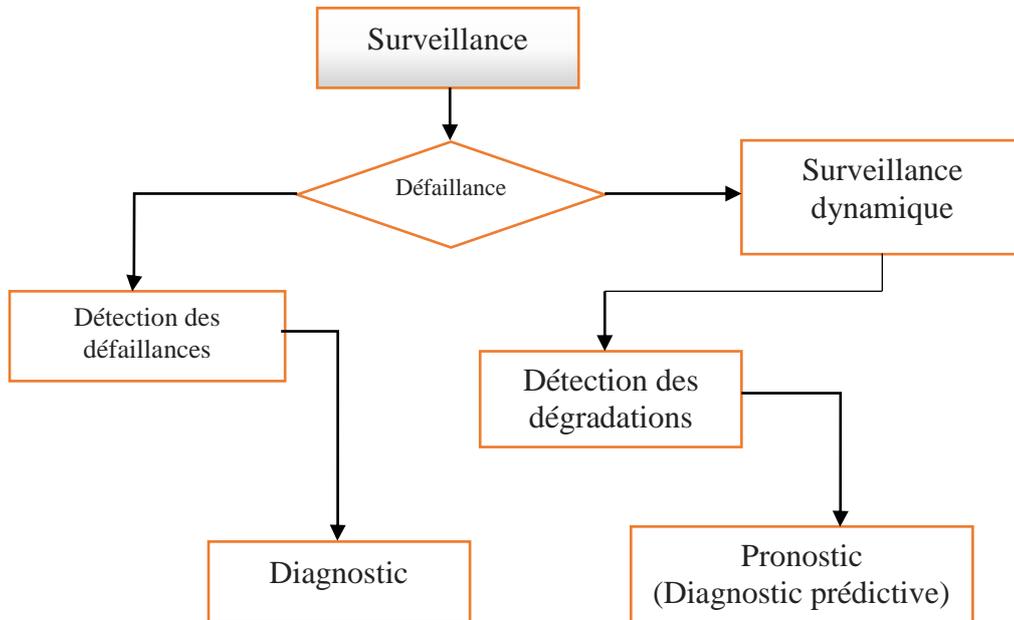
Figure 1.4 : Composantes de la surveillance industrielle [3]

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont **la détection** et **le diagnostic**

- **La détection** : Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.
- **Le diagnostic** : l'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière.

### 1.4.3 Surveillance classique et dynamique

Pour surveiller en continu l'évolution d'un système et déterminer les causes des événements indésirables, il semble donc intéressant d'utiliser au mieux toutes les informations disponibles, qu'elles soient numériques (données capteurs), ou symboliques (historiques, environnements, réparations effectuées,...). [3]



*Figure 1.5 : Surveillance classique et surveillance dynamique.* [3]

#### a. *Surveillance prédictive (dynamique)*

Comme pour la surveillance classique, la surveillance prédictive est un dispositif passif, informationnel, qui analyse l'état présent et passé du système et fournit des indicateurs sur les tendances d'évolution future du système. La surveillance prédictive se compose de : la Détection prédictive (dynamique) et du Diagnostic prédictif, appelé aussi pronostic.

#### b. *Détection prédictive (dynamique)*

La détection prédictive consiste à prédire une défaillance future. En d'autres termes, le but de la détection prédictive est de détecter une dégradation au lieu d'une défaillance.

#### c. *Diagnostic prédictif (pronostic)*

L'objectif du diagnostic prédictif est d'identifier les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une dégradation particulière.

## 1.5 SUPERVISION, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC

La supervision consiste à gérer et à surveiller l'exécution d'une opération ou d'un travail accompli par l'homme ou par une machine, puis à proposer des actions correctives en cas de besoin.

[5] [6]

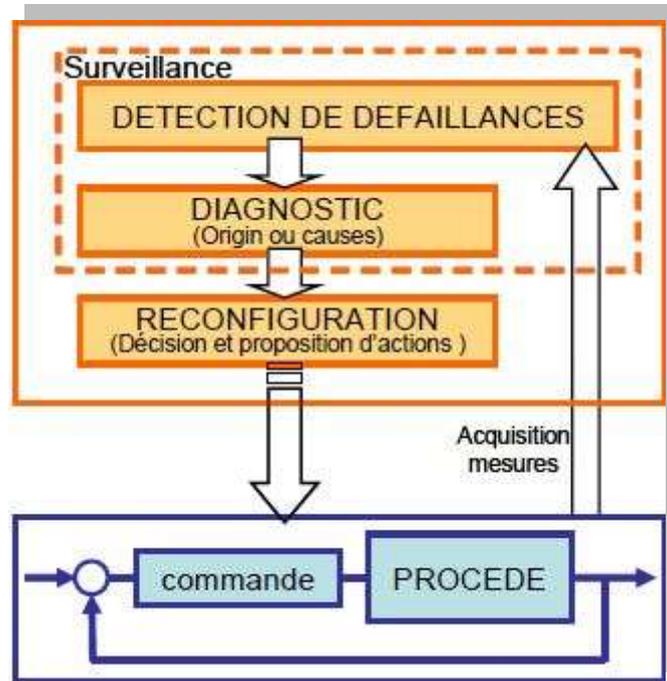


Figure 1.6 : Schéma générale de supervision [5]

La surveillance est une opération d'acquisition permanente des signaux et commandes d'un procédé afin de reconstituer l'état de fonctionnement réel. Ainsi, la surveillance utilise les données provenant du système pour représenter l'état de fonctionnement (normal ou anormal).

Le diagnostic faisant partie du processus de surveillance, il permet d'identifier les causes d'un ensemble de symptômes observés (déviations par rapport à un fonctionnement normal) qui indiquent une dégradation ou une panne de certains composants du système conduisant à un comportement anormal du système.

La reconfiguration agit sur le système en adaptant la configuration matérielle, ainsi que sur le système de commande, et prend la décision qui détermine l'état à atteindre et la séquence d'actions correctives à réaliser pour y arriver. [5]

## 1.6 LE DIAGNOSTIC

### 1.6.1 Définitions

#### *1°. Au sens étymologique*

Étymologiquement, diagnostic vient du grec diagnosis (connaissance). A l'origine utilisé dans le domaine médical, ce terme signifie : « *identification d'une maladie par ses symptômes* » le diagnostic a été ainsi utilisé dans les domaines comme l'ingénierie des connaissances et les systèmes industriels dont la gestion d'entreprise, la maintenance service après-vente, l'intelligence artificielle, le système informatique,...etc.

Selon Bussenault et Prête, le diagnostic est un instrument de direction, dans la mesure où il permet de comprendre le passé, et donc d'enclencher une action, pour l'immédiat et pour l'avenir.

Le mot diagnostic prend différents sens suivant le contexte : par exemple le diagnostic médical est la détermination d'une maladie pour en identifier les causes, et le diagnostic industriel consiste à trouver la cause d'une défaillance. [7]

#### *2°. Au sens strict*

Le diagnostic est « l'identification de la cause probable de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ».

*La norme NF EN 13306* va plus loin, puisqu'elle indique que le diagnostic d'une panne est « l'ensemble des actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause ». On va donc jusqu'à l'expertise de la défaillance.

La localisation de panne est l'ensemble des actions menées en vue d'identifier l'équipement en panne au niveau de l'arborescence appropriée.

Le diagnostic d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si une machine est défaillante ou non et de déterminer l'origine de la panne à partir des informations relevées par observation, contrôles et tests. [8], voir [ANNEXE A]

### 1.6.2 Rôle du diagnostic

Une fois situé dans la chaîne de la supervision et en particulier au niveau de la surveillance, le processus du diagnostic machine, qui permet :

- D'identifier et localiser les défaillances des entités techniques.
- De connaître les causes de ces défaillances.
- D'estimer la probabilité d'occurrence des prochaines dégradations ou défaillances.
- De fournir une assistance pour assurer la disponibilité, Fiabilité et la sécurité du système.

Le diagnostic d'un problème est assez compliqué à réaliser, vue les contraintes suivantes :

- Un symptôme peut être causé par différentes conditions de défaillance
- Certains symptômes ne sont pas faciles à reconnaître. Par exemple, la génération simultanée des conditions de défaillances peut produire un seul symptôme.
- L'existence de nombreux composants fabriqués dans un même produit.
- Le niveau élevé d'interactions entre les composants du système technique.

### 1.6.3 Méthodes de diagnostic

Si la prise de décision conduit à déclarer le processus défaillant, il convient alors de sélectionner une méthode de diagnostic.

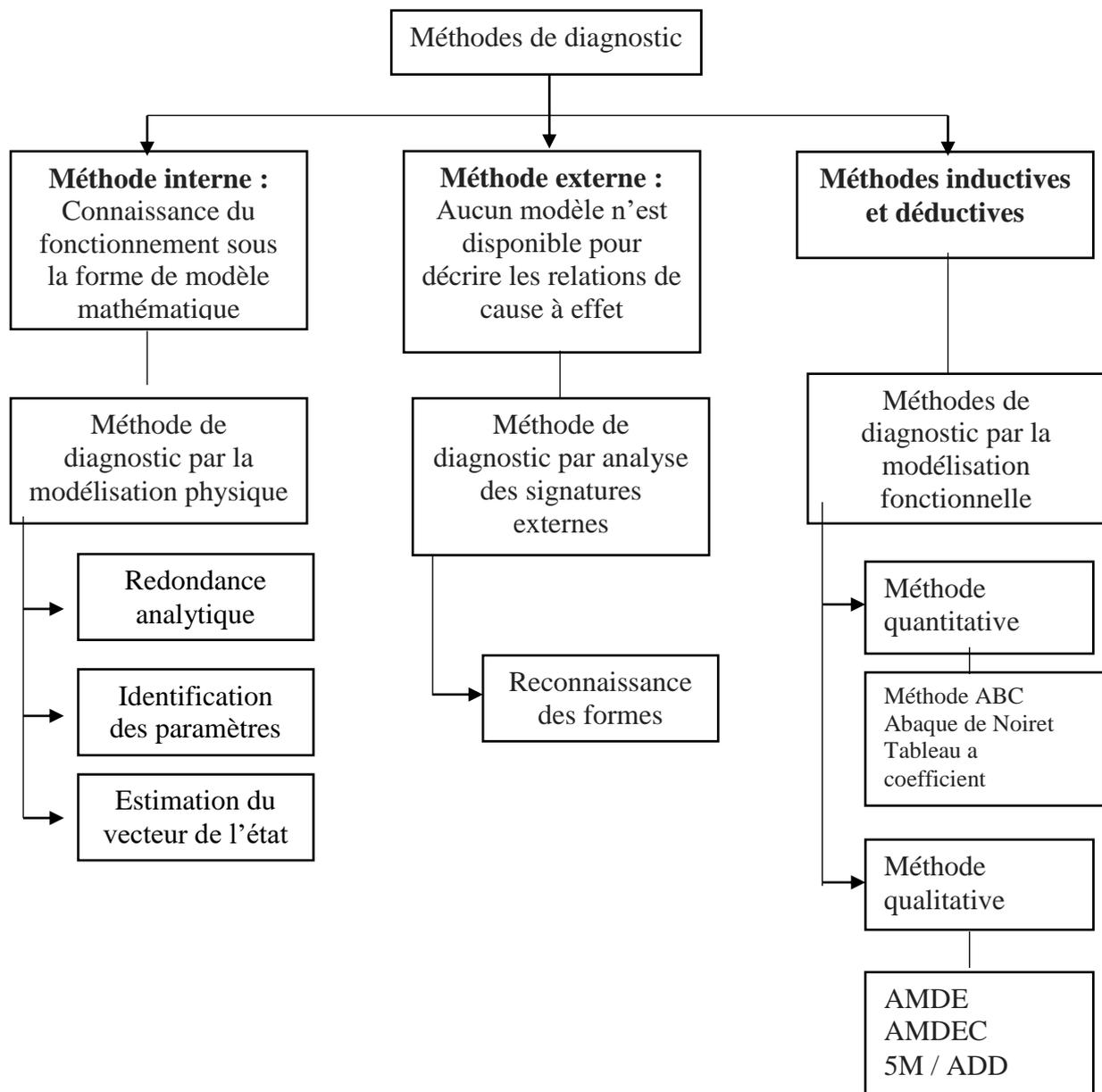


Figure 1.7 : Classification des méthodes de diagnostic

#### 1.6.4 Méthodes internes

Ces méthodes sont basées sur des modèles physiques ou de comportement (modèles mathématiques) validés expérimentalement par les techniques d'identification de paramètres. Ainsi, ces modèles permettent la mise en œuvre de la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type « boîte noire ». Ces méthodes regroupent en deux grandes familles :

- La méthode du modèle mathématique
- Les méthodes d'identification de paramètres ou d'estimation du vecteur d'état. [9]

#### 1.6.5 Méthodes externes

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et/ou les approches probabilistes. Les différentes méthodes utilisées pour remonter à la cause de la défaillance (isolation). [9]

#### 1.6.6 Méthodes inductives et déductives

##### 1. Méthodes inductives

Ces méthodes correspondent à une approche montante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable.

##### 2. Méthodes déductives

Pour ces méthodes, la démarche est bien sûr inversée puisque l'on part de l'événement indésirable et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles. [9]

#### 1.6.7 Méthodes quantitatives et qualitatives

L'analyse des défaillances peut s'effectuer de manière quantitative puis qualitative en exploitant l'historique de l'équipement et les données qualitatives du diagnostic et de l'expertise des défaillances.

##### 1°. Méthodes quantitatives

Les analyses quantitatives sont supportées par des outils mathématiques ayant pour but d'évaluer la sûreté de fonctionnement et entre autres la sécurité.

Cette évaluation peut se faire par des calculs de probabilités (par exemple lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté) ou bien par recours aux modèles différentiels probabilistes. [10]

Un point très important mérite d'être clarifié, c'est que les résultats de l'analyse quantitative ne sont pas des mesures absolues, mais plutôt des moyens indispensables d'aide au choix des actions pour la maîtrise des risques. [10]

#### a. Méthode ABC (Diagramme de PARETO)

La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc...), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma figure 2.2, on observe trois zones.

1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ;
2. Zone B : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ;
3. Zone C : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global.

Conclusion : il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit porter sur les pannes de la zone A. [11]

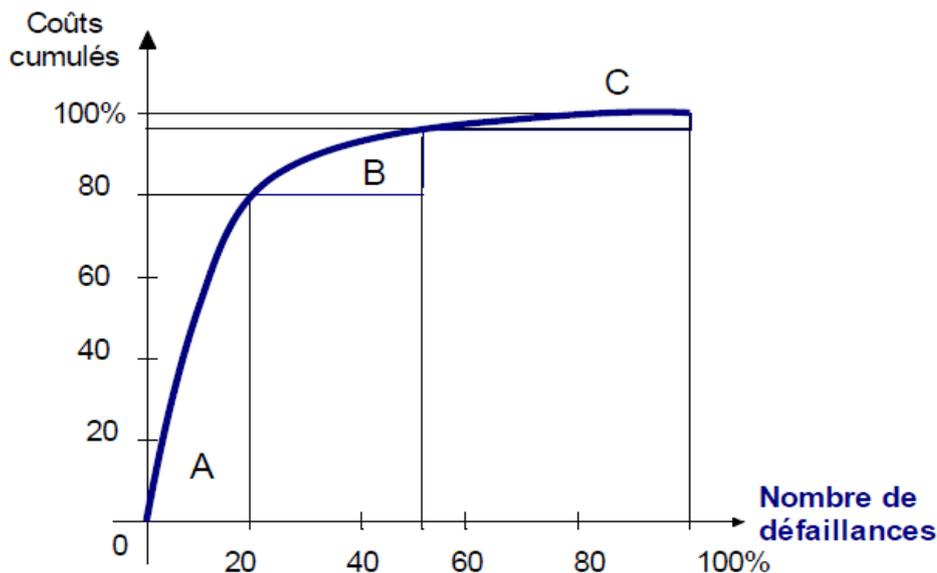


Figure 1.8 : Diagramme de Pareto ou courbe ABC [11]

En maintenance cette méthode est très utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables.

### b. Abaque de Noiret

L'abaque de Noiret est un outil de calcul scientifique qui permet d'orienter le choix de la politique de maintenance en fonction :

- des caractéristiques de l'équipement
- de son utilisation

Le résultat en est une recommandation offrant trois options possibles :

- préventif recommandé
- préventif possible
- préventif non nécessaire

Cependant, ce résultat doit être complété par une analyse économique portant sur le coût des différentes maintenances et sur le retour sur investissement estimé que peut apporter une maintenance préventive. Il ne s'agit que d'un outil d'aide à la décision et non pas d'un outil de décision. **[ANNEXE A2]**

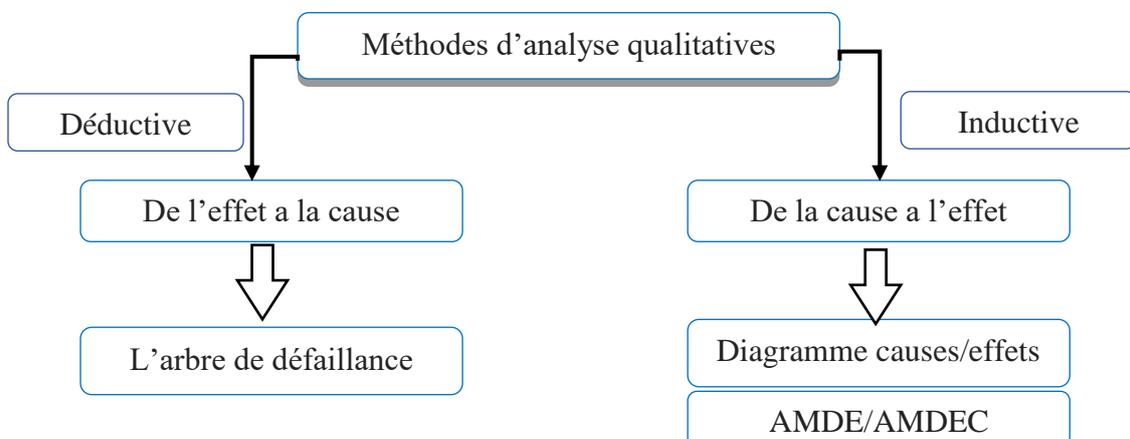
### c. Tableau a coefficient

Basé sur les mêmes critères que l'abaque de Noiret mais avec des points coefficients en considérant que le total des points obtenus se situait dans trois zones :

- Première zone en dessous de 500 points : pas de nécessité du préventif.
- Deuxième zone entre 500 et 540 points : possibilité du préventif.
- Troisième zone au-dessous de 540 points : le préventif est nécessaire. **[ANNEXE A3]**

## 2\*. Méthodes qualitatives

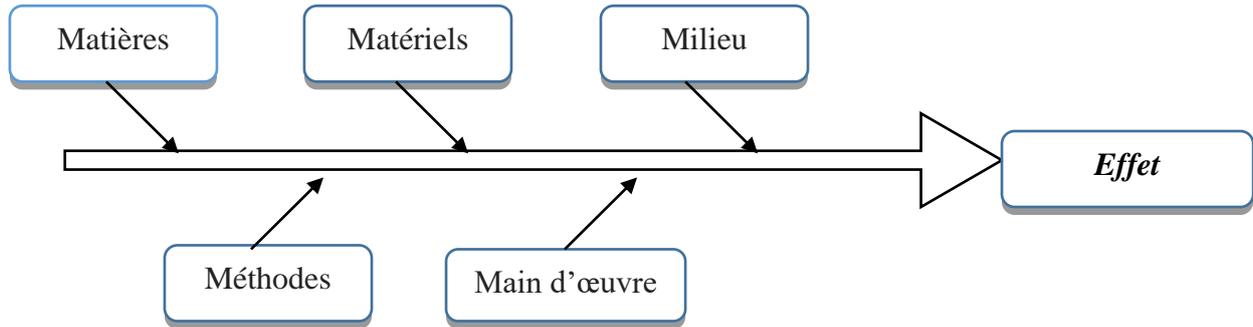
L'application des méthodes d'analyse qualitatives fait systématiquement appel aux raisonnements par induction et par déduction (Monteau & Favaro, 1990).



**Figure 1.9 :** Classification des principes méthodes de l'analyse qualitative. **[10]**

**a. Diagramme causes-effet**

Cet outil a été créé par Ishikawa, professeur à l’Université de TOKYO dans les années 60 et concepteur d’une méthode de management de la qualité totale. Le diagramme causes-effet est une représentation graphique du classement par familles de toutes les causes possibles pouvant influencer un processus. Ces familles de causes au nombre de 5 engendrent la non qualité dans un processus de fabrication. Leur nom commence par la lettre M d’où l’appellation 5M. Ishikawa a proposé une représentation graphique en « arête de poisson ».



*Figure 1.10 : Diagramme d’Ishikawa [12]*

On peut adapter cet outil à l’aide au diagnostic de la manière suivante :

- définition de l’effet étudié en regroupant le maximum de données.
- recensement de toutes les causes possibles.
- classement typologique des causes.
- hiérarchisation des causes dans chaque famille par ordre d’importance

**b. AMDEC**

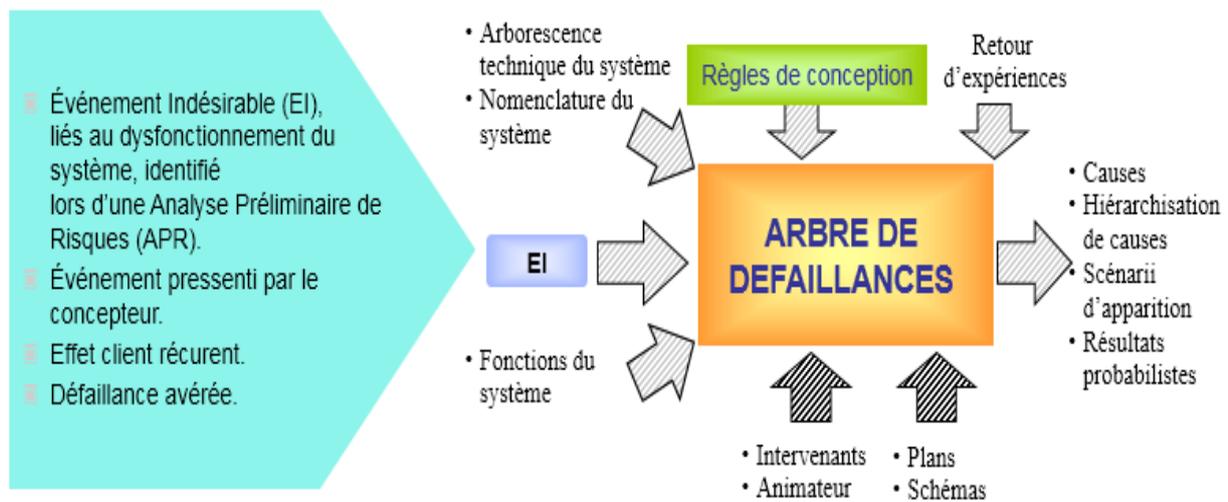
L’AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d’analyse préventive de la sûreté de fonctionnement des produits et des équipements. Ce principe de la prévention repose sur le recensement systématique et l’évaluation des risques potentiels d’erreurs susceptibles de se produire à toutes les phases de réalisation d’un produit.

Date de l’analyse :	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Phase de fonctionnement	page :				
	Machine :		Organe :				Nom :				
Pièce/Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité				Action Corrective	
						F	G	N	C		

*Figure 1.11 : Présentation graphique de l’AMDEC.*

### c. L'arbre de défaillance (AdD)

Un arbre de défaillances (aussi appelé arbre de pannes ou arbre de fautes) est une technique d'ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes statiques (un système statique est un système dont la défaillance ne dépend pas de l'ordre de défaillance de ses composants). Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini. Une telle représentation graphique met donc en évidence les relations de cause à effet.



*Figure 1.2 : L'arbre de défaillance. [11]*

## 1.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté les notions de défaillance, surveillance et supervision. Le diagnostic étant une étape importante du processus de supervision, une partie importante a été consacré aux méthodes de diagnostic. Dans le prochain chapitre, sera présentée l'une des méthodes déductive de diagnostic à savoir l'arbre de défaillance.

---

## *Chapitre 2*

---

### *L'ARBRE DE DEFAILLANCE*

---

---

## 2.1 INTRODUCTION

Dans le monde industriel d'aujourd'hui, les équipements sujets aux pannes et/ou détériorations sont nombreux. Souvent critiques, ces équipements doivent être maintenus afin de continuer à remplir les missions pour lesquelles ils ont été conçus. Les chercheurs dans le domaine de la maintenance, ne cessent de développer des moyens d'anticipation, ce qui les a amenés à utiliser toutes les techniques, y compris celles de l'intelligence artificielle, afin de fiabiliser les diagnostics, comme la technique de l'arbre de défaillance probabilisé et les réseaux bayésiens.

Dans ce chapitre, en premier lieu sera abordée la méthode de l'arbre de défaillance, sa démarche, sa construction ainsi que son aspect quantitatif probabiliste. Ensuite, un rappel sur les différentes méthodes pour le calcul des probabilités sera donné. En vue de sélectionner un outil pour l'analyse déductive en diagnostic machine, un aperçu sur les techniques d'intelligence artificielle est donné. Une approche par réseaux bayésiens a été adoptée vue leur rôle intéressant dans l'analyse probabiliste. A la fin, on aborde la représentation du réseau bayésien à travers la conversion de l'arbre de défaillance et cela pour avoir une bonne précision et améliorer la qualité de l'activité du diagnostic.

## 2.1 ARBRE DE DEFAILLANCE

L'analyse par l'arbre de défaillance a été conçue pour la première fois en 1961. Il a été inventé par H.A. Watson (Bell Laboratories), avec l'aide de M. A. Mearns, pour aider à la conception d'un nouveau système d'arme des forces aériennes américaines. David Haasl, de Boeing, a utilisé la nouvelle technique pour analyser l'ensemble du système. Il a été couronné de succès et, lors de la première Conférence sur la sécurité des systèmes en 1965, plusieurs documents sur l'AdD ont été présentés (Ericson, 1999) [15]

### 2.1.1 Définition et Objectives

#### *1°. Définition*

L'AdD est une technique d'analyse déductive qui utilise un modèle graphique avec une structure logique (l'arbre) pour représenter des événements conduisant à un certain résultat indésirable (défaillance du système). Il fonctionne en considérant d'abord un événement indésirable, comme une défaillance du système, et en le plaçant au sommet de l'arbre. C'est ce que l'on appelle l'événement «top» ou «l'événement indésirable». L'AdD travaille alors en arrière pour déterminer les causes de l'événement supérieur en termes de combinaisons logiques d'événements de défaillance de base (les événements basiques de l'arbre). [16]

## 2\*. Objectives de l'AdD

L'objectif de l'AdD est d'obtenir des informations pour aider à la prise de décisions, il est utile de décrire brièvement quelques-unes des façons dont ajouter le fait. L'AdD est un outil polyvalent, et les informations qu'il obtient sont utiles pour une variété de tâches.

L'analyse des arbres de défaillance a des objectifs dans la prise de décision, énumérés ci-dessous :

- Comprendre la logique qui mène à l'événement supérieur,
- Empêcher l'événement le plus important car il s'agit d'un outil pro-actif,
- Suivre les performances du système,
- Minimiser et optimiser les ressources de danger,
- Aider à la conception du système,
- Identifier et corriger les causes de l'événement supérieur car il s'agit d'un outil de diagnostic. [17]

### 2.2.2 Etapes de la mise en œuvre de l'AdD

Une analyse d'arbre de défaillance (AdD) réussie exige la mise en œuvre des étapes suivantes :

- ✓ Identification de l'objectif de l'analyse AdD.
- ✓ Définition de l'événement principal de l'arbre de défaillance.
- ✓ Définition du domaine ou l'étendue de l'analyse AdD.
- ✓ Définition de la résolution de l'analyse AdD.
- ✓ Définition des règles de base de l'AdD.
- ✓ Construire l'arbre de défaillance AdD.
- ✓ Evaluation de l'arbre de défaillance AdD.
- ✓ Interprétation et présentation des résultats.

Les cinq premières étapes concernent la formulation de problème d'une analyse d'arbre de défaillance, le reste des étapes concerne la construction actuelle de l'arbre de défaillance et l'interprétation des résultats de l'arbre de défaillance. Bien que la plupart des étapes soient exécutées d'une manière séquentielle, les étapes 3 à 5 peuvent être réalisées en parallèle, les étapes 4 et 5 sont souvent modifiées durant les étapes 6 et 7. La corrélation des huit étapes est représentée dans la

Figure 2.1. [22]

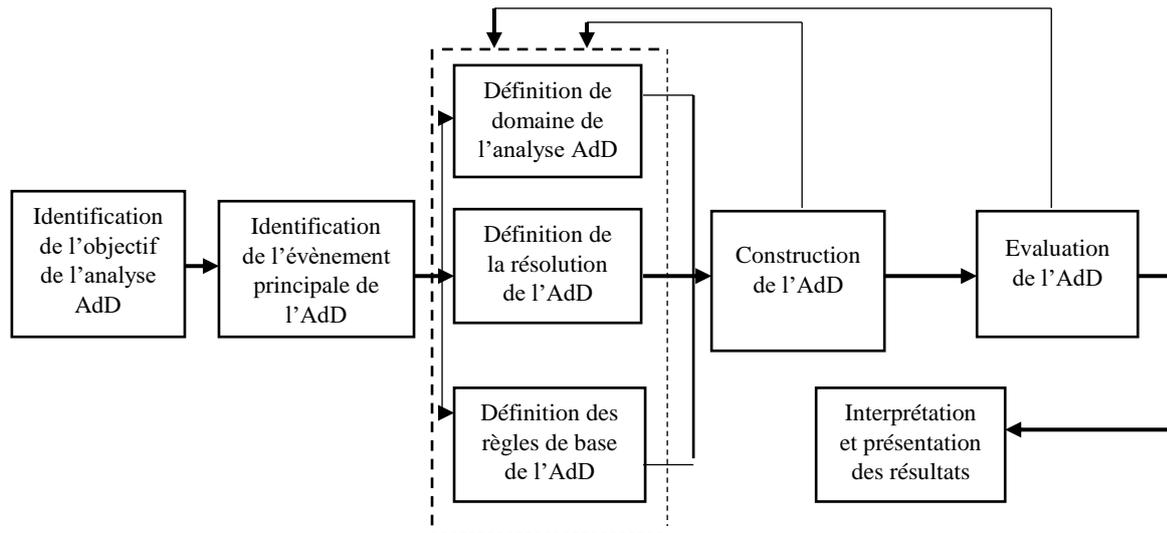


Figure 2.1 : Les étapes d'analyse de l'AdD [18]

### 2.2.3 Représentation graphique de l'AdD

La représentation graphique de l'arbre de défaillance se fait à l'aide de symbolisation graphique classée en : [17]

- Evènements
- Portes logiques
- Symboles de transfert

#### 1°. Evènements

Le but de symbolisation graphique des évènements est de faciliter la désignation entre les différents types d'évènements (Tab. 2.1)

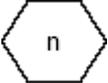
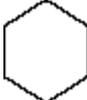
Tab. 2.1 : Symboles des évènements dans l'AdD

Symbole	Désignation
	<b>Evènement Intermédiaire ou final</b> : Evènement du plus haut niveau : sommet d'arbre « évènement redouté », ou évènement intermédiaire résultant d'un évènement redouté.
	<b>Evènement de base</b> : une défaillance de base de lancement qui ne nécessite aucun développement ultérieur.
	<b>Evènement de condition</b> : conditions et restrictions qui sont appliquées sur n'importe quelle porte logique.
	<b>Evènement non développé</b> : un évènement qui n'est pas encore développé à cause de manque d'informations.
	<b>Evènement maison</b> : un évènement qui est normalement prévu de se produire.

### 2°. Portes logiques

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU (Tab. 2.2)

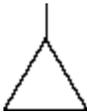
Tab. 2.2 : Symboles des portes logiques dans l'AdD

Symbole	Désignation
	<b>Porte ET</b> : la défaillance de sortie se produira si toutes les défaillances d'entrée se produisent.
	<b>Porte OU</b> : la défaillance de sortie se produira si une des défaillances d'entrée se produit.
	<b>Porte Combinaison</b> : la défaillance de sortie se produira si n défaillances d'entrée se produisent.
	<b>Porte OU EXCLUSIF</b> : un cas spécial de la porte logique OU, elle a généralement, deux entrées, la défaillance de sortie se produira seulement si une des entrées se produit et pas les deux en même temps.
	<b>Porte Priorité ET</b> : la défaillance de sortie se produira si toutes les défaillances d'entrée se produisent dans un ordre spécifique (l'ordre est représenté par un évènement de condition dessiné à droite de la porte).
	<b>Porte INHIBER</b> : la défaillance de sortie se produira si la défaillance unique d'entrée se produit à la présence d'une condition de d'autorisation (la condition d'autorisation est représentée par un évènement de condition dessiné à droite de la porte).

### 3°. Symboles de transfert

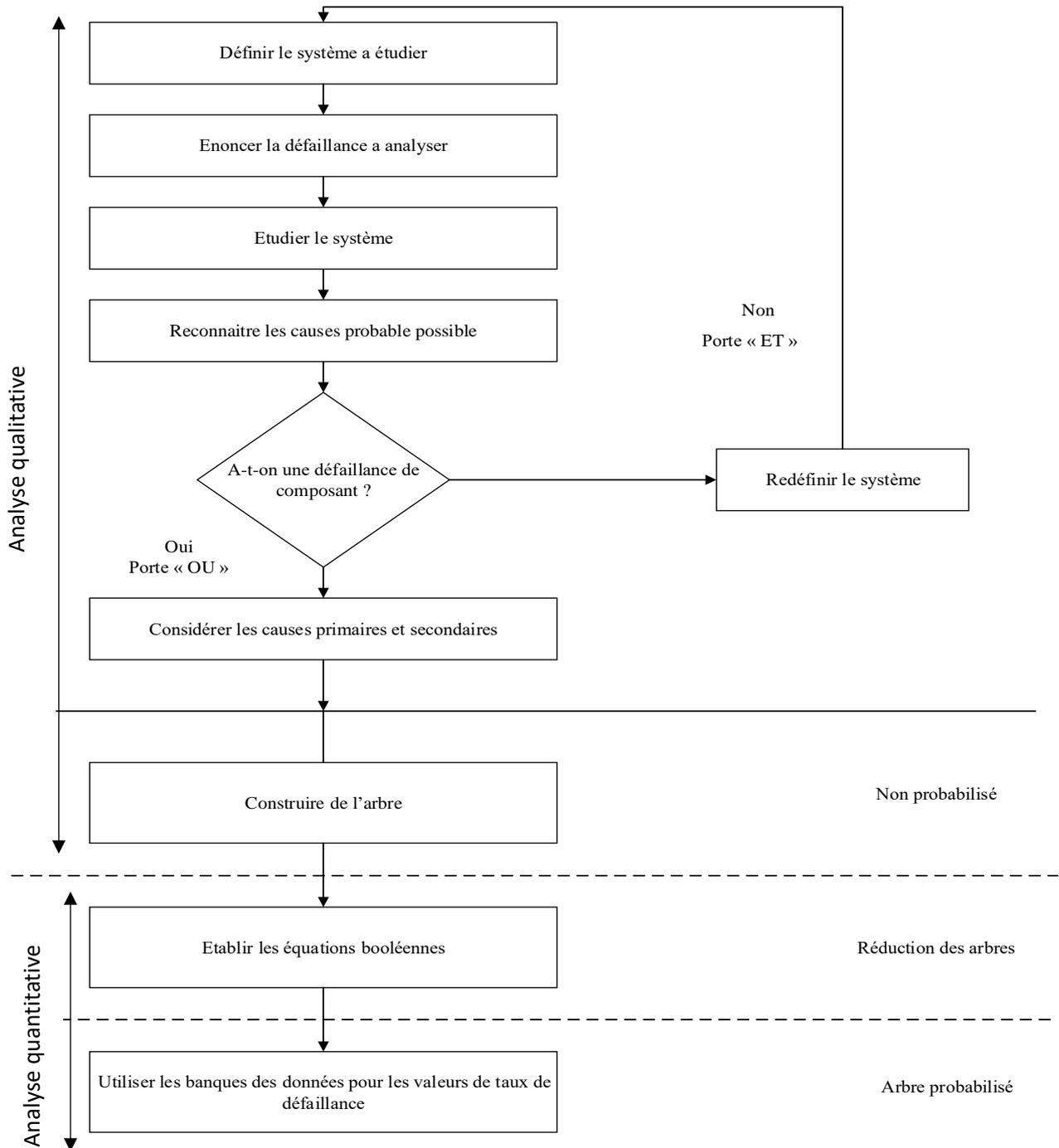
Il existe pour les arbres de défaillances une symbolisation normalisée qui permet de faire référence à des parties de l'arbre qui se répètent de manière *identique\** ou de manière *semblable+* pour éviter de les redéfinir. L'objectif est de réduire la taille du graphique

Tab. 2.3 : Symboles de transfert sous l'AdD

Symbole	Désignation
	<b>Transfert in</b> : indique que l'arbre est développé ultérieurement à l'occurrence de symbole de transfert outcorrespondant.
	<b>Transfert out</b> : indique que cette portion de l'arbre doit être attachée au transfert in correspondant.

**2.2.4 Démarche et construction de l'AdD [19]**

L'analyse de l'AdD est une analyse déductive qui demande une grande connaissance des divers modes de dégradation des systèmes. On part de la défaillance présumée des systèmes et on recherche toutes les causes ou agencement (combinaison) de causes qui peuvent conduire à cette défaillance. Pour faire cette analyse il doit passer par une méthodologie précisée et plus claire, la démarche ci-dessus montre les étapes essentielles de construction de l'AdD.



*Figure 2.2 : Démarche de l'AdD*

### **1°. Définir le système à étudier**

- Définir le système et ses limites matérielles. Le système peut être une entité technique complète mais ce sera plus souvent un sous-ensemble présentant un risque particulier. La documentation technique complète doit être réunie.
- Décomposition du système il s'agit d'une décomposition physique du système. Les critères généralement utilisés sont les suivants :
  - Critère de technologie.
  - Critère de maintenance.
  - Critère de donnée sur l'étude réalisé.
- Identification des composants il s'agit d'identifier tous les dispositifs représentés au dernier niveau de résolution du système. Dans le cadre de notre analyse, nous les appelons "composants".

### **2°. Énoncer la défaillance à analyser**

Définition des modes de défaillance des composants : pour chaque composant, les modes de défaillance possibles doivent être définis, c'est-à-dire les différentes manières manifestées par la défaillance.

### **3°. Etudier le système**

La reconstitution du système à travers les composants : il faut reconstituer le système en mode fonctionnel en remontant les niveaux de décomposition.

### **4°. Reconnaître les causes probables possibles**

Rechercher les causes possibles de défaillance, pour chaque mode identifié. La recherche des causes peut être réalisée à l'aide de la **méthode des 5 M** et représentée sous forme de diagramme d'Ichikawa. Il faut collecter et organiser en familles les causes possibles et considérer les causes primaires et secondaires.

### **5°. Construction de l'AdD [19]**

#### **a. Etapes de construction**

- **Événement redouté**

L'événement redouté est l'événement indésirable pour lequel nous faisons l'étude de toutes les causes qui y conduisent. Cet événement est unique pour un arbre de défaillances et se trouve au "sommet" de l'arbre.

Avant de commencer la décomposition qui permet d'explorer toutes les combinaisons d'événements conduisant à l'événement redouté, il faut définir avec précision cet événement ainsi que le contexte de son apparition. L'événement redouté est représenté par un rectangle au sommet de l'arbre.

- **Événements intermédiaires**

Les événements intermédiaires sont des événements à définir comme l'événement redouté. La différence avec l'événement redouté est qu'ils sont des causes pour d'autres événements. Par exemple c'est la combinaison d'événements intermédiaires qui conduit l'événement redouté. Un événement intermédiaire est représenté par un rectangle comme l'événement redouté.

- **Événements élémentaires**

Les événements élémentaires sont des événements correspondants au niveau le plus détaillé de l'analyse du système. Dans un arbre de défaillances, ils représentent les défaillances des composants qui constituent le système étudié. Pour fixer le niveau de détail de notre étude, nous considérons en général que les événements élémentaires coïncident avec la défaillance des composants qui sont réparables ou interchangeable. Les événements élémentaires sont représentés par des cercles.

*b. Les règles de construction*

- Expliciter les faits et noter comment et quand ils se produisent :
  - pour l'événement redouté,
  - pour les événements intermédiaires.
- Effectuer un classement des événements :
  - événement élémentaire représentant la défaillance d'un composant :
    - Défaillance première
    - Défaillance de commande.
  - événements intermédiaires provenant d'une défaillance de composant,
  - événements intermédiaires provenant du système indépendamment du composant
- Rechercher les "causes immédiates" de l'apparition de chaque événement intermédiaire afin d'éviter l'oubli d'une branche.
- Éviter les connexions directes entre portes car elles sont en général dues à une mauvaise compréhension du système ou une analyse trop superficielle.
- Supprimer les incohérences comme par exemple : un événement qui est à la fois cause et conséquence d'un autre événement.

### 2.2.5 Analyses qualitatives de l'Add

L'analyse qualitative d'un système (ou analyse fonctionnelle) est l'étude systématique la plus complète possible des défaillances éventuelles de ce système et de leurs conséquences sur ses missions, dans toutes les configurations de fonctionnement envisageables. [14]. L'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés :

#### 1°. L'identification

L'identification des scénarios critiques susceptibles de conduire à l'évènement redouté. Par l'analyse des différentes combinaisons de défaillances menant à l'évènement sommet, l'objectif est ici d'identifier les combinaisons les plus courtes appelées coupes minimales.

#### ➤ Coupe minimale

Une coupe est un ensemble d'évènements entraînant l'évènement indésirable. Une coupe minimale est la plus petite combinaison d'évènements entraînant l'évènement indésirable. Ainsi, par définition, si un des évènements d'une coupe minimale ne se produit pas, l'évènement indésirable ne se réalise pas. C'est une coupe qui ne contient aucune autre coupe.

La recherche des coupes minimales se fait à partir d'une transformation de l'arbre de défaillances en une expression booléenne avec l'utilisation de l'algèbre de Boole. Cette algèbre est appliquée à l'arbre de défaillances de la manière suivante :

- à chaque évènement de base est associée une variable booléenne,
- on associe à l'évènement de sortie d'une porte ET une variable booléenne égale au produit booléen des variables booléennes des évènements d'entrée.
- on associe à l'évènement de sortie d'une porte OU une variable booléenne égale à la somme booléenne des variables booléennes des évènements d'entrée.

On obtient ainsi l'expression booléenne de l'évènement indésirable F sous la forme :

$$F = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.1)$$

Où  $C_i$  est le produit de  $m_i$  évènements de base :

$$C_i = B_i^1 * B_i^2 * \dots * B_i^{m_i} = \prod_{j=1}^{m_i} B_i^j \quad (2.2)$$

Si l'expression de F est réduite, alors les évènements sont les coupes minimales. La coupe est dite d'ordre  $m_i$ . La recherche de l'expression réduite peut se faire selon divers algorithmes classiques (tableau de Karnaugh,...).

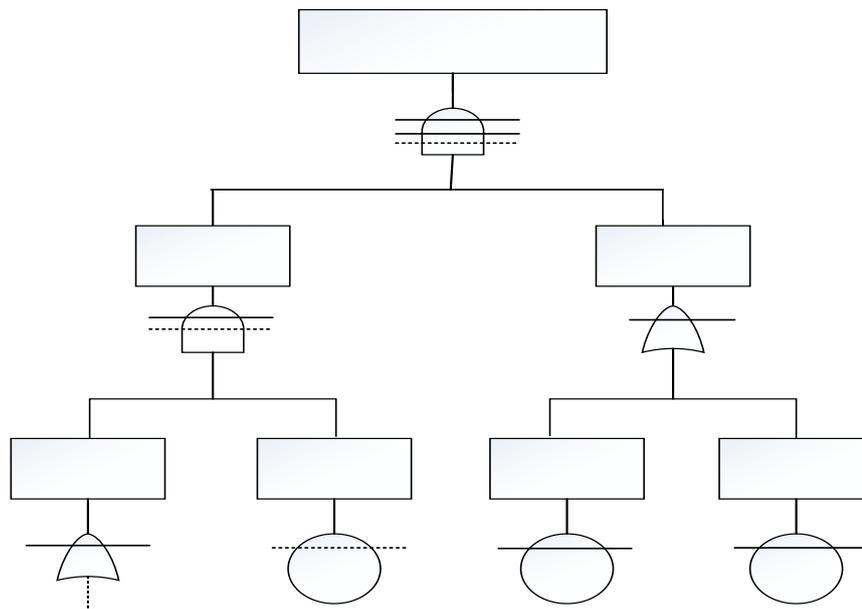
## 2°. La mise en œuvre

La mise en œuvre d'une procédure d'allocation de barrières. Ce deuxième type d'exploitation qualitatif permet d'allouer un certain nombre de barrières de sécurité (technique ou d'utilisation) en fonction de la gravité de l'évènement redouté et des contraintes normatives éventuelles.

### ➤ *Technique des barrières [20]*

La technique des barrières est une méthode spécifiquement employée lors de l'exploitation qualitative des arbres de défaillance. Elle est principalement utilisée lorsque les données probabilistes des événements de base ne sont pas connues ou difficilement estimables. Elle a été définie et formalisée pour des études de sûreté, principalement dans le domaine du nucléaire, afin de démontrer que la maîtrise du risque est effective.

Une barrière est une protection censée prévenir l'occurrence de l'évènement redouté. Il existe deux types de barrières : les barrières techniques (disjoncteur, alarme, ...) et les barrières d'utilisation (procédures de maintenance, d'exploitation, consignes de sécurité, formation des opérateurs, ...). Les barrières techniques sont en général préférées aux barrières d'utilisation, car elles garantissent *a priori* une meilleure prévention, notamment dans la durée.



*Figure 2.3 : Exemple d'utilisation de la technique des barrières [20]*

L'exemple de la **Figure 2.3** est une représentation de la technique des barrières avec 3 barrières (2 barrières techniques *en trait plein* et 1 barrière d'utilisation *en pointillé*). Cette technique qualitative ne s'applique que sur des arbres de défaillance cohérents, issus en général d'une analyse manuelle.

### 2.2.6 Analyse quantitative de l'AdD

Cette analyse consiste à déterminer une évaluation probabiliste de l'arbre des défaillances, en calculant la probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable à partir des probabilités d'occurrence

des événements de base supposées connues, et ceci dépend du système s'il est réparable ou non.

[14]

### 1°. Porte ET

Soient A et B deux événements de base liés par une porte logique ET, et conduisant à un événement indésirable E (Figure 2.4). Si A et B sont indépendants, on obtient :

$$P(E) = P(A) * P(B) \quad (2.3)$$

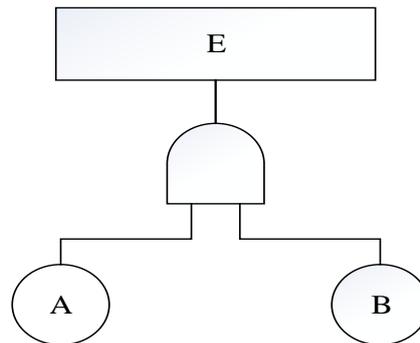


Figure 2.4 : Porte ET

### 2°. Porte OU

Soient A et B deux événements de base liés par une porte logique OU, et conduisant à un événement indésirable E (Figure 2.5). Si A et B sont indépendants, on obtient :

$$P(E) = P(A) + P(B) - P(A) * P(B) \quad (2.4)$$

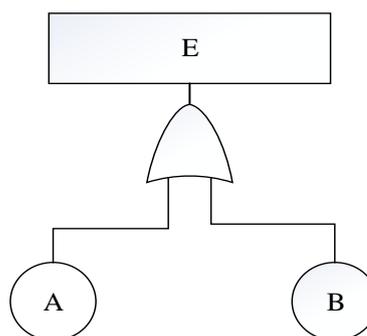


Figure 2.5 : Porte OU

### 2.3 METHODES DE CALCUL DE PROBABILITE

Dans le calcul des probabilités, on distingue deux méthodes de calcul : les méthodes directes et les méthodes indirectes. [21] [22]

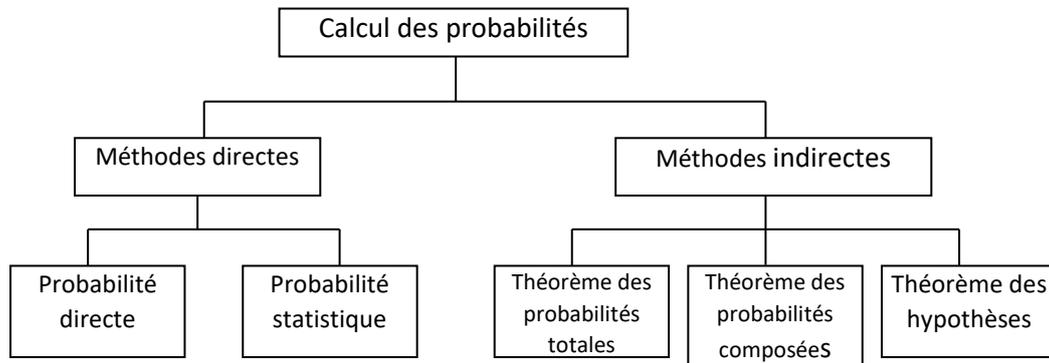


Figure 2.6 : Méthodes de calcul de probabilité

#### 2.3.1 Probabilité directe

Soit donné :

**E** : un événement aléatoire ;

**F** : le nombre des cas favorables de l'événement A, tirés parmi les cas possibles ;

**N** : le nombre de tous les cas possibles

##### Définition

Si une expérience se réduit à un système de cas, la probabilité de l'événement **E** dans cette expérience peut être estimée comme la proportion des cas favorables. On définit la probabilité  $P(E)$  de l'événement **E** comme le rapport du nombre **F** de cas favorables au nombre **N** de tous les cas possibles

$$P(E) = F/N \quad (2.5)$$

#### 2.3.2 Probabilité statique

##### Définition

Soit donné :

- **E** : Un événement aléatoire
- Une série de **N** d'expériences au cours de laquelle l'événement **E** peut ou ne peut pas apparaître
- **F** : le nombre des expériences de l'apparition de l'événement **E** dans les **N** expériences
- **N** : Nombre total des expériences.

"Si une expérience menée **N** fois ne peut pas se réduire à un ensemble de cas, la probabilité statistique de l'événement **E** dans cette expérience peut être estimé comme le rapport du nombre **F** des expériences où **E** est apparu, au nombre total **N** des expériences effectuées".

$$P^*(E) = F/N \quad (2.6)$$

### 2.3.3 Probabilité totale

#### *Théorème*

La probabilité de la somme de deux événements  $E_1$  et  $E_2$  incompatibles est égale à la somme des probabilités des deux événements en question.

$$P(E_1 + E_2) = P(E_1) + P(E_2) \quad (2.7)$$

D'une manière générale :

$$P\left(\sum_{i=1}^N E_i\right) = \sum_{i=1}^N P(E_i) \quad (2.8)$$

### 2.3.4 Probabilité conditionnelle

**Événements indépendants** : On dit qu'un événement  $E_1$  est "*indépendant*" de l'événement  $E_2$ , si la probabilité de  $E_1$  ne dépend pas de celle de  $E_2$ .

**Événements dépendants** : On dit qu'un événement  $E_1$  est "*dépendant*" de l'événement  $E_2$ , si la probabilité de  $E_1$  change selon la probabilité de  $E_2$ .

On appelle "*probabilité conditionnelle*" de l'événement  $E_1$  relativement à l'événement  $E_2$  et noté :  $P(E_1|E_2)$  la probabilité de l'événement  $E_1$  calculée sous condition que l'événement  $E_2$  s'est réalisé.

- Si  $E_1$  est indépendant de  $E_2$  :  $P(E_1|E_2) = P(E_1)$
- Si  $E_1$  est dépendant de  $E_2$  :  $P(E_1|E_2) \neq P(E_1)$

### 2.3.5 Probabilité composée

La probabilité du produit de deux événements est égale au produit de la probabilité de l'un deux multipliée par la probabilité conditionnelle de l'autre, calculée sous condition que le premier ait lieu.

$$P(E_1 \cdot E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2|E_1) \quad (2.9)$$

### 2.3.6 Formule des probabilités totales

Cette formule est un corollaire des deux théorèmes fondamentaux c'est-à-dire théorème des probabilités totales et du théorème des probabilités composées. Soit :

- E un événement aléatoire
- $\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$  : un ensemble d'hypothèses formant un système complet d'événements incompatibles et ayant lieu simultanément avec l'événement E.

La probabilité de l'événement E se calcule comme la somme des produits de la probabilité de chacune des hypothèses par la probabilité de l'événement conditionnel à cette hypothèse.

$$P(E) = \sum_{i=1}^N P(H_i) \cdot P(E|H_i) \quad (2.10)$$

### 2.3.7 Formule de BAYES

Le théorème des hypothèses ou formule de Bayes, est un corollaire du théorème des probabilités totales et de la formule des probabilités totales conditionnelles.

$$P(H_i|E) = \frac{P(H_i) \cdot P(E|H_i)}{\sum_{i=1}^N [P(H_i) \cdot P(E|H_i)]} \quad (2.11)$$

## 2.4 LES TECHNIQUES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Depuis la découverte des ordinateurs, plusieurs chercheurs ont essayé de donner une notion d'intelligence aux programmes informatiques. Cela mène à l'émergence d'un nouveau concept appelé *intelligence artificielle (IA)*. Au début, plusieurs critiques ont été posées concernant l'intelligence artificielle, ensuite et avec le temps, l'IA s'est investie dans nombreux domaines où l'informatique classique n'est pas applicable. [23], Voir [ANNEXE B1]

Dans ce contexte, pour l'obtention de meilleurs rendements de la supervision, les spécialistes développent, en vue de la surveillance et du diagnostic des défaillances, par les différentes communautés de recherche en automatique, productique, et informatique, les techniques de l'intelligence artificielle (IA). Dans ce qui suit, on représentera quelques techniques d'intelligence artificielle utilisées dans le domaine de diagnostic industriel.

### 2.4.1 Systèmes experts

« Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème » [ZWI95]

Les systèmes experts (SE) sont des systèmes informatiques résolvant des problèmes pour lesquelles on ne dispose pas de solution algorithmique (dans le cas où les solutions algorithmiques sont à éviter à cause de l'explosion combinatoire).

Les systèmes experts sont des systèmes basés sur les connaissances d'un expert humain. Par exemple un système expert de diagnostic des pannes d'une voiture possède une base de connaissances

contenant des règles pour le diagnostic et la détection des pannes de la même manière du raisonnement d'un mécanicien.

Donc, le système expert est un programme qui peut fournir une expertise pour la résolution d'un problème défini dans le même domaine de l'expertise originale.

Pour plus de détails voir [ANNEXE B2].

### 2.4.2 Réseaux neurones

L'interconnexion de plusieurs neurones entre eux forme ce qu'on appelle un réseau de neurone, c'est une combinaison des fonctions algébriques, où la sortie d'un neurone est l'entrée d'un autre. La représentation d'un réseau de neurone est généralement par un graphe orienté où les nœuds sont des neurones et les flèche représentent les connexions entre les neurones, dont une représentation graphique d'un réseau de neurones est illustrée sur la figure 2.8, voir [ANNEXE B3]

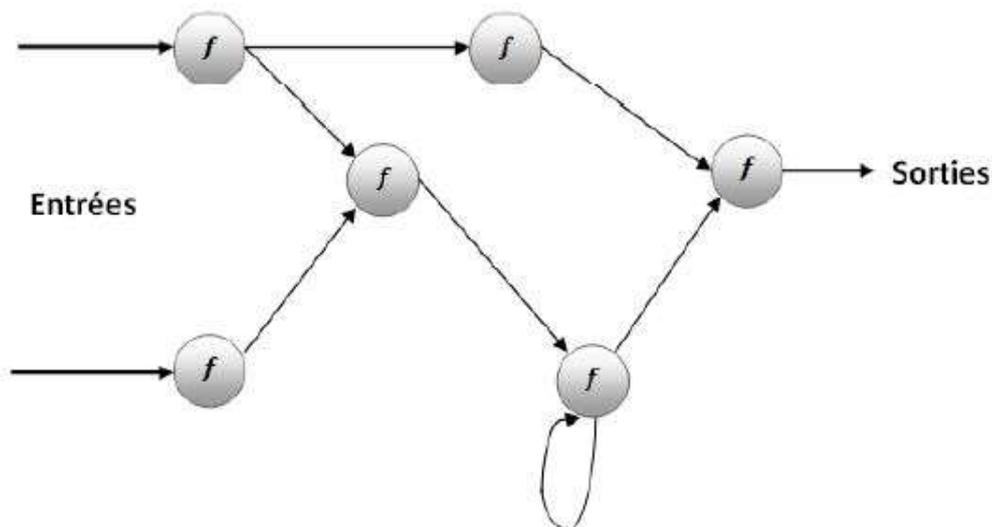


Figure 2.7 : Représentation graphiques d'un réseau de neurones artificiels [23]

### 2.4.3 Reconnaissance des formes

La reconnaissance des formes est un outil d'intelligence artificielle, qui a, entre autres, une capacité d'apprentissage. Elle permet l'interprétation de nouvelles observations (formes) à partir d'un ensemble de données ou d'informations regroupées en classes, où la nouvelle observation est comparée pour être identifiée. C'est-à-dire définir à quelle classe est rattachée une forme observée  $M$  parmi plusieurs classes  $W_1, W_2, \dots, W_n$  qui sont définies clairement a priori. Deux grandes familles des techniques de reconnaissance des formes sont connues, une technique qui ne prend en compte que des formes définies par des valeurs numériques, on appelle cette technique *la reconnaissance statistique*, et une seconde technique qui utilise des grammaires pour la représentation des formes,

c'est la technique de *reconnaissance structurelle*. Le diagnostic par reconnaissance de forme met en œuvre quatre étapes principales qui sont résumées sur la figure 2.8

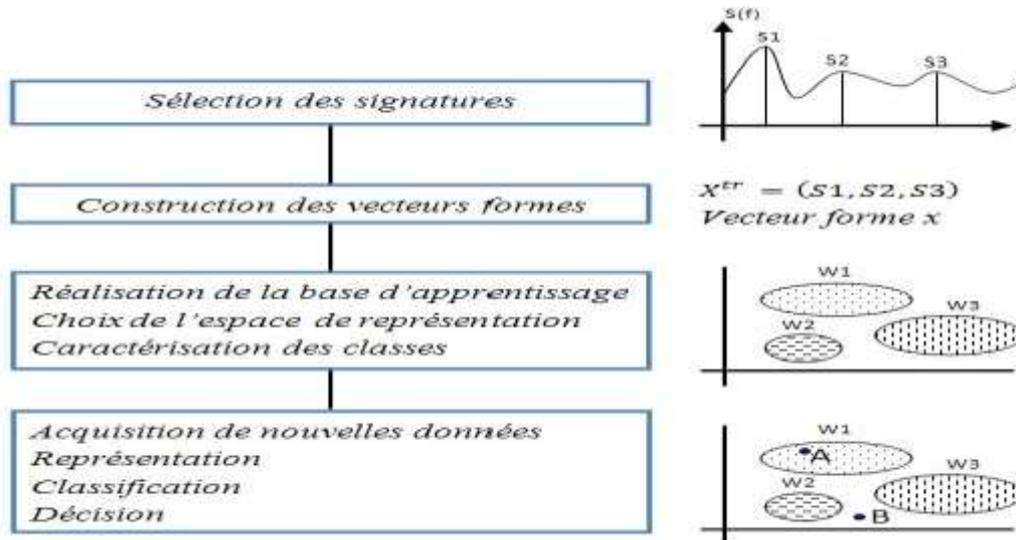


Figure 2.8 : Étapes de diagnostic par reconnaissance des formes [23]

#### 2.4.4 Réseaux de Petri

Parmi les formalismes utilisables pour décrire les systèmes à événements discrets, les réseaux de Petri jouent un rôle important car ils sont capables de modéliser des propriétés telles que synchronisation, parallélisme, conflits, mutuelle exclusion et partage de ressources.

Les réseaux de Petri (RdP) constituent, depuis leur introduction en 1964 par Carl Adam Petri, un puissant outil graphique de représentation des phénomènes et mécanismes séquentiels, de modélisation des systèmes à événements discrets. Les modèles obtenus, outre l'expression graphique de la structure des systèmes, permettent une analyse de leurs propriétés. [24] [25]. Voir [ANNEXE B4].

#### 2.4.5 L'approche Bayésiennes [26]

Pour étudier et améliorer l'état des systèmes techniques en étant le plus proche de la réalité, il est nécessaire d'effectuer des inférences probabilistes à partir des données à priori (bases de donnée, retour d'expérience ...). Cependant, pour des systèmes de l'industrie à des problèmes majeurs (tel que le nucléaire, l'aéronautique et les hydrocarbures...) où des composants de qualité de plus en plus fiables sont installés une analyse de disponibilité de haut niveau basée sur le retour d'expérience s'avère difficile. Une difficulté qui réside dans la limite des méthodes classiques pour l'évaluation du comportement du système vis-à-vis l'influence de chaque composant dans son bon fonctionnement ou dysfonctionnement. Une difficulté aussi dans la prise de décision nécessaire au temps opportun pour que le système préserve une fiabilité très élevée.

Une alternance à la limite des méthodes classiques est l'approche bayésienne, Ceci en terme d'aide à la décision en temps réel relatif assurant un haut niveau de fiabilité des systèmes en prenant en considération les mise-à-jour des données (retour d'expérience, avis d'expert, les données de maintenance...). L'utilisation de l'approche s'avère plus appropriée, puisqu'elle permet d'avoir le maximum d'information sur le système en prenant en considération tous les données des composants dans leurs différents états (fonctionnements, en standbys, défaillants ou bien en phase de maintenance) soit par mise-à-jour des données soit par inférence sur le réseau bayésien.

## 2.5 RESEAUX BAYESIENS

La représentation des connaissances et le raisonnement a donné naissance à de nombreux modèles. Les modèles graphiques probabilistes, et plus précisément les réseaux bayésiens, qui doivent leur nom aux travaux de Thomas Bayes au XVIIIe siècle sur la théorie des probabilités, les réseaux bayésiens sont initiés par Judea Pearl dans les années 1980, se sont révélés des outils très pratiques pour la représentation de connaissances incertaines, et le raisonnement à partir d'informations incomplètes.

### 2.5.1 Théorème de Bayes

Le théorème de Bayes permet de fusionner deux types d'information : la connaissance initiale, dite a priori, obtenu à partir du jugement d'experts ou le retour d'expérience, et la vraisemblance qui représente les observations du retour d'expérience pour obtenir une connaissance enrichie, dont l'incertitude est plus faible : La probabilité a posteriori représentant ainsi la nouvelle connaissance pour l'expert. Notons que le résultat a posteriori peut devenir l'information a priori si de nouvelles informations issues du retour d'expérience sont disponibles. Ceci représente le principe d'actualisation dynamique des connaissances utilisé particulièrement pour les bases de données.

Pour une Analyse Quantitative, l'application du théorème bayésienne consiste en l'application de l'inférence bayésienne représentée dans [la Figure 2.9](#). Le passage de la distribution a priori à la distribution a posteriori des paramètres du modèle probabiliste est exprimé par la formule de Bayes afin d'établir une aide à la décision, qui peut être par la suite interprétée comme une mise à jour de la connaissance, sur le réseau bayésien.

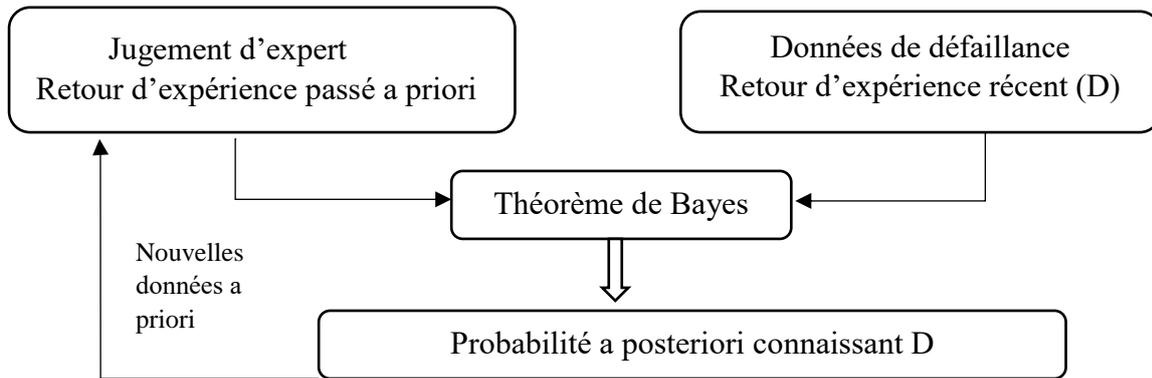


Figure 2.9 : Principe de l'approche Bayésienne [26]

➤ **Formule de Recomposition**

$$\forall A \in I, P(A) = \sum_i^N P(A \setminus B_i) \cdot P(B_i) \quad (2.11)$$

➤ **Formule de Bayes**

$$P(B_i \setminus A) = \frac{P(A \setminus B_i) \cdot P(B_i)}{\sum_j [P(A \setminus B_j) \cdot P(B_j)]} \quad (2.12)$$

La probabilité conditionnelle de réalisation d'un événement B sachant que l'événement A s'est produit, est proportionnelle à la probabilité (a priori) de B (probabilité avant que l'on observe A) multipliée par la probabilité d'observer A sachant B.

**A** : événement(s) observé(s),

**B** : événement étudié,

**P(A)** : probabilité a priori de réalisation de l'événement B,

**(A \setminus B)** : vraisemblance de l'occurrence de l'événement B sachant que A a été observé,

**(B \setminus A)** : probabilité a posteriori de réalisation de l'événement B sachant que A a été observé.

### 2.5.2 Définition des réseaux bayésiens

Un réseau bayésien est un graphe causal auquel on a associé une représentation probabiliste sous-jacente. Cette représentation permet de rendre quantitatifs les raisonnements sur les causalités que l'on peut faire à l'intérieur du graphe. Le graphe est appréhendé selon un aspect qualitatif et un aspect quantitatif.

L'aspect qualitatif du graphe indique les dépendances (ou indépendances) entre les variables et donne un outil visuel de représentation des connaissances, outil plus facilement appréhendable par ses utilisateurs. De plus, l'utilisation de probabilités permet de prendre en compte l'incertain, en quantifiant les dépendances entre les variables, c'est l'aspect quantitatif.



**2°. La partie qualitative du RB**

1. Chaque évènement de base de l'AdD est converti en un nœud racine (parent) dans le RB ;
2. Pour chaque nœud pivot 'feuille' du BN correspondant à un évènement sommet ou intermédiaire désigné par la porte logique dans l'AdD selon l'emplacement, en particulier la dernière porte logique et l'évènement sommet finale de AdD sera étiquetée en tant que nœud de défaillance ;
3. Les nœuds du RB doivent être connectés entre eux selon l'arrangement des portes logique de l'AdD.

Les Figures 2.11 et 2.12 montrent comment la structure d'un AdD simple est convertie RB.

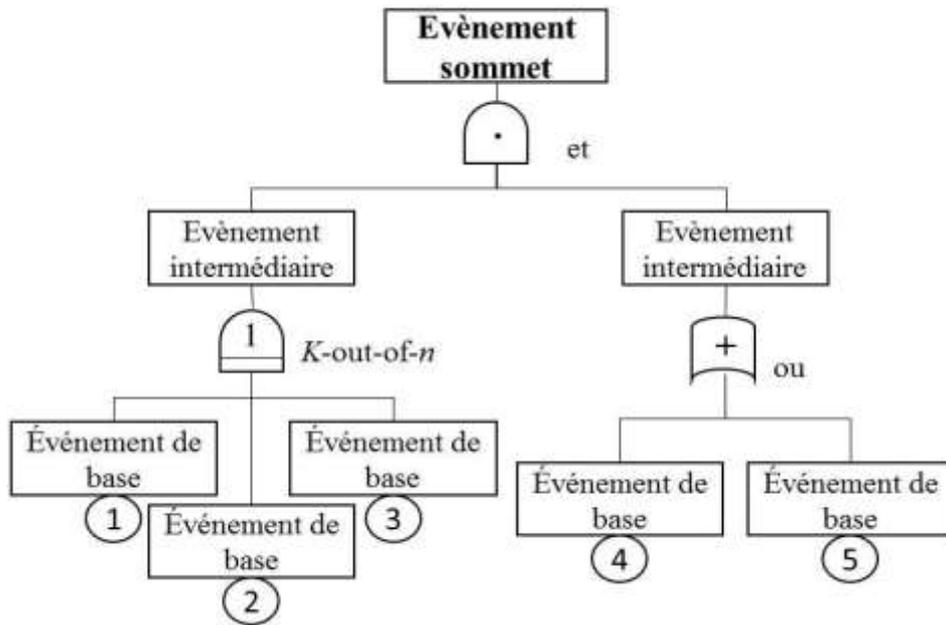


Figure 2.11 : Exemple de Structure d'AdD [26]

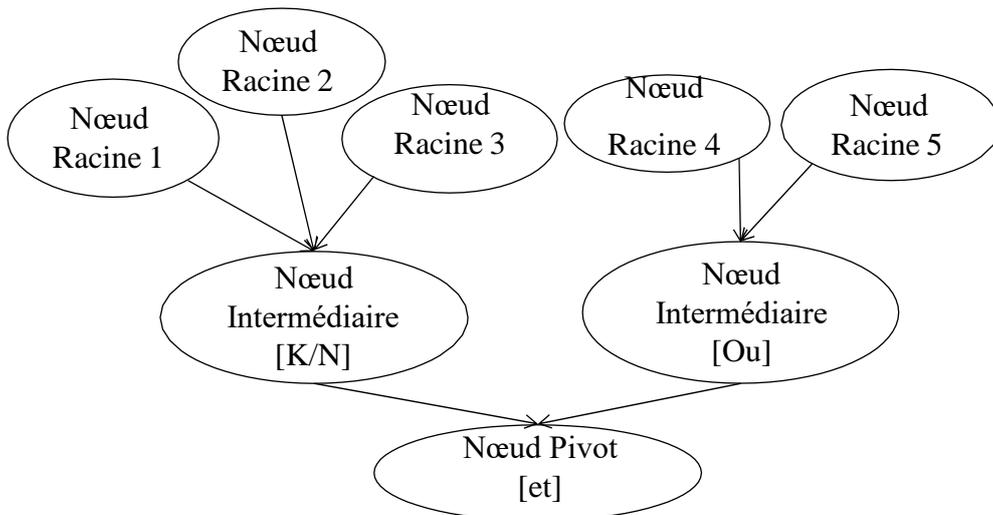


Figure 2.12 : Structure du réseau bayésien obtenu à parti de la Figure 2.11

### 3°. La partie quantitative (probabilité) du RB

1. Pour chaque nœud racine du RB la même probabilité antérieure de l'événement de base correspondant dans le AdD est attribuée ;
2. Chaque porte logique 'ou', 'et', 'k-sur-n', dans l'AdD correspond à une table de probabilité conditionnelle équivalente dans le RB.

Les **Tableaux 2.4 et 2.5** présentent les tables de probabilité conditionnelles des portes logique 'ou', 'et', 'k-sur-n' respectivement.

**Tab. 2.4 : TPC de la porte logique « Ou » [26]**

<i>Nœud Racine 1</i>	<i>Nœud Racine 2</i>	<i>P (Nœud Intermédiaire [Ou]=0)</i>	<i>P (Nœud Intermédiaire [Ou]=1)</i>
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1

**Tab. 2.5 : TPC de la porte logique « et » [26]**

<i>Nœud Intermédiaire [K/N]</i>	<i>Nœud Intermédiaire [Ou]</i>	<i>P (Nœud Pivot [Et]=0)</i>	<i>P (Nœud Pivot [Et]=1)</i>
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

### 4°. L'inférence sur le RB obtenue à partir de AdD

Dans l'étude d'indisponibilité l'événement sommet dans l'AdD correspond à la probabilité a priori du nœud désigné nœud de défaillance dans le RB (la probabilité a posteriori est obtenue à partir de l'inférence dans le réseau) et c'est la même procédure pour les événements intermédiaire (sous système). Dans un AdD, les calculs d'indisponibilité sont obtenus à partir des coupes minimales, par contre dans les RB ils peuvent être obtenus par le concept d'inférence bayésienne. La règle de mise à jour des probabilités est donnée par la forme  $P(A|B)$  :

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (2.13)$$

$P(A)$  : probabilité a priori,

$P(B|A)$  : la probabilité que B se produise lorsque A est vraie,

A représente la défaillance (ou bien les variables du sous-système) et l'évidence est l'ensemble vide,  $B = \emptyset$ .

La probabilité à posteriori peut également être calculée dans un RB, en prenant en considération un seul composant, un sous-ensemble de composants (sous-système) ou pour tous les composants, à l'exception de ceux auxquels des évidences ont été attribuées.

Quand la défaillance est donnée comme évidence, la probabilité a posteriori de chaque composant est une information de la criticité de chacun des composants et la probabilité posteriori d'un sous-système est une information de la criticité du sous-système qui est l'origine de la défaillance du système.

## 2.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté la technique de l'arbre de défaillance (AdD) comme un outil de diagnostic des défaillances dans l'industrie, puis on a aperçu leur démarche et construction dans le cadre qualitative et quantitative (probabilisé), Puis, on a présenté quelques notions de calcul de probabilité qui est en relation direct avec notre technique.

Ensuite, on a abordé l'outil de l'intelligence artificielle utilisé dans le domaine de diagnostic, et leurs différentes méthodes, l'une de ces méthodes c'est l'approche bayésienne qui est présenté aussi dans ce chapitre, et leur construction et conversion par l'AdD, pour obtenir des meilleurs analyse et aide de décision.

.

---

# *Chapitre 3*

---

*Etude de cas : Compresseur BCL 406*

---

---

### 3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, comme étude de cas on a choisi le compresseur centrifuge BCL 406. Ce dernier a fera l'objet d'une identification et d'une description technologique. Pour les besoins de l'étude on considérera son historique sur une période déterminée, Ensuite, on mettra en œuvre la méthode de l'arbre de défaillance afin de diagnostic ces modes de défaillance, Puis, on utilisera le réseau bayésien pour améliorer la quantification des probabilités d'occurrences des défaillances et la qualité de diagnostic.

### 3.2 GENERALITES SUR LES COMPRESSEURS

#### 3.2.1 Définition

Un compresseur est une machine tournante destiné à augmenter par un procédé uniquement mécanique la pression d'un gaz. Pour exercer la même fonction sur un liquide, incompressible, on utilise une pompe.

Les fluides traversant les compresseurs peuvent être de nature diverse :

- Gaz pur.
- Mélange gazeux.
- Vapeur surchauffée ou saturée.

Pour obtenir un accroissement de pression des fluides il y a eu recours à l'une des deux méthodes suivantes :

- La première, de beaucoup la plus importante en quantité, l'élévation de pression est obtenue en réduisant un certain volume de gaz par action mécanique.
- Tandis que la seconde, la pression est élevée en convertissant, de façon continue, l'énergie cinétique communiquée au gaz en énergie de pression.

#### 3.2.2 Types des compresseurs

Les compresseurs peuvent être classés selon plusieurs paramètres :

- Principe de fonctionnement (volumétriques, dynamiques).
- Mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif).
- Les compresseurs d'air.
- Les compresseurs des gaz.

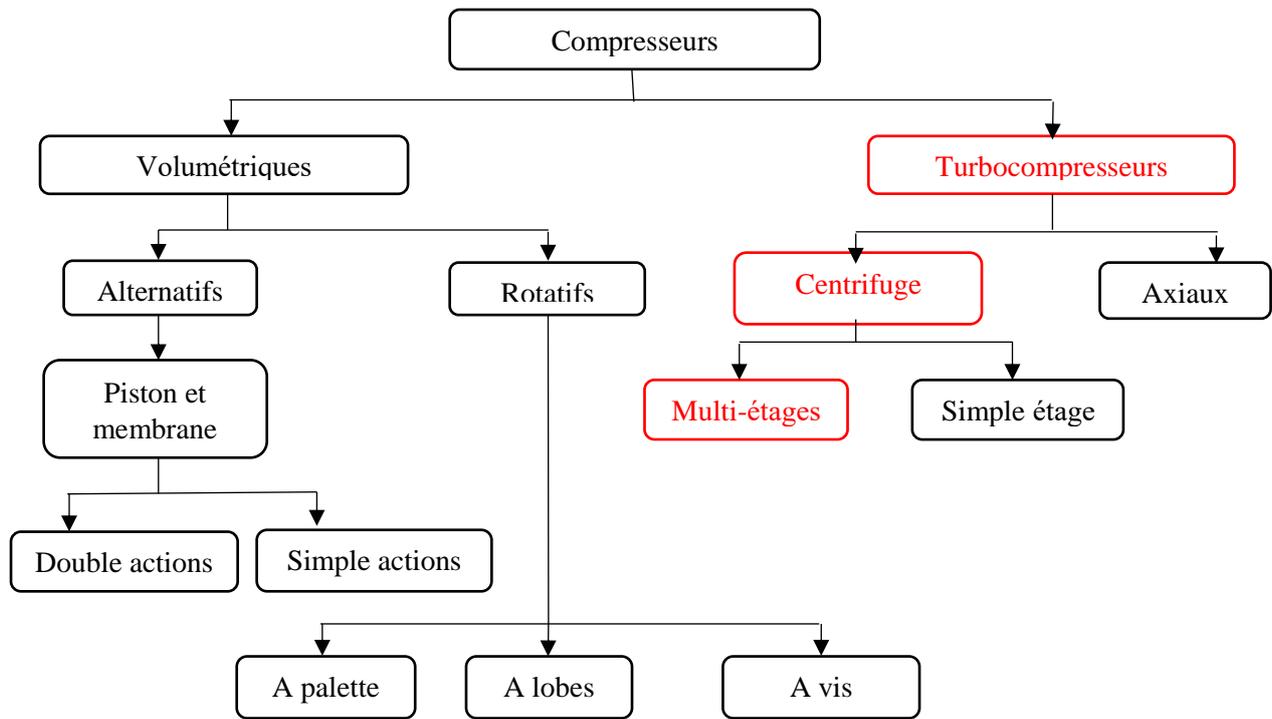


Figure 3.1 : Les principales catégories de compresseurs. [29]

### 3.2.3 Buts de compression

La compression en générale, peut être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz d'un système à une certaine pression donnée, vers un autre système à une autre pression plus élevée. Cette opération a pour but [29] :

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe-line de la zone de production vers l'utilisateur.
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.
- Récupérer du gaz (unités de G.N.L ou autres).

### 3.2.4 Domaines d'application et critères de choix des compresseurs

Les applications des compresseurs sont très diversifiées, on donne quelques exemples d'utilisation de ces machines : [28]

- Production d'air comprimé ou gaz comprimé (air ou gaz instrument nettoyage de pièces, etc...).
- Compression et déplacement des gaz procédés.
- Transport des matières pulvérulentes (transport pneumatiques des poudres).
- Réalisation de vide et de dépression (cristallisation sous vide, distillation, évaporation, etc...).

- Asservissement des locaux (ventilation, climatisation, etc....).
- Réinjection du gaz vers les puits.

Les critères de choix de compresseur dépendent des paramètres suivants : [28]

- Qualité du gaz ;
- Propreté du gaz ;
- Nocivité du gaz ;
- Débit de gaz ;
- Pression (taux de compression).

### 3.3 LE COMPRESSEUR CENTRIFUGE BCL 406

Le compresseur centrifuge **BCL406** est une machine "dynamique" à écoulement continu de fluide. Des roues solidaires à l'arbre fournissent de l'énergie à ce dernier. Une partie de cette énergie est transformée en augmentation de pression directement dans les roues, le reste dans le stator, c'est-à-dire dans le diffuseur.

#### 3.3.1 Identification

Les compresseurs centrifuges NUOVO PIGNONE sont indiqués par une série des lettres majuscules et de numéros. [28]

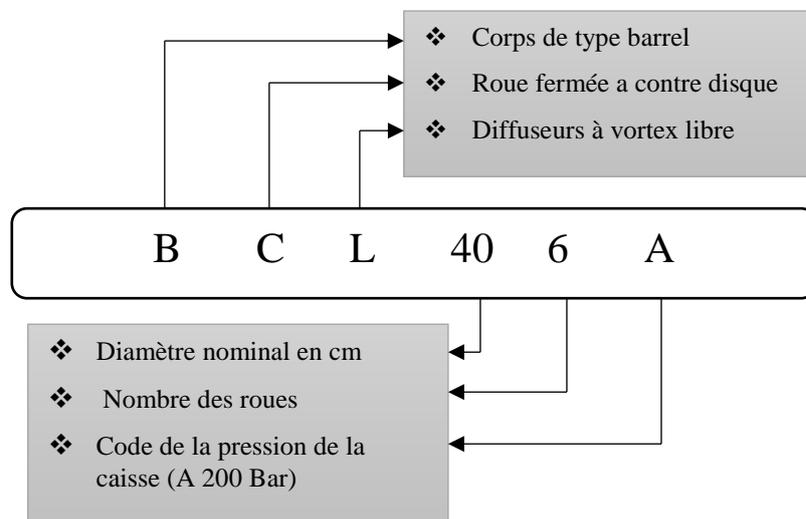


Figure 3.2 : Codification du Compresseur centrifuge BCL406 [28]

Les lettres majuscules indiquent les caractéristiques du corps ; les lettres BCL indiquent un compresseur ayant un corps ouvert verticalement (corps du type en forme de "barrel").

Les numéros places après les lettres indiquent le diamètre nominal et nombre des roues, par exemple, un compresseur ayant un corps a division verticale à 2eme étage de compression et un rotor avec six roues de diamètre nominal de 400 mm, est indiqué par le signe BCL406/k102 comprime le gaz généralement de 30 à 80 bars.

Le compresseur comprend principalement un ensemble statorique (corps, extrémités, supérieures, diaphragmes, étanchéité et paliers) et un ensemble rotatif (rotor constitué par : un arbre, des roues et un tambour d'équilibrage).

Le compresseur type BCL a été conçu essentiellement pour comprimer les gaz à haute pression.

### 3.3.2 Présentation du compresseur BCL 406

Ce sont des compresseurs de type "barrel"

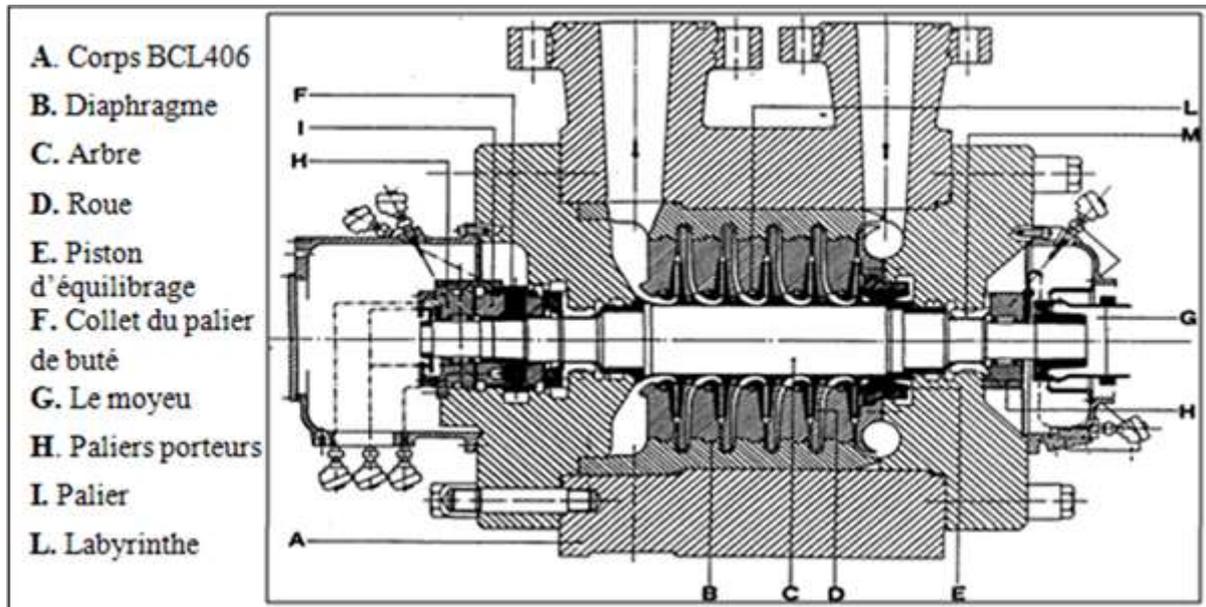


Figure 3.3 : Compresseur centrifuge BCL 406 [28]

Ce type de machine est constitué par un corps extérieur contenant la partie du stator dite ensemble de diaphragmes (B) où est introduit un rotor formé par l'arbre (C), une ou plusieurs roues (D), le piston d'équilibrage (E) et le collet (F) du palier de butée.

Le rotor entraîné par la machine motrice moyennant le moyeu (G) tourne sur les paliers porteurs (H) et est gardé dans sa position axiale par le palier de butée (I). Des dispositifs d'étanchéité à labyrinthe (L) et, si nécessaire, des étanchéités huile d'extrémité agissent sur le rotor.

A- corps extérieur ; B- diaphragmes ; C- arbre ; D- roues ; E- piston d'équilibrage ; F- collet du palier de butée ; G- rotor ; H- paliers porteurs ; I- palier de butée ; L- labyrinthe.

### 3.3.3 Caractéristiques de la machine

Les compresseurs centrifuges sont entrainés par une turbine MS5002B/C par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse et un montage en série avec des accouplements flexibles.

Le but de compresseur est de convertir l'énergie mécanique en énergie de pression de gaz.



Figure 3.4 : Compresseur centrifuge BCL 406. [28]

Tab 3.1 : Caractéristiques de fonctionnement du compresseur 2<sup>ème</sup> étage

Paramètres		Compresseur 2 <sup>ème</sup> Etage BCL 406
Débit	[Nm <sup>3</sup> /h]	<b>99400</b>
Pression d'aspiration	[Bar]	<b>30</b>
Pression de refoulement	[Bar]	<b>80</b>
Température d'aspiration	[°C]	<b>50</b>
Température de refoulement	[°C]	<b>150</b>
Puissance absorbé	[kW]	<b>5504</b>
Vitesse de rotation	[tr/min]	<b>10323</b>
Vitesse max. continue	[tr/min]	<b>10375</b>

### 3.3.4 Mise en place du compresseur BCL 406

La chaîne cinématique est une chaîne de transformation de mouvement. Elle consiste en un ensemble de corps rigides articulés entre eux, les articulations peuvent être de nature extrêmement variées suivant le type de mouvement relatif qu'elles autorisent et peuvent impliquer plusieurs degrés de liberté. Le compresseur **BCL406** noté aussi sur le schéma du train de compression de la figure 3.5 par **K102**.

C'est le deuxième étage du train de compresseur dans la section de compresseur **HP** du gaz, il se charge de comprimer le gaz de refoulement du **K101** additionnés à ceux de régénération provenant de la section de déshydratation [28].

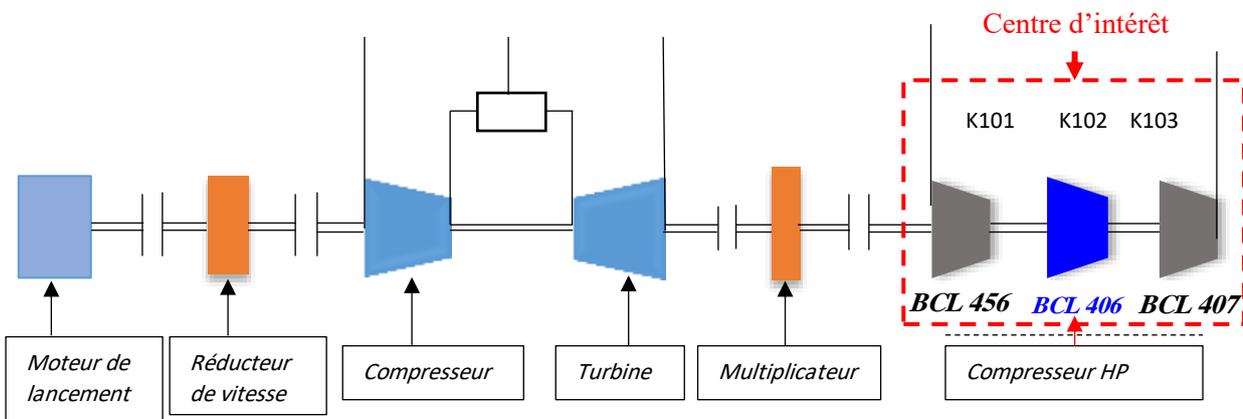


Figure 3.5 : Schéma simplifié d'un train de compresseur

### 3.3.5 Modes des défaillances

Le compresseur est une machine très complexe et elle peut engendrée plusieurs pannes de différents type (mécanique, électrique...), les plus fréquents et les plus connus sont : [30]

- Vibrations excessives
- Haute pression d'huile d'étanchéité
- Rendement faible
- Température élevé

Plusieurs travaux [31], [32], et [33] montrent les modes des défaillances génériques des compresseurs centrifuges, selon des critères différents comme leurs conceptions, fabrication, installation, et fonctionnement.

Tab 3.2 : Modes des défaillances fréquentes du compresseur

Références	Modes des défaillances
[31] : [ATT 2016]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usure (Palier)</li> <li>• Fissure</li> <li>• Défaillance de système d'accouplement</li> </ul>
[32] : [DOU-BER 2012]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usure/Cassure (Palier)</li> <li>• Non Démarrage (Alimentation)</li> <li>• Fuite (Joint)</li> </ul>
[33] : [SEM-GEU-FER 2012]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usure/Fissure (Corps avant)</li> <li>• Usure /Cassure (Palier)</li> </ul>

### 3.4 Application

#### 3.4.1 Logiciel de simulation

##### 1°. *Netica application*

Netica Application est un outil complet pour travailler avec des réseaux bayésiens et des diagrammes d'influence standard. Il peut construire, apprendre, modifier, transformer et stocker des réseaux, ainsi que répondre à des requêtes ou trouver des solutions optimales en utilisant son moteur d'inférence. Il peut apprendre des relations probabilistes à partir de données.

Il peut trouver des décisions optimales pour des problèmes de décision séquentiels (c'est-à-dire que les décisions ultérieures dépendent des résultats des précédentes). [34]

##### 2°. *Objectifs de Netica*

1. Construire des réseaux bayésiens en utilisant l'interface graphique et en entrant les données pertinentes.
2. Compiler le réseau et effectuer différents types d'inférence probabiliste et expérimenter avec le réseau.
3. Observer l'indépendance et la dépendance conditionnelles par l'expérimentation.
4. Effectuer une analyse de sensibilité sur le réseau en utilisant l'information mutuelle.
5. Construire un diagramme d'influence en étendant le réseau bayésien que vous avez construit.
6. Trouvez la politique de décision optimale à partir du diagramme d'influence.
7. Apprendre les probabilités à partir des données pour un réseau dont la structure graphique est connue. [34]

##### 3°. *Interface de Netica*

Cette version *Netica 6.09*, comporte de nombreuses nouvelles fonctionnalités et beaucoup d'autres sont en cours de développement. Leurs bibliothèques de logiciel pouvant être reliées entre elles par plusieurs langages et plateformes comme JAVA, C, C#, Visual Basic/COM et Matlab. [34]

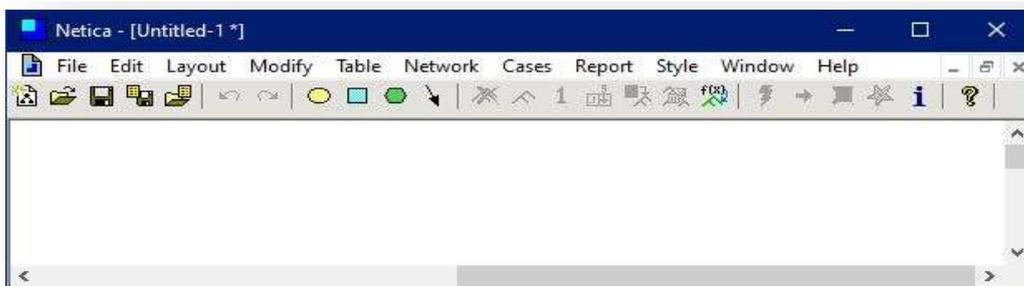


Figure 3.6 : Interface graphique de Netica 6.09

### 3.4.2 Mise en œuvre

#### 1°. Fichier historique du compresseur BCL 406

Les données du fichier historiques concernant le compresseur BCL 406 sont portées sur le tableau (3.3) qui expose l'historique du compresseur entre la période du 05/01/2007 au 05/02/2014.

Tab. 3.3 : Fichier historique du compresseur BCL 406 [29]

N°	Date de démarrage	Date D'arrêt	TBF (h)	TTR (h)	Causes	Actions
1	05/01/2007	07/07/2007	3648	6	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
2	07/07/2007	29/12/2007	2085	05	Fuite d'huile	Changement filtre d'huile
3	29/12/2007	02/01/2008	43	07	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
4	02/01/2008	20/05/2008	1653	5	Haute Température	Changement d'huile
5	20/05/2008	17/03/2009	3490	12	Fermeture de la circulation d'huile	Réparation de clapet
6	18/03/2009	04/04/2009	182	06	Fuite d'huile	Changement filtre d'huile
7	04/04/2009	15/06/2010	862	06	Augmentation de bruit (son de vibration)	Changement accouplement de pompe graissage moteur
8	15/06/2010	26/06/2010	132	24	Haute Température et augmentation de bruit (son de vibration)	Changement palier de l'aère d'huile
9	28/06/2010	06/09/2010	840	07	Haute Température	Changement filtre d'huile et l'huile
10	06/09/2010	21/04/2011	2640	08	Fuite d'huile	Étanchéité fuite d'huile
11	21/04/2011	23/04/2011	31	24	Augmentation de bruit (son de vibration)	Travaux d'alignement du moteur de compression
12	25/04/2011	14/08/2011	1332	07	Fuite d'huile	Changement filtre d'huile et Huile
13	14/08/2011	12/02/2012	2162	07	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
14	12/02/2012	25/06/2012	1217	08	Haute Température	Changement d'huile
15	25/06/2012	15/07/2012	233	12	Haute Température et augmentation de bruit (son de vibration)	Changement palier de l'aère d'huile
16	16/07/2012	21/11/2012	1584	06	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
17	21/11/2012	01/06/2013	570	24	Augmentation de bruit (son de vibration)	Travaux d'alignement du moteur de compression
18	03/06/2013	05/02/2014	2964	07	Fuite d'huile	Étanchéité fuite d'huile

#### 2°. Construction de l'Add

##### ➤ Identification des causes possibles (événements de base)

D'après le fichier historique du compresseur BCL 406, on remarque qu'il y a plusieurs causes de l'arrêt du compresseur dans la période de [05/01/2007] a [05/02/2014].

Ces causes sont :

- Bruit et Patinage - Fuite d’huile – Echauffement (Haute température)- Fermeture de circulation
- Augmentation de bruit (son de vibration) - Haute de température et Augmentation de bruit (son de vibration).

➤ *Evènements intermédiaires*

Les causes de défaillance sont classées selon leurs natures de l’effet de mode de défaillance (Mécanique, Hydraulique et Thermique).

➤ *Evènement indésirable (redouté)*

C’est la défaillance du compresseur BCL 406.

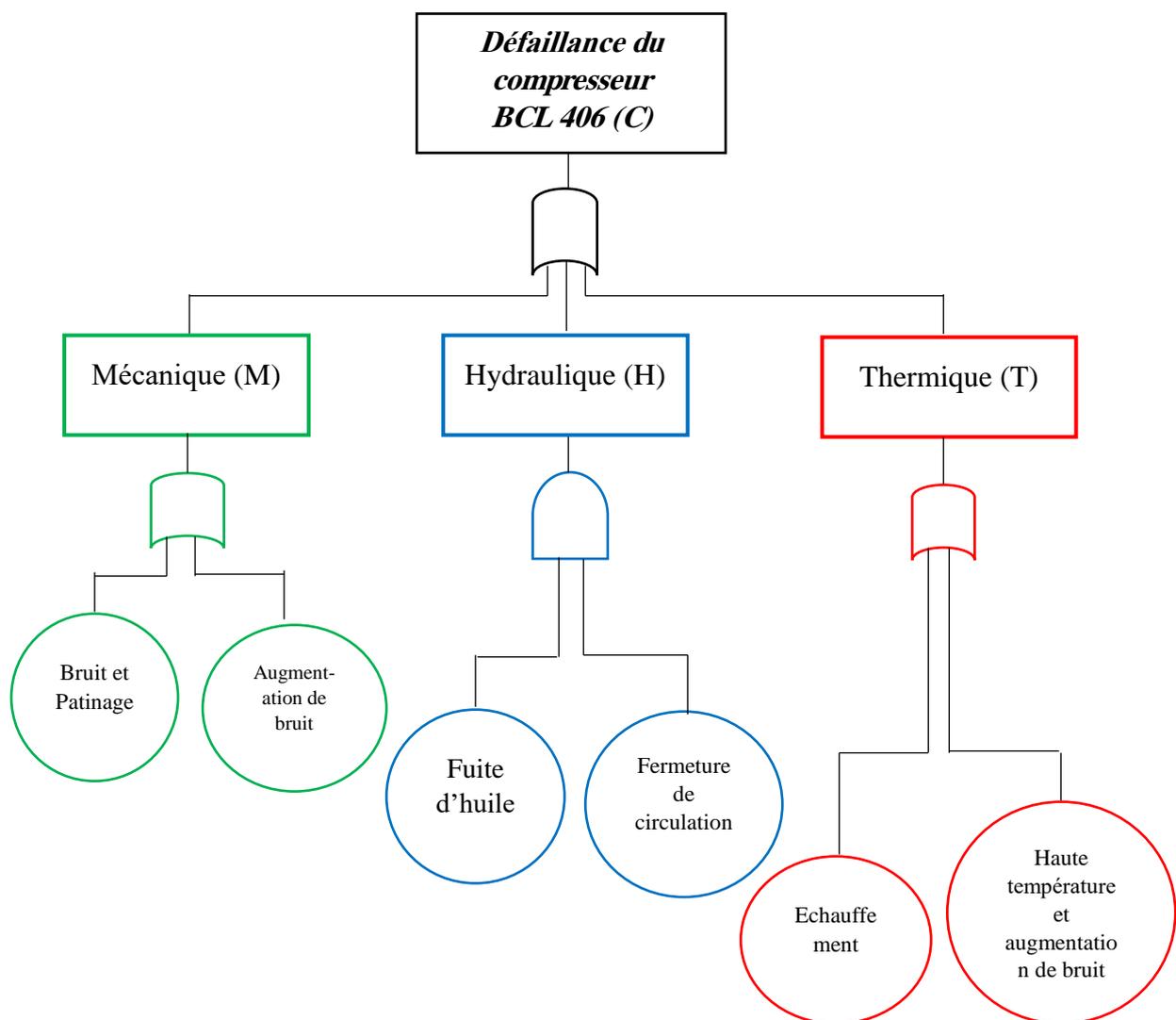


Figure 3.7 : AdD qualitative pour le compresseur BCL 406

### 3°. Tableau des probabilités

D'une part, du point de vue statistique on constate que :

- Dans la période de 05/01/2007 a 05/02/2014, on recense un nombre de  $n_i = 6$  causes de défaillance qui sont répètent  $N_{tot} = 18$ , de la même composant de l'échantillon (Compresseur BCL 406).
- Dans notre cas on a :

$$N_{tot} = 18 < 20 \text{ donc : } F(t_i) = \frac{n_i - 0.3}{N_{tot} + 0.4}$$

D'autre part, du point de vue probabilité on sait que :

- La fonction de défaillance  $F(t_i) = P(T \leq t_i)$  représente la probabilité d'occurrence d'un mode de défaillance avant l'instant  $t_i$ .
- Sachant que la fonction fiabilité  $R(t) = 1 - F(t)$ , on déduit l'estimation des  $R(t_i)$

Tab. 3.4 : Tableau des probabilités

N	Causes de défaillance	Code	$n_i$	$F(t_i)$	$P(T \leq t)$
01	Fuite d'huile	H1	5	0.255	0.255
02	Bruit et Patinage	M2	4	0.201	0.201
03	Augmentation de bruit (son de vibration)	M1	3	0.146	0.146
04	Echauffement	T1	3	0.146	0.146
05	Haute température et Augmentation de bruit (son de vibration)	T2	2	0.092	0.092
06	Fermeture de circulation	H2	1	0.038	0.038
			<b><math>N_{tot} = 18</math></b>		

### 4°. Calcul des probabilités à posteriori

Après l'estimation des probabilités des événements de bases (causes de défaillance), on calcule les probabilités des événements intermédiaires (Mécanique, Hydraulique et Thermique), on utilisant les portes logiques de l'AdD (l'algèbre booléen).

$$- P(M) = P(M1) + P(M2) - P(M1) \times P(M2)$$

$$P(M) = 0.317$$

$$- P(T) = P(T1) + P(T2) - P(T1) \times P(T2)$$

$$P(T) = 0.224$$

$$- P(H) = P(H1) \times P(H2)$$

$$P(H) = 0.0096$$

Ces résultats sont résumés dans le tableau (3.5)

Tab 3.5 : Probabilités a postériori

Mode de défaillance	Mécanique (M)	Hydraulique (H)	Thermique (T)
Porte logique	Porte « OU »	Porte « ET »	Porte « OU »
P. a postériori	<b>0.317</b>	<b>0.0096</b>	<b>0.224</b>

5°. Quantification de l'AdD

Le calcul de probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable (C), sera calculer et injecter dans l'AdD, Figure (3.8).

$$P(C) = P(M) + P(H) + P(T)$$

$$P(C) = 0.4721$$

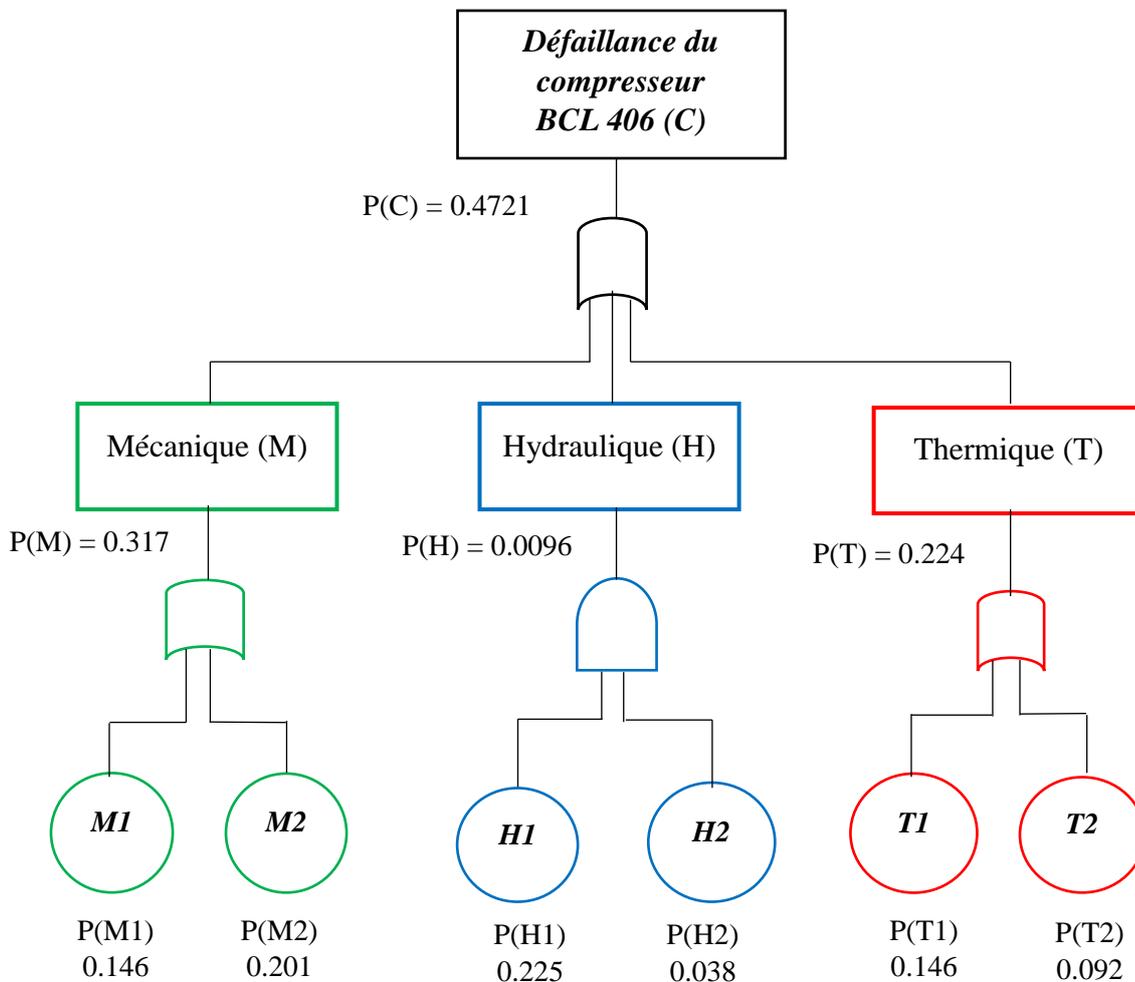


Figure 3.8 : AdD quantitative pour la défaillance du compresseur BCL 406

### 6°. Modélisation l'AdD en RB

Pour obtenir la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté (à priori), on modélise l'arbre de défaillance en réseaux bayésiens pour calculer cette probabilité à base de théorème de Bayes.

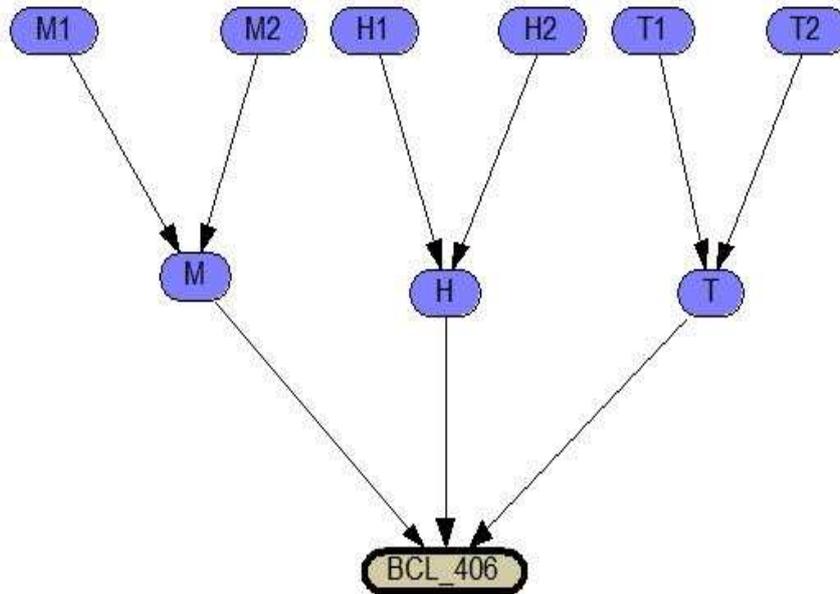


Figure 3.9 : Modélisation de l'AdD en RB

### 7°. Diagnostic des défaillances par réseaux bayésiens

#### ➤ Modélisation des défaillances du système

$$P(C) = P(M \cup T \cup H)$$

$$= P(M) + P(T) + P(H) - P(M \cap T) - P(M \cap H) - P(T \cap H) + P(M \cap T \cap H)$$

$$= P(M) + P(T) + P(H) - P(M) \cdot P(T) - P(M) \cdot P(H) - P(T) \cdot P(H) + P(M) \cdot P(T) \cdot P(H)$$

$$P(C, M, T, H) = P(C \setminus M, T, H) \times P(M, T, H) \quad (3.1)$$

$$P(M \setminus C) = \frac{P(C \setminus M) * P(M)}{P(C)} \quad (3.2)$$

$$P(T \setminus C) = \frac{P(C \setminus T) * P(T)}{P(C)} \quad (3.3)$$

$$P(H \setminus C) = \frac{P(C \setminus H) * P(H)}{P(C)} \quad (3.4)$$

➤ *Inférence et probabilité conditionnelle*

Le tableau ci-dessous exprime la connaissance selon laquelle la présence d'une défaillance mécanique, thermique ou hydraulique dans le compresseur BCL 406. Le compresseur fonctionne uniquement si la partie Mécanique, Hydraulique et Thermique fonctionnent.

Dans l'arbre de défaillance on parle de la présence d'un défaut (V : vrai) ou l'absence d'un défaut (F : faux).

*Tab 2.6 : Probabilité conditionnelle*

	M = V				M = F			
	T = V		T = F		T = V		T = F	
	H = V	H = F	H = V	H = F	H = V	H = F	H = V	H = F
C = V	1	1	1	1	1	1	1	0
C = F	0	0	0	0	0	0	0	1

Donc on peut alors se poser différentes questions.

- Quelle est la probabilité que le compresseur fonctionne encore lorsque qu'il y a une défaillance mécanique ?

Pour répondre à cette question de vraisemblance on applique la loi de Bayes, et on peut recalculer toutes les défaillances de chacune des modalités de chaque variable du réseau.

$P(M = V / C = V)$  Probabilité qu'il y a une défaillance mécanique sachant qu'il y a un dysfonctionnement dans le compresseur.

Les probabilités de défaillance des sous-systèmes sont normalisé pour devenir des probabilités a priori et on garde deux modalités :

- Présence de défaillance
- Absence de défaillance

*Tab 2.7 : Probabilité des évènements M, H, T*

Défaillance	M	T	H
Probabilité a priori	0.317	0.224	0.0096

$$\begin{aligned}
 P(C = V) = & P(C = V | M = V, T = V, H=V).p(M = V).p(T = V) .p(H = V) + \\
 & P(C = V | M = V, T = V, H=F).p(M = V).p(T = V) .p(H = F) + \\
 & P(C = V | M = V, T = F, H=V).p(M = V).p(T = F) .p(H = V) + \\
 & P(C = V | M = F, T = V, H=V).p(M = F).p(T = V) .p(H = V) + \\
 & P(C = V | M = V, T = F, H=F).p(M = V).p(T = F) .p(H = F) + \\
 & P(C = V | M = F, T = V, H=F).p(M = F).p(T = V) .p(H = F) + \\
 & P(C = V | M = F, T = F, H=V).p(M = F).p(T = F) .p(H = V) + \\
 & P(C = V | M = F, T = F, H=F).p(M = F).p(T = F) .p(H = F).
 \end{aligned}$$

**Application numérique :**

$$P(C=V) = [1 \times 6.816 \cdot 10^{-4}] + [1 \times 0.0703] + [1 \times 2.36 \cdot 10^{-3}] + [1 \times 1.468 \cdot 10^{-3}] + [1 \times 0.2436] + [1 \times 0.1515] + [1 \times 5.088 \cdot 10^{-3}] + [0 \times 0.524]$$

- $P(C=V) = 0.4749$
- $P(M|C) = \frac{1 \times 0.317}{0.4749} = 0.667$
- $P(T|C) = \frac{1 \times 0.224}{0.4749} = 0.4716$
- $P(H|C) = \frac{1 \times 0.0096}{0.4749} = 0.020$

La figure 3.10 représente le tableau des probabilités conditionnelles sous logiciel Netica.

MECANIQUE	HYDRAULIQUE	THERMIQUE	state0	state1
state0	state0	state0	100	0
state0	state0	state1	100	0
state0	state1	state0	100	0
state0	state1	state1	100	0
state1	state0	state0	100	0
state1	state0	state1	100	0
state1	state1	state0	100	0
state1	state1	state1	0	100

Figure 3.10 : TPC de l'évènement redouté sous Netica

L'étape suivante montre le remplissage des données (probabilités) des évènements Mécanique, Hydraulique et Thermique.

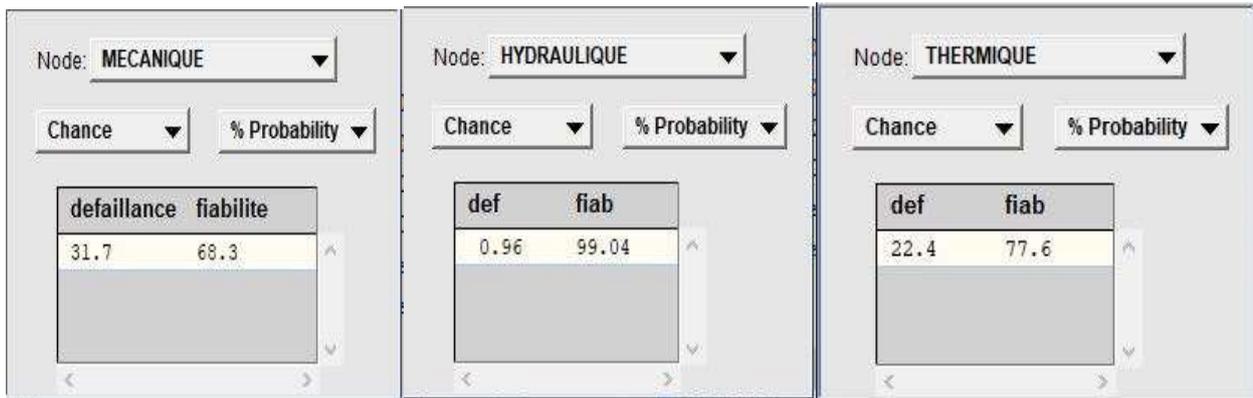


Figure 3.11 : Probabilités de M, H, T sous Netica

➤ **Résultat de simulation**

**1°. Cas de l'étude**

On procède alors à une première inférence avec le logiciel Netica, cette inférence permet de propager toute probabilité instanciée ou à priori sur la croyance des autres nœuds. , on obtient un nouveau tableau des croyances (probabilités) sur chaque nœud.

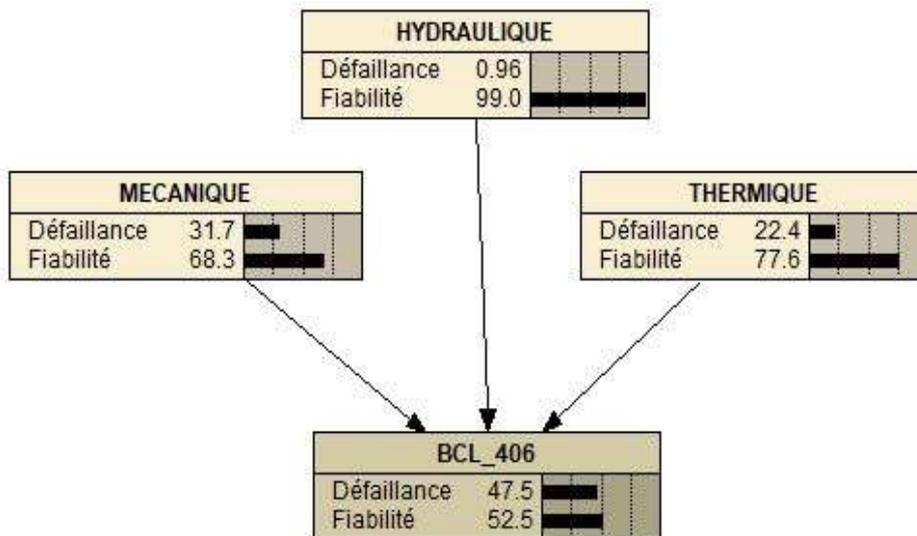


Figure 3.12 : Inférence avec Netica, pour le compresseur

➤ **Discussion : Cas de l'étude**

- La probabilité d'occurrence de l'évènement redouté est identique à celle calculée par AdD,  $P(C) = 0.4749 \approx 0.4721$
- Après l'analyse par AdD on trouve  $P(\text{fiabilité du compresseur}) = 1 - P(C) = 52.5\%$ , ainsi la probabilité d'occurrence de l'évènement sommet P (défaillance du compresseur) =  $P(C) = 0.475$ , ce qui vaut 47.5%. Cette probabilité est non acceptable, vu que la machine est stratégique et en vue d'optimiser sa disponibilité, il faut rechercher et identifier les causes racines du système étudié et déterminer les solutions correctives et préventives qui minimisent ce pourcentage.

2°. **Cas de défaillance total du compresseur**

On met alors le système en défaillance totale, ce qui revient à mettre une probabilité de défaillance égale à 100 %, et on répercute cette donnée à nouveau sur tous les réseaux bayésiens (inférence).

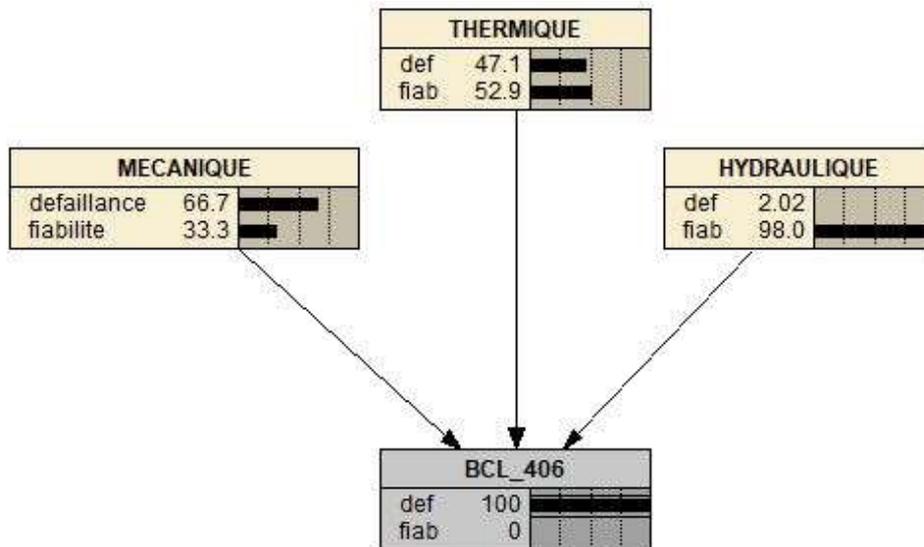


Figure 3.13 : Cas de défaillance total du système

➤ **Discussion : Cas de défaillance totale**

- Les probabilités des défaillances respectivement mécaniques, thermiques ou hydrauliques sachant qu'il y a un dysfonctionnement de compresseur égales 66.7 %, 47.16% ,2 %. Ceci nous permet d'actualiser nos croyances pour la probabilité a priori.
- D'après les résultats obtenus par simulation on trouve que la présence de défaillance est surtout causée par les événements M2 (bruit et patinage) et T1 (Echauffement), donc ces événements sont les plus probables de défaillance du compresseur BCL 406 et doivent être traités en priorité.

- La maintenance préventive est soit conditionnelle, soit systématique. Mais avec le modèle bayésien on peut imaginer *une troisième voix : la maintenance préventive ciblée*.
- Le réseau bayésien nous permet de connaître plusieurs scénarii possibles sur le système étudié.

### 3.5 CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, nous avons diagnostiqué le compresseur BCL 406 par la technique de l'arbre de défaillance, pour obtenir des meilleurs résultats, on a utilisé le réseau bayésien comme outil de quantification des inférences probabiliste des défauts de la machine.

---

---

# ***CONCLUSION GENERALE***

---

---

Au terme de ce mémoire, qui synthétise notre projet de fin d'études, le fait de traiter un cas issu du milieu professionnel et industriel nous a donné l'occasion d'acquérir et de renforcer nos connaissances sur les réalités techniques de la fonction maintenance. En outre, le thème traité par notre projet de fin d'études nous a facilités en tant qu'étudiant l'intégration progressive dans notre future cadre de travail.

On peut dire et juger que les objectifs fixés et tracés dans notre plan de travail ont été atteints étant donné qu'on n'a pu dégager les actions à entreprendre. Autrement dit, nous avons pu, dans un premier temps connaître la supervision, la surveillance et le diagnostic. Dans un deuxième temps, nous avons procédé à l'estimation des probabilités d'occurrences des événements indésirables. Pour cela, notre démarche méthodologique propose d'intègre l'arbre de défaillance et le réseau bayésien, pour prend en compte les données de retour d'expérience, pour faire des nouvelles prévisions probabilistes.

En ce qui concerne les résultats obtenus, notre étude a fournie de résultats précis et proche de la réalité qui sont en fonction de l'état de fonctionnement des systèmes techniques et l'expérience pratique aussi. Il est à noter que le manque de données pratiques ainsi que l'indisponibilité d'un historique entier et complet, met les résultats obtenus sujet à une comparaison réelle et à une vérification.

Dans le but d'augmenter d'avantage la production et d'améliorer la qualité et l'efficacité du service maintenance, le résultat de notre travail peut servir comme référence pour assurer la disponibilité des systèmes.

---

---

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

---

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [0] La norme CEI-271-1974
- [1] <http://tpmattitude.fr/defail.html>
- [2] [http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/dmichau\\_supervision/supervision.html](http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/dmichau_supervision/supervision.html)
- [3] DANIEL RACOCEANU, «*Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle*», en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, université de Franche-Comté de Besançon, 2006.
- [4] H.MOUFIDA, «*Modélisation Des Défaillances Et Leur Diagnostic Par La Méthode De Reconnaissance Des Formes Floue*» Thèse De Magister », université Badji Mokhtar-Annaba, 2013.
- [5] TATIANA.K.H, «*Surveillance Des Procédés Basé De Méthode De Classification : Conception D'un Outil D'aide Pour Détection Et Le Diagnostic Des Défaillances*», Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2004.
- [6] CLAUDIA.V.N, «*Diagnostic Par Technique D'apprentissage Floues, Concept D'une Méthode De Validation Et D'optimisation Des Partitions*», Thèse de doctorat université de Toulouse, 2007.
- [7] B.FARIDA, «*Diagnostic Des Pannes D'un Système De Pompage Photovoltaïque*», Thèse de magister de l'université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2010.
- [8] M.MRABET, «*Contribution A La Conception D'un Outil D'aide Diagnostic Des Systèmes De Production*», Mémoire de master, Université Aboubkr Belkaid de Tlemcen, 2017.
- [9] T.ALIANE, «*Introduction Au Diagnostic Des Défaillances*», laboratoire A2SI-ESIEE-Paris, 2006.
- [10] M.H.MAZOUNI, «*Pour Meilleure Approche Du Management Des Risque...*», Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, 2008.
- [11] <http://www.technologuepro.com/maintenance-industrielle/chapitre-5-analyse-des-defaillances-et-aide-au-diagnostic.pdf>
- [12] <https://www.marketing-etudiant.fr/ishikawa.html>
- [13] O.ADROT, «*Diagnostic A Base De Modèles Incertains Utilisant L'analyse Par Intervalles L'approche Bornante* » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, 2000.
- [14] A.KHEDHER, «*Méthodes Du Diagnostic-Cours*», Institut supérieur des sciences appliquées et technologies de GAFSA, 2018.
- [15] C.ERICSON, «*Fault Tree Analysis, A History From The Proceeding Of The 17<sup>th</sup> International System Safety Conference* », Washington, 1999.
- [16] B.ZEROUALI, «*Analyse Du Comportement De Systèmes Industriels Par Les Réseaux Bayésiens Pour La Prévention Des Scenarios Indésirables* », Thèse de doctorat LMD, université Badji Mokhtar –Annaba, 2018.

- [17] F.ZOHRA, « *Utilisation des réseaux bayésiens pour calculer la fiabilité des systèmes* », Mémoire de Magister, université de SAAD DAHLAB-BLIDA, 2010.
- [18] M.STAMATELATOS & W.VESELY “*Fault Tree Handbook with Aerospace Applications* », NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2002.
- [19] NIKOLAOS LIMNIOS, « *Fault Trees* », ISTE Ltd, United State, 2007.
- [20] P.THOMAS, « *Contribution à l'approche booléenne de la sûreté de fonctionnement : L'atelier logiciel Aralia WorkShop* », Thèse de doctorat, université Bordeaux I, 2002.
- [21] F. CARRAT, A. MALLET, V. MORICE, « *Statistique & Probabilité* », Université Pierre et Marie Curie, 2013.
- [22] MICHAEL HAVBRO FABER, « *Statistics and Probability: Theory In Pursuit of Engineering Decision Support* », Springer, London, 2012.
- [23] M.BOUZENITA, « *Conception Et Implémentation D'un Système Expert Hybride Pour Le Diagnostic D'un Système Industriel*», Thèse de Magister, université El-Hadj Lakhdar – Batna, 2012.
- [24] H.DHOUBI, «*Utilisation Des Réseaux De Petri A Intervalles Pour La Régulation D'une Qualité : Application A Une Manufacture De Tabac*», Doctorat délivré conjointement par l'Université des Sciences et Technologies de Lille et par l'Ecole Centrale de Lille, 2005.
- [25] F.MAHI, « *Synthèse De La Commande Supervisée D'un Système Par L'approche Des Réseaux De Petri* », Thèse de Doctorat, Université Ahmed Benbella - Oran, 2015.
- [26] Guetarni Islam Hadj MOHAMED, «*Analyse Quantitative Des Risques : Application Sur Les Bacs De Stockage*», Doctorat LMD, Université d'Oran 2, 2019.
- [27] <https://www.techno-science.net/definition/5736.html>
- [28] CHEURFI ABDERRAHIM, « *Etude Et Maintenance Du Compresseur Centrifuge BCL-406 Problème D'encrassements* », Mémoire de master, Université M'hamed Bouguera Boumerdes, 2017.
- [29] DOUMA.S & DOUMA.A, « *Amélioration de la fiabilité du compresseur centrifuge BCL406 par l'application de la maintenance préventive* », Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020.
- [30] BENREZZAK.S, « *Étude de la performance d'un Compresseur centrifuge multi-étages K101 A de la station de Oued Noumer* », Mémoire de master, Université Aboubkr Belkaid de Tlemcen, 2012.
- [31] ATTAR ABDENOUR, « *Application de l'AMDEC pour le turbocompresseur GHH au niveau de l'unité d'acide nitrique FERTIAL-ANNABA*», Mémoire de master, université Badji Mokhtar-Annaba, 2016.
- [32] SEMOUHIL & GEURMIDA.B & FERHAT.A, « *Etude De Maintenance D'une Turbine à gaz «MS 5002D»* », Mémoire de master, UNIVERSITE DE M'SILA, 2012.

- [33] DOUABAN & BEROUBA.S, « *Analyse analytique FMD et AMDEC d'un compresseur à vis-ATLAS COPCO ZE3* », Mémoire de master, université de Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [34] <https://www.norsys.com/WebHelp/NETICA.htm>

---

---

# ***ANNEXES***

---

---

## ANNEXE A1 :

## CONCEPTS ET TERMINOLOGIE

Dans premier temps, nous rappelons que les principaux termes utilisés en diagnostic reposent principalement sur le travail effectué par [4], [13] et [14].

Les terminologies les plus utilisées dans le domaine du diagnostic sont les suivantes :

- **Fonctionnement normale d'un système** le fonctionnement d'un système est dit normal lorsque le système est capable de fournir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.
- **Anomalie** permet de décrire tout ce qui n'est pas conforme à une référence.
- **Dégradation** une perte de performances des fonctions assurées par le système.
- **Défaut** est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence. [14]
- **Défaillance** définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées [13]
- **Dysfonctionnement** signifie trouble, anomalie dans le fonctionnement, défaut, mauvais état de travail. le terme peut s'employer pour parler aussi bien d'une machine, équipement, ou groupe d'hommes (personnels).
- **Panne** lorsque plus aucune fonction n'est assurée, le terme panne est employé à la place de défaillance. [13]
- **Signe** un défaut est perceptible au travers d'un signe, caractère manifestant un état comportemental anormal. Un signe est caractérisé par un ensemble d'observations en provenance d'un système physique et est révélateur de la présence d'un défaut.
- **Symptôme** un symptôme est un phénomène qui survient sur un dispositif et qui révèle un dysfonctionnement. Il est également fréquent de regrouper les symptômes en fonction du dysfonctionnement auxquels ils sont liés : on parle alors de syndrome.

L'apparition de symptômes cause une défaillance.

La distinction entre les termes symptôme et signe s'apparente donc à la différence entre notions de défaut et de défaillance. Un symptôme révélateur d'une défaillance est nécessairement un signe, alors qu'un défaut se manifeste au travers de signes qui ne sont pas nécessairement des symptômes.

[4]

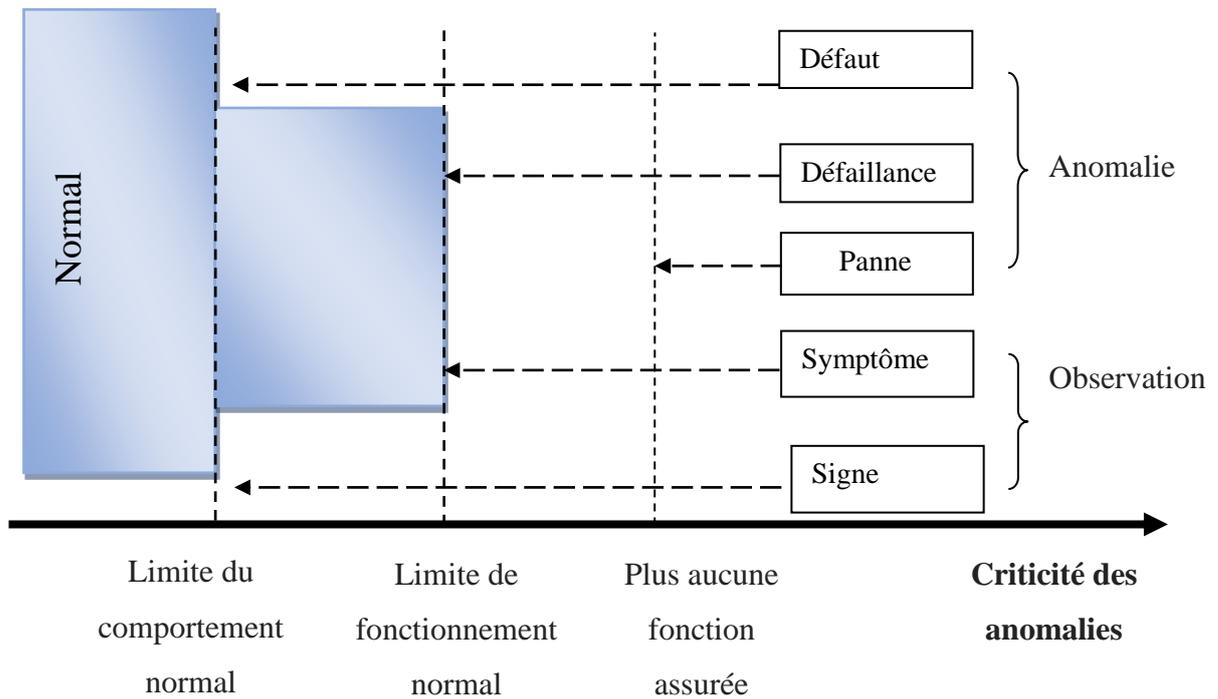


Figure 1 : Ordonnement des anomalies selon leur criticité [13]

- **Faute** c'est une action, volontaire ou non, dont le résultat est le non prise en compte correcte d'une directive ou d'une contrainte exprimée par le cahier des charges.
- **Erreur** c'est une partie du système ne correspondant pas ou correspondant incomplètement au cahier des charges. une erreur est la conséquence d'une faute. l'erreur est latente tant que la partie erronée du système n'est pas sollicitée. Elle devient effective au moment de la sollicitation de la partie erronée.
- **Résidu** communément appelé indicateur de défaut ou variable d'écart, est un signal conçu comme indicateur d'anomalies comportementales ou fonctionnelles
- **L'incertitude** est le fait de ne pas connaître ou prévoir l'état de la réalité pour déterminer la valeur de vérité d'une proposition.
- **L'imprécision** fait référence à la description incomplète d'un état de la réalité par une proposition.

ANNEXE A2 : Utilisation de  
l'abaque de NOIRET

**1. Abaque AGE DU MATÉRIEL**

**2. Abaque INTERDÉPENDANCE DU MATÉRIEL**

a : Matériel doublé

b : Matériel indépendant

c : Matériel avec tampon aval ou amont

d : Matériel sans tampon

e : Matériel important à marche discontinue

f : Matériel important à marche semi-continue

g : Matériel important à marche continue

**3. Abaque COMPLEXITÉ DU MATÉRIEL**

a : Matériel peu complexe et accessible

b : Matériel très complexe et accessible

c : Matériel complexe et peu accessible

d : Matériel très complexe et peu accessible

**4. Abaque COUT DU MATÉRIEL**

a : Matériel bon marché

b : Matériel peu coûteux

c : Matériel coûteux

d : Matériel très coûteux

e : Matériel spécial

f : Matériel très spécial

**5. Abaque ORIGINE DU MATÉRIEL**

a : Matériel du pays - grande série

b : Matériel du pays - petite série

c : Matériel étranger avec service après-vente

d : Matériel étranger sans service après-vente

e : Matériel étranger sans service technique

**6. Abaque ROBUSTESSE DU MATÉRIEL**

a : Matériel très robuste

b : Matériel courant

c : Matériel de précision robuste

d : Matériel peu robuste

e : Matériel en surcharge

f : Matériel de précision - maniement délicat

**7. Abaque CONDITIONS DE TRAVAIL**

a : Marche à un poste

b : Marche à deux postes

c : Marche à trois postes

**8. Abaque PERTE DE PRODUIT**

a : Produits vendables - suite d'une défaillance matérielle

b : Produits à reprendre - suite d'une défaillancematérielle

c : Produits perdus - suite d'une défaillance matérielle

**9. Abaque DÉLAI D'EXÉCUTION**

a : Délais libres - fabrication sur stock

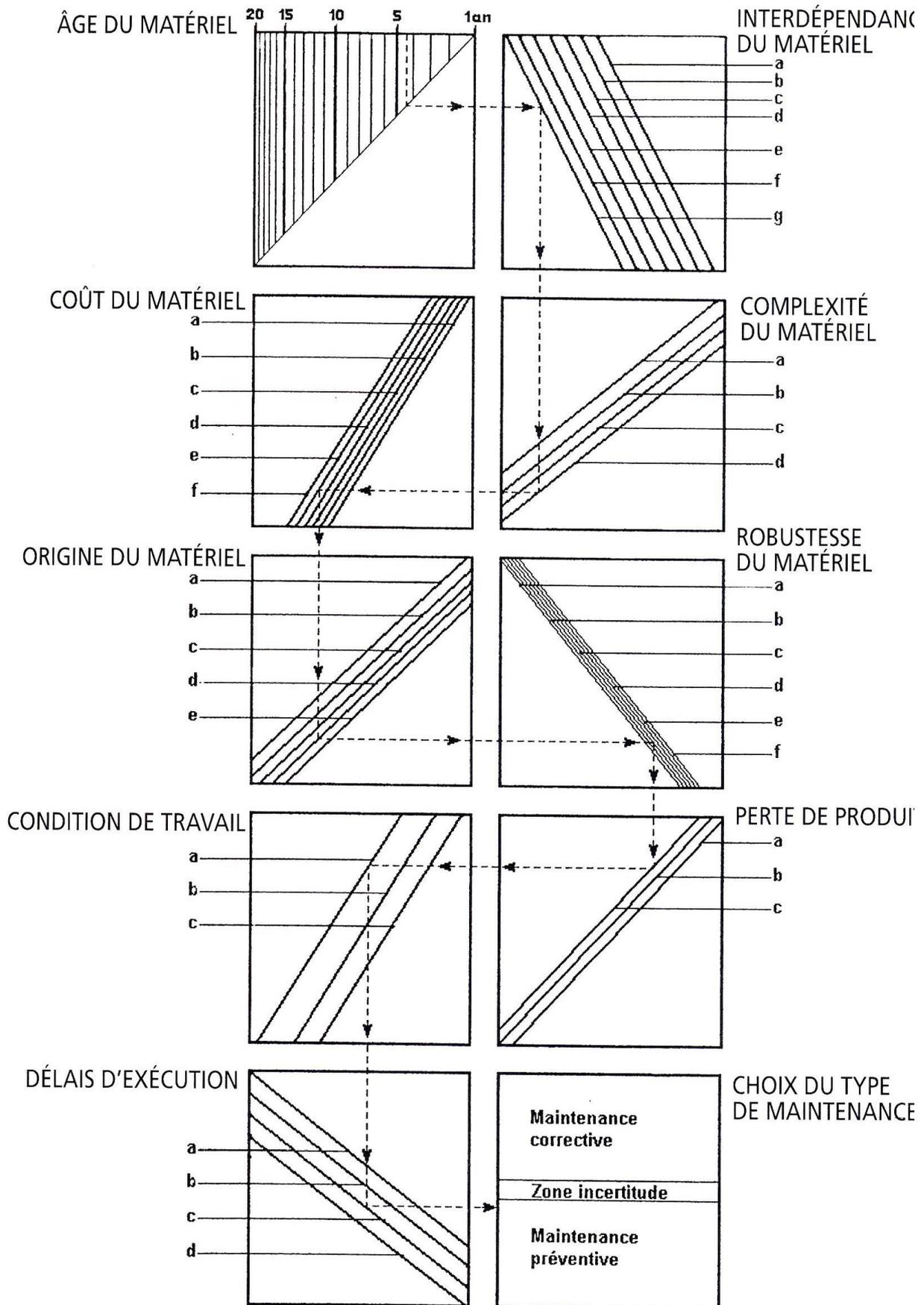
b : Délais serrés

c : Délais impératifs - pénalité de retard

d : Délais impératifs - produits non vendus - perteclientèle

**10. Abaque CHOIX DE TYPE DE MAINTENANCE**

- Zone Maintenance corrective obligatoire ou souhaitable
- Zone Incertitude
- Zone Maintenance préventive souhaitable ouobligatoire



Abaque de Noiret

ANNEXE A3 : TABLEAU A COEFFICIENT

Désignation critères	NB PTS	COEF	Désignation critères	NB PTS	COEF
<b>LES CONDITIONS DE TRAVAIL</b>			<b>COÛT DU MATERIEL</b>		
- Production continue 3*8	50	5	- Matériel à 1 seule unité ou très spéciale 300000 F	55	1
- Production de jour 2*8	35	5	- Matériel coûteux compris entre 100000 et 300000 F	25	1
- Production en 1 poste 1*8	15	5	- Matériel peu coûteux compris entre 20 000 et 100000 F	15	1
<b>DELAIS D'EXECUTION</b>			- Matériel pas coûteux : à 20000 F	5	1
- Délais impératif avec perte de clients	45	5	<b>ORIGINE DU MATERIEL</b>		
- Délai impératif avec paiement d'indemnité	30	5	- Matériel étranger sans ST	45	2
- Délais serrés	20	5	- Matériel étranger avec ST	25	2
- Délais inexistantes livraison sur stock	5	5	- Matériel local petite diffusion	20	2
<b>L'AGE DU MATERIEL</b>			- Matériel local grande diffusion	10	2
- Matériel neuf (-1 an)	45	2	<b>ROBUSTESSE DU MATERIEL</b>		
- Matériel jeune (1à 5 ans)	30	2	- Matériel de grande précision et de maniement délicat	30	1
- Matériel âgé (5à 10 ans)	20	2	- Matériel travaillant en surcharge	30	1
- Matériel démodé (10 ans)	5	2	- Matériel peu robuste	25	1
<b>INTERDEPENDANCE DU MATERIEL</b>			- Matériel de précision robuste	10	1
- Matériel d'infrastructure à marche continue	35	2	- Matériel robuste	5	1
- Matériel d'infrastructure à marche discontinue	25	2	<b>PERTE DE PRODUIT</b>		
- Matériel sans tampon amont ou aval	25	2	- Produits perdus non commercialisables (ferrailles)	55	1
- Matériel indépendant	10	2	- Pièces à reprendre	35	1
- Matériel double	5	2	- Pièces commercialisables sans reprises	10	1
<b>COMPLEXITE DU MATERIEL</b>					
- Très complexe et inaccessible	45	1			
- Peu complexe et inaccessible	25	1			
- Très complexe et accessible	25	1			
- Peu complexe et accessible	5	1			

## ANNEXE B1 : TERMINOLOGIES

Selon la norme **CEI 61508 [IEC 02]** et **AFNOR [AFN 88]** :

**Système :**

Ensemble d'éléments qui interagissent selon un modèle précis, un élément pouvant être un autre système, appelé sous-système, les sous-systèmes pouvant être eux-mêmes soit un système de commande soit un système commandé composé de matériel, des composants.

**Sous-système :**

Ensemble de composant (mécanique, électromécanique, électronique, ...).

**Systèmes linéaires : [27]**

Utilise des fonctions de transfert issues de l'utilisation de la transformée de Laplace ou une représentation d'état linéaire continue, cette dernière représentation, sous forme d'équations différentielles ordinaires est plus riche et permet de conserver des propriétés telles que la commandabilité ou l'observabilité qui sont perdues par l'utilisation de la transformée de Laplace.

**Systèmes non-linéaires : [27]**

Utilise une représentation d'état non-linéaire continue. Il est à noter qu'aucun système n'est strictement linéaire, ne serait-ce que par les saturations (butées physiques, par exemple) qu'il comporte ou encore par les phénomènes d'hystérésis. Inversement, un système non-linéaire peut parfois être considéré comme linéaire dans une certaine plage d'utilisation. Il faut toujours garder à l'esprit que le système sur lequel on peut travailler n'est qu'un modèle mathématique de la réalité, et que par conséquent il y a une perte d'information lors du passage au modèle. Bien sûr, il incombe à l'ingénieur de juger la pertinence de son modèle vis à vis des objectifs fixés.

**Systèmes à temps discrets : [27]**

Ce sont des systèmes dont le temps a été discrétisé. Ces systèmes n'existent pas à l'état naturel (la majorité des systèmes physiques naturels sont de type à temps continu), mais étant donné que la plupart des contrôleurs utilisés en automatique sont calculés par des processeurs numériques, il est parfois intéressant de modéliser le système commandé comme un système à temps discret. La modélisation de ces systèmes utilise des fonctions de transfert avec la transformée en Z ou une représentation d'état discrète.

**Systèmes à événements discrets : [27]**

Systèmes dont le fonctionnement peut être modélisé par des événements discrets. Généralement, ces systèmes sont modélisés par des réseaux de Petri, ou par les algèbres de dioïdes. Des exemples sont les réseaux ferroviaires, ou le fonctionnement d'une chaîne de montage.

**Systemes hybrides : [27]**

Systemes dont la modélisation nécessite l'utilisation des techniques liées aux systemes continus et aux systemes à évènements discrets, par exemple : une boite de vitesse de voiture.

**Composant :**

Un composant est une partie d'un systeme (matériels ou évènements), non décomposable dans le cadre de l'étude, et pour laquelle on dispose d'informations qualitatives (conditions de fonctionnement, modes de défaillance, ...) et quantitatives (fréquences d'apparitions des pannes, durées de bon fonctionnement, ...) suffisantes. Le type de composants, leurs quantités, leur qualité et leur manière dont ils sont disposés ont un effet direct sur la fiabilité du systeme.

**Entité :**

Tout élément, composant, sous-systeme, systeme, dispositif, équipement, unité fonctionnelle que l'on peut considérer individuellement.

**Redondance**

Existence de plus de moyens que strictement nécessaire pour accomplir une fonction requise dans une unité fonctionnelle ou pour représenter des informations par des données.

**Défaillance :**

Cessation de l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir une fonction requise. Une défaillance est un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. On entend par "unité fonctionnelle" soit un systeme complet, soit l'un quelconque de ses éléments.

**Défaillance de cause commune :**

Défaillance résultant d'un ou plusieurs évènements qui, provoquant des défaillances simultanées de deux ou plusieurs canaux séparés dans un systeme multicanal, conduit à la défaillance du systeme.

**Taux de défaillance :**

C'est la probabilité pour que le systeme soit défaillant, cette définition s'applique pour tout type d'éléments (systeme, sous-systeme, composant).

**Taux de panne :**

Probabilité d'apparition d'une panne dans un intervalle donné, sachant qu'aucune panne n'ait été observée avant, par unité de temps.

**Réparable :**

Entité susceptible techniquement et/ou économiquement d'être réparée.

**Non-réparable :**

Entité non susceptible techniquement et/ou économiquement d'être réparée.

**Temps de réparation :**

Temps pendant lequel les opérations de maintenance corrective sont effectivement réalisées sur l'entité, tous les temps annexes étant exclus.

## ANNEXE B1: L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE [23]

*“The scientific understanding of the mechanisms underlying thought and intelligent behavior and their embodiment in machines.”*

*Association américaine de l'intelligence artificielle*

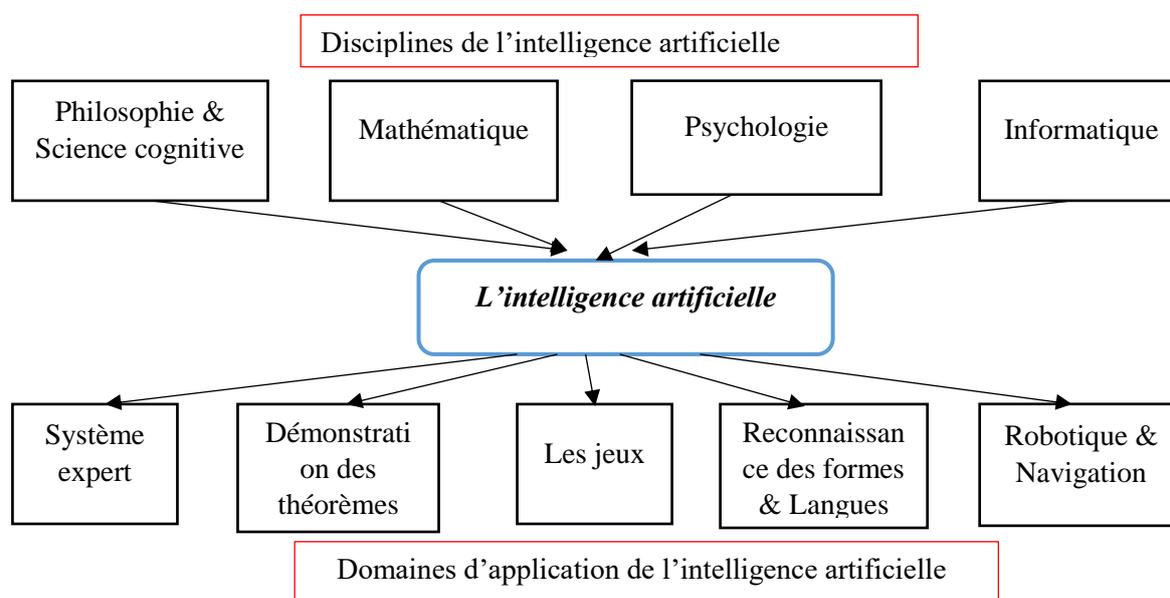
L'IA est un ensemble des méthodes, des outils, et des systèmes définis pour résoudre des problèmes dont leur solution nécessite de l'intelligence humaine. Le terme intelligence est défini toujours comme la capacité d'apprendre effectivement, de réagir efficacement, d'établir une bonne décision, de communiquer en langage ou bien en images d'une manière sophistiquée, et de comprendre. Alors l'IA s'intéresse à simuler l'être humain et en particulier le cerveau ainsi que sa manière de raisonnement.

Le sujet de l'IA couvre plusieurs domaines, il s'intéresse aux différents types de représentation des connaissances, différentes techniques d'intelligence, méthodes de résolution des problèmes avec des données ou connaissances incertaines, techniques d'automatisations pour l'apprentissage des machines...etc.

Parmi les domaines d'application de l'IA, nous avons les systèmes experts, la manipulation des jeux, la démonstration des théorèmes, le traitement de langage naturel et la reconnaissance des formes, ...etc.

L'IA est en interaction avec plusieurs sciences, la philosophie, la psychologie, les sciences cognitives, l'informatique, la mathématique et l'ingénierie.

*La figure B1.1* représente les différents domaines d'applications de l'IA, où les SE dominent la majorité des applications, ainsi que les sciences correspondantes.



*Figure B1.1 : Disciplines et domaines d'application de l'IA [23]*

## ANNEXE B2:

## SYSTÈMES EXPERTS

*“Expert system is an intelligent computer program that uses knowledge and inference procedures to solve problems that are difficult enough to require significant human expertise for their solution.”*

**Edward Feigenbaum**

Le professeur **Edward Feigenbaum** de l'université de Stanford, et un ancien pionnier des systèmes experts, a défini ce concept comme étant *"Un programme informatique intelligent utilisant des connaissances et des procédures d'inférences pour résoudre des problèmes assez difficiles ayant besoin d'une expertise humaine importante pour leur solution"*.

Alors un système expert est un système informatique qu'*imite* la capacité d'un expert humain pour prendre une décision. Le terme *imite* signifie que le système expert tente en tous cas de raisonner comme un être humain. L'imitation est plus générale que la simulation, elle exige de procéder comme l'objet réel imité, bien sûr on respectant quelques aspects.

D'une manière générale, deux pôles distinguent un système expert, l'expert de domaine et les utilisateurs finaux (*figure B2.1*). L'expert transfère son expérience au système expert afin que les utilisateurs bénéficient de cette expertise en utilisant le système expert.



*Figure B2.1 : Pôles principaux de système expert [23]*

➤ **Importance des systèmes experts**

La nécessité des systèmes experts revient aux limitations de processus décisionnel des experts humains, comprises :

1. L'expertise humaine généralement plus rare ;
2. L'influence physique et morale sur l'être humain due aux charges du travail ;
3. L'oubli des détails critiques du problème par l'être humain,
4. L'inconsistance des décisions humaines
5. L'homme ne peut pas assimiler une masse importante d'information rapidement ;
6. L'homme ne peut pas mémoriser une masse importante de données ;
7. la récupération de l'information stockée dans la mémoire par l'humain est lente.
8. L'homme est subjectif dans la prise de décision.

9. La responsabilité oblige l'homme à éviter la prise de décision ;

➤ *Quelques domaines d'applications*

Le développement de plusieurs prototypes de systèmes experts est illustré dans la littérature. La limitation détectée dans la présentation de quelques types seulement des applications des systèmes experts peut être expliquée par le fait que de nombreuses compagnies et organisations militaires n'ont pas présenté leurs systèmes experts à cause des secrets contenus dans les bases de connaissances. En se basant sur les systèmes décrits dans la littérature, on peut extraire quelques classes des systèmes experts qui sont donnés dans le tableau suivant (*Tab B2.1*) :

*Tab B2.1 : Quelques domaines d'applications des systèmes experts. [23]*

<i>Classe</i>	<i>Domaine d'application général</i>
<i>Configuration</i>	Assemblage propre des composants d'un système d'une manière correcte.
<i>Diagnostic</i>	Inférence des pannes en se basant sur les symptômes observés.
<i>Enseignement</i>	Enseignement intelligent où l'étudiant peut poser des questions de type Pourquoi?, Comment?, Quand ? exactement comme en face d'un enseignant.
<i>Interprétations</i>	Explication de données observées.
<i>Surveillance</i>	Comparer les données observées avec les données désirées pour ajuster les performances.
<i>Planification</i>	Partager les actions pour l'obtention des résultats désirés.
<i>Pronostic</i>	Prédire les résultats d'une situation donnée.
<i>Maintenance</i>	Ordonner un traitement pour un problème spécifique.
<i>Contrôle</i>	Régulation d'un processus : faire une interprétation, diagnostic, surveillance, planification, pronostic et maintenance.

## ANNEXE : B3

## RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

➤ *Historique*

Les premiers travaux sur les neurones artificiels ont débuté au début des années 1940 et ont été menés par McCulloch et Pitt. L'idée principal est de simuler de façon très simplifier le neurone naturel, Ils décrivent les propriétés du système nerveux à partir de neurones idéalisés : ce sont des neurones logiques (0 ou 1). Le premier mécanisme basé sur des fondements biologique est établi par le neurophysicien Hebb en 1949, qui met en évidence l'importance des synapses dans le processus d'apprentissage. En 1951, on a constitué le premier modèle réel d'un réseau de neurones. Cet ordinateur (SMART) possédait des connexions entre neurones en grande partie aléatoires.

Les résultats de ses travaux ont été l'origine de modèles connexionnistes de plus en plus élaborés .En 1958, Frank Rosenblatt a développé le concept du perceptron à partir des travaux pour expliquer et modéliser les facultés de reconnaissance de formes de système visuel.

L'idée essentielle de ce perceptron est de simuler la rétine de l'œil pour reconnaître des formes visuelles particulières. En 1959, Bernard Widrow et Marcin Hoff de Stanford ont développé les deux modèles nommée ADALINE et MADALINE. Ces modèles sont nommées de leur utilisation de Multiple ADAPtive LINear Elements. Le Madaline est le premier réseau de neurone appliqué dans un problème réel. C'est un filtre adaptatif pour éliminer les échoues dans les lignes téléphoniques. Ce type de réseau de neurone est généralement destiné pour une utilisation commerciale.

En 1969 Minsky et Papert écrivent l'article définitif, « Perceptrons », ils montrent clairement que les réseaux de neurones de cette période, comme le perceptron, n'étaient même pas capables de comprendre la fonction logique XOR. Puis, durant les années 1970 il y eut une remise en cause de l'intérêt des réseaux car les ordinateurs de neurones apprenaient lentement, coûtaient très cher et leurs performances n'étaient pas si impressionnantes. En 1978, en se basent sur la physique quantique des « verres de spin», le physicien John Hopfield a développé un réseau assimilable à une mémoire associative caractérisé par la propriété que l'on accède à son contenu et non à son adresse comme dans les calculateur actuel.

Cette démarche basée sur la physique quantique et la disponibilité croissante des minis et microordinateurs, vers la fin des années 70 a relancé les travaux sur les applications de neurones artificiels et le développement de réseaux particulier tels que les réseaux de Boltzmann qui mettent en œuvre la technique du recuit simulé. Au début des années 80, un algorithme de retro propagation a été découvert de façon indépendante par plusieurs chercheurs (Parker en 1982, Le Cun en 1985, et Rumelhart, Hinton et Williams en 1986)

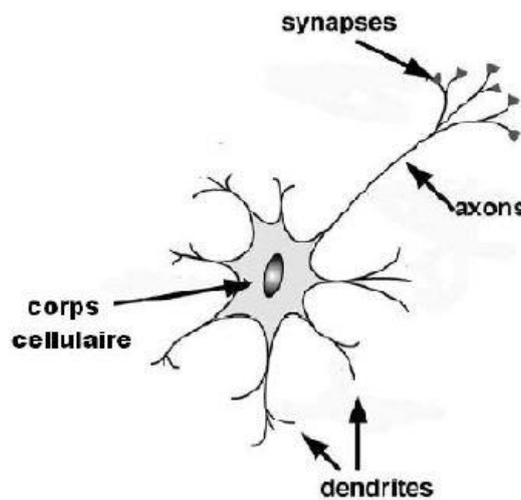
Cet algorithme de retro propagation est devenu l'algorithme le plus utilisé. Aujourd'hui, l'utilisation des RNA recouvre plusieurs domaines mais la plupart des réalisations sont souvent plus proche du prototype qu'en exploitation véritable.

### ➤ *Neurone biologique*

Le cerveau humain pèse environ 1500 grammes et contient trois couches successives :

- le cerveau reptilien, siège des réflexes instinctifs,
- l'hippocampe, siège de l'émotivité et de la sensibilité,
- le cortex, spécifique au mammifère et siège de raisonnement et de la pensée.

Ces couches contiennent deux types de cellules, Les *gliales* représentent environ 99.99% de volume de cerveau et les *neurones* dont le nombre variant entre 10 - 100 milliards organisés en millions de réseaux fonctionnels. Chaque neurone possède un *axone*, un *corps cellulaire*, des *dendrites* qui reçoivent des informations des autres neurones et des terminaisons *axonales* qui émettent des informations vers les autres neurones. La figure B3.1 représente le schéma simplifié d'un neurone biologique.



*Figure B3.1 : Neurone biologique [23]*

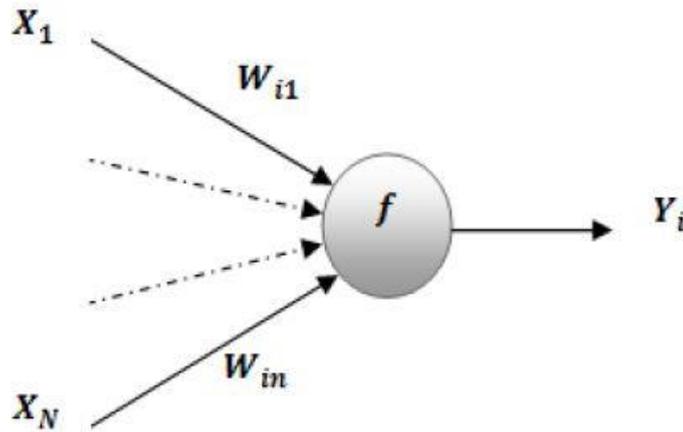
Les neurones sont reliés entre eux par des axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Ce processus de communication entre neurone se fait par voie électrochimique au niveau des synapses par des neurotransmetteurs.

Les RNB sont aussi un modèle pour les RNA que les informaticiens cherchent plus ou moins à imiter, notamment dans le domaine de l'IA.

### ➤ *Neurone formel*

*Un neurone est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeur bornée.*

Il est commode de présenter graphiquement un neurone comme indiqué dans la figure B3.2.



*Figure B3.2 : Représentation graphique d'un neurone artificiel [23]*

Ce modèle non linéaire appelé suivant les auteurs : neurone artificiel, processeur élémentaire, cellule ou automate cellulaire reçoit des informations provenant de  $N$  processeurs  $P_j, j = 1, \dots, N$ , et délivre un signal de sortie  $Y_i$ . Les  $N$  signaux d'activation  $X_j, j = 1, \dots, N$ , provenant des neurones externes multipliée par des coefficients de pondération appelé poids de connexions synaptique  $W_{ij}$ . Ces coefficients représentent le niveau de relation entre les neurones artificiels. Les poids de connexion synaptiques  $W_{ij}$  représentent la mémoire de neurone artificiel.

A l'aide d'une fonction d'entrée totale booléenne, linéaire, ou affine, le neurone artificiel élabore le signal d'entrée total à partir de ces  $N$  signaux d'activation. La sortie  $Y_i$  de neurone artificiel  $P_i$  qui servira ensuite à exciter les autres neurones qui lui sont connectés est calculée à l'aide d'une fonction de transfert  $f_i$ .

$$Y_i = f_i(S_i) \quad (\text{B3.1})$$

$$\text{Ou } S_i = \sum_{j=1}^{i=N} W_{ij} X_j - W_{i0} \quad (\text{B3.2})$$

$S_i$  : La valeur d'activation dans le cas d'une fonction d'entrée de type affine et  $W_{i0}$  est appelé le signal d'inhibition de neurone et on obtient la fonction linéaire si  $W_{i0} = 0$

## ANNEXE B4 :

## RESEAUX DE PETRI [25]

Les réseaux de Petri (RdP) permettent de construire des modèles graphiques de systèmes logiques. Ils constituent un outil riche en termes de propriétés et de résultats analytiques. Par rapport à d'autres modèles, leur principal avantage est de proposer une modélisation graphique simple, et qui permet de plus, l'utilisation d'une algèbre mathématique (algèbre linéaire usuelle ou algèbre des dioïdes) pour l'analyse du système étudié. On constate alors qu'ils forment un outil puissant qui permet d'utiliser des techniques algébriques qui dépendent peu du modèle sous-jacent avec des considérations plus structurelles pour établir certains résultats.

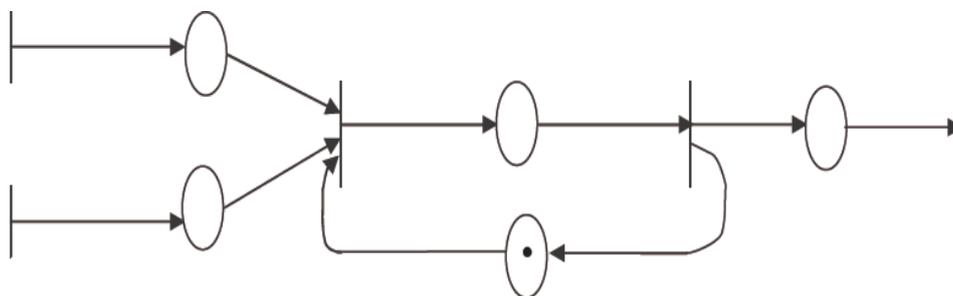
Les réseaux de Petri constituent un formalisme bien adapté à la modélisation de systèmes discrets qui permet d'inclure de façon naturelle leurs modes de fonctionnement. Plusieurs classes de réseaux de Petri ont été utilisées pour la description de ce formalisme graphique et ses quelques définitions ainsi que son principe de fonctionnement.

➤ **Définition B3.1 :**

Un réseau de Petri est un graphe biparti fait de deux types de sommets : places (représentées par des cercles) et *transitions* (représentées par des barres). Des arcs orientés relient certaines places à certaines transitions, ou certaines transitions à certaines places (voir *Figure B3.1*).

A chaque arc on associe un *poids* (entier positif). On associe un poids (entier positif). On associe 1 par défaut aux arcs sur lesquels il ne figure aucun poids.

Dans un RdP, le nombre de *places* (resp. de *transitions*) est fini, et non nul. Chaque place, peut contenir un ou plusieurs jetons (représentés par des points) qui modélisent la dynamique du système.



*Figure B3.1 : Exemple de réseaux de Petri [25]*

➤ **Définition B3.2 :**

Un graphe d'événements (GE) est une classe des RdP pour laquelle :

- Chaque place a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie ;
- Tous les arcs orientés place-transition ou transition-place sont pondérés à 1.

Dans le cas où on associe aux places (resp. aux transitions du modèle) des entiers, appelés par la suite *temporisations*, le graphe d'événements sera appelé graphe d'événements P-temporisés (resp. T-temporisés). Dans notre étude, nous allons nous intéresser à la classe graphe d'événements P-temporisés que nous appelons tout simplement graphes d'événements temporisés (GET).

Dans la suite, nous considérons les notations suivantes :

${}^*T$  : L'ensemble des places amont de la transition T, ou encore l'ensemble des places P telles que  $(P, T) \in A$  ;

$T^*$  : L'ensemble des places aval de la transition T, ou encore l'ensemble des places P telles que  $(T, P) \in A$  ;

$P$  : l'ensemble des transitions d'entrée de la place P, ou encore l'ensemble de transitions T telles que  $(T, P) \in A$  ;

$P^*$  : L'ensemble des transitions de sortie de la place P, ou encore l'ensemble de transitions T telles que  $(P, T) \in A$ .

---

## ملخص

في هذا العمل، حاولنا تقديم تشخيص بناءً على طريقة شجرة الاعطال لضغط طرد مركزي من النوع BCL 406، يسمح إنشاء شجرة الاعطال ببناء شبكة بيازية. وهذا الاخير يجعل من الممكن تقييم حالة مستقبلية من معرفة الحالة الحالية. يتم توضيح المحاكاة والتقييم بواسطة تطبيق مخصص لهذا النهج في حالة صناعية باستخدام برنامج Netica. **كلمات مفتاحية:** تشخيص، شجرة الأعطال، شبكة بيازية، احتمال.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons essayé de présenter un diagnostic basé sur la méthode de l'arbre de défaillance pour un compresseur centrifuge de type BCL 406, la construction d'un arbre de défaillance permet de construire un réseau bayésien. Ceci permet d'évaluer la situation future à partir de la connaissance de la simulation actuelle et l'évaluation par une application dédiée à cette approche est illustrée dans un cas industriel en utilisant le logiciel Netica.

**Mots clés :** Diagnostic ; Arbre de Défaillance ; Réseau Bayésien ; Probabilité.

## Abstract

In this work, we have tried to present a diagnosis based on the fault tree method for a centrifugal compressor type BCL 406, the construction of a fault tree allows to build a Bayesian network. This allows evaluating the future situation from the knowledge of the current simulation and the evaluation by an application dedicated to this approach is illustrated in an industrial case using the Netica software.

**Keywords:** Diagnoses; Fault Tree; Bayesian Network; Probability.

---