

Département de Génie Mécanique

Thème :

Application de l'arbre de défaillance
« Fault-tree » pour le système du ballon
à vapeur au niveau de l'unité Production
Ammoniac



Soutenance de Master 2
En Maintenance Industrielle
et
Fiabilité Mécanique

Présenté par : Mr Kassas Bachir

Encadreur : Mr SARI M/R -----professeur

Les Membres de jurer :

- Mr Khelif R : professeur-----président
- Mr Sari M/R : Professeur-----Membre
- Mr Bourenane R : Docteur-----Membre

Année : 2016-2017

TABLE DES MATIERES REMERCIEMENTS

- Remerciement-----	4
- Dédicace-----	5
- Résumé-----	6
- Introduction générale-----	7
- Chapitre 1 : Arbre de Défaillance et Fiabilité des Systèmes Technologique-----	8
• 1.1 Arbre de Défaillance Add-----	9
• 1.1.1 Définition-----	9
• 1.1.2 Formalisme-----	9
• 1.1.3 Modélisation-----	9
• 1.1.4 Méthodologie-----	9
• 1.1.5 Généralité Arbre de Défaillance-----	9
• 1.1.5.1 Introduction-----	9
• 1.1.5.2 Utilités des arbres de Défaillance-----	10
• 1.1.5.3 Représentation de la Méthode de L'arbre de défaillance-----	10
• 1.1.5.4 Méthodologie de la Méthode arbre de défaillance-----	10
• 1.1.5.5 Analyse qualitative-----	11
• 1.1.5.6 Analyse quantitative-----	11
• 1.1.5.7 Identification de l'évènement-----	11
• 1.1.5.8 Examen du système-----	12
• 1.1.5.9 Construction de l'arbre-----	12
• 1.1.5.10 Symbole graphique-----	14
• 1.1.5.11 Résumé des règles importantes de la construction de l'arbre de Défaillance-----	16
• 1.1.5.12 La cohérence des arbres de défaillance-----	16
• 1.1.5.13 Coupe Minimale-----	16
• 1.1.5.14 Quantification avec des probabilités fixe-----	17
• 1.1.5.15 Quantification avec des probabilités en fonction du temps--	17
• 1.1.5.16 Sensibilité, Facteurs d'importance -----	18
• 1.1.5.17 Conclusion-----	19
- Chapitre 2 : La Maintenance des Installations Technologiques-----	21
• 2.1 Concept de la Maintenance-----	22
• 2.1.1 Définition-----	22
• 2.1.2 Historique-----	22
• 2.1.3 les Formes de la Maintenance-----	23
• 2.1.3.1 Différents type de Maintenance-----	23
• 2.1.3.2 Définition selon la Norme NF – EN 13306-----	23
• 2.1.3.3 Les niveaux de Maintenance-----	24
• 2.1.3.4 Stratégie de la Maintenance-----	25
• 2.1.3.5 les différents Indicateurs de la Maintenance-----	28

-	Chapitre 3 :L'Unité de Production Ammoniac Annaba-----	36
•	3.1 Généralité et procès-----	37
•	3.2 Classes des équipements installés	37
•	3.3 Description des étapes de circulation et du procédé-----	39
•	3.4 Production de vapeur dans le ballon 101- F-----	45
•	3.5 Schéma d'Intégration du circuit ballon à vapeur-----	46
•	3.6 Caractéristique technique-----	47
•	3.6.1 Caractéristique technique du ballon101-F -----	47
•	3.6.2 Caractéristique technique du ballon101-U -----	47
•	3.7 Système de régulation du ballon à vapeur-----	47
•	3.7.1 Liste des composants du système de régulation-----	48
•	3.7.2 Fonctionnement du système de régulation-----	48
•	3.7.3 Schémas de principe du système régulation-----	49
•	3.7.4 <i>Les causes de perte d'eau d'alimentation</i> -----	50
•	3.8 Circuit eau d'alimentation ballon-----	51
•	3.9 Caractéristique du groupe Motopompe-----	51
•	3.10 Caractéristique du groupe Turbopompe-----	51
•	3.11 Type de construction des pompes -----	51
•	3.12 Accessoires pompes-----	52
•	3.13 Système de régulation-----	53
•	3.14 Précaution à prendre durant le démarrage des pompes-----	53
•	3.15 le préchauffage des pompes-----	54
•	3.16 Dispositif d'équilibrage-----	54
•	3.17 Contrôle à effectuer en exploitation-----	54
•	3.18 Condition à respecter avant le démarrage-----	55
•	3.18.1 Démarrage en eau froide-----	55
•	3.18.2 Démarrage en eau chaude-----	55
-	Chapitre 4 : Description du Système ballon à vapeur 101-F-----	56
•	4.1 Application de la Méthode Arbre de Défaillance-----	57
•	4.1.1 Définition du système à étudier -----	57
•	4.1.2 Fonctionnement du système à étudier-----	57
•	4.1.3 Enoncé de la défaillance-----	57
•	4.1.4 Etude du système -----	58
•	4.1.5 Reconnaissances des causes « Evènements » possibles -----	58
•	4.1.6 Construction de l'Arbre de Défaillance-----	59
•	4.1.7 Traitement qualitatif du système-----	59
•	4.1.7.1 Codage de l'arbre de défaillance-----	59
•	4.1.7.2 Equation booléenne-----	60
•	4.1.8 Réduction de l'équation booléenne-----	61
•	4.1.9 Chemin critique (coupe minimale) -----	62

- 4.1.10 Ordre des coupes minimales----- 62
- 4.1.11 Tableau du nombre d'apparition des évènements-----62
- 4.2 Traitement quantitatif-----63
- 4.2.1 quantification des probabilités des évènements-----63
- 4.2.2 Calcul de la probabilité de l'évènement redouté -----64
- 4.3 Tableau de synthèse -----65
- Interprétation des résultats-----66
- Recommandation----- 66
- Conclusion Générale----- 67
- Bibliographie-----68

Remerciement

Je tiens à remercier mon encadreur de ces précieux conseils tout au long de l'élaboration de mon mémoire de fin d'étude ainsi que l'ensemble des membres du Département Génie Mécanique.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants, que j'ai fréquenté durant mes études en Master 2 pour leur sacrifice qu'ils ont démontré et leur patience à nous faire apprendre la science et la technique.

Je tiens aussi à remercier Mr Djaballah du service de scolarité de son appui et aide qu'il nous a porté durant toute l'année des études.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, ma femme et mes enfants pour leur encouragement qu'ils m'ont manifesté durant toute l'année ainsi que de leur sacrifice qu'ils m'ont prouvé.

Je dédie aussi ce travail à mes frères et sœurs et membres de familles qui sont nombreux, ainsi que de leur sympathie et encouragement

Résumé du projet :

Mon projet de mémoire consiste en une analyse de la fiabilité du système de production de la vapeur vers le ballon 101-F. Le choix de ce circuit est fondé sur l'importance et le degré de criticité qu'il représente dans la continuité de la production de l'ammoniac, car la perte du maintien de niveau d'eau au ballon à vapeur provoque l'arrêt immédiat de l'unité ammoniac. Cet arrêt a de graves conséquences tant économiques que psychologiques des travailleurs (installation en état de détresse).

Introduction générale

Les activités industrielles et humaines font presque quotidiennement les grands titres des actualités avec leurs cortèges d'incidents, d'accidents ou d'évènements catastrophiques. En effet, le zéro défaut ou le risque zéro n'existe malheureusement pas pour les activités industrielles à cause de l'occurrence de défaillances humaines ou matérielles.

Toutefois, pour tenter de réduire les risques à un niveau le plus faible possible et acceptable, des méthodes, des techniques et des outils scientifiques ont été développés dès le début du XXème siècle pour évaluer les risques potentiels, prévoir l'occurrence des défaillances et tenter de minimiser les conséquences des situations catastrophiques lorsqu'elles se produisent.

Dans un grand nombre d'applications industrielles, une demande croissante est apparue en matière de remplacement des politiques de maintenance curative par des stratégies de maintenance préventive.

Cette mutation d'une situation où on « subit les pannes ou les défaillances » à une situation où on « maîtrise les pannes ou les défaillances », nécessite des moyens technologiques ainsi que la connaissance de techniques d'analyse appropriées.

L'ensemble de ces développements méthodologiques à caractère scientifique représente, à l'aube du troisième millénaire, la discipline de la sûreté de fonctionnement.

La sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes technologiques et les défaillances humaines.

Cette sûreté de fonctionnement sera de qualité si la maintenance associée est de qualité tant sur le plan Humain que Technologique.

Et c'est dans cette optique et état d'esprit, que nous voulons appliquer une des méthodes d'analyse des équipements Industriels à savoir : Arbre de Défaillance –AdD- «Fault tree ».

Le présent mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre est exposé la théorie fondamentale de la méthode Arbre de défaillances.

Le second chapitre est principalement consacré à l'exposition des concepts de base de la maintenance. Une attention particulière est dédiée à la fiabilité, disponibilité et maintenabilité.

Le troisième chapitre présente d'une manière détaillée l'unité d'ammoniac et le système étudié.

L'application de la méthode (ADD) sur le système ballon à vapeur est détaillée dans le quatrième chapitre.

Nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre 1

Arbre de Défaillance et Analyse de la Fiabilité des Systèmes Technologiques

1.1 Arbre de défaillances «AdD» (FaultTree « FT » en anglais) [13] :

1.1.1 Définition :

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 statique¹.

1.1.2 Formalisme :

Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'évènements qui permettent la réalisation d'un évènement indésirable **prédéfini** (appelé communément évènement redouté « **ER** »).

La représentation graphique met donc en évidence les relations causes à effet.

1.1.3 Modélisation :

Cette technique est complétée par un traitement mathématique qui permet la combinaison des défaillances simples ainsi que de leur probabilité d'apparition. Elle est basée sur l'algèbre de Boole relative à la théorie des ensembles.

Elle permet ainsi de quantifier la probabilité d'occurrence d'un évènement indésirable. Egalement appelé « évènement redouté ».

1.1.4 Méthodologie :

L'arbre de défaillance est formé de niveaux successifs d'évènements qui s'articulent par l'intermédiaire des portes (initialement logique).

En adoptant cette représentation et la logique déductive (**allant des effets vers les causes**) et booléenne, il est possible de remonter d'effets en causes de l'évènement indésirable à des évènements de base indépendants entre eux et probabilistes.

1.1.5 Généralités et description de l'arbre de défaillance :

1.1.5.1 Introduction :

Lorsqu'il s'agit d'étudier les défaillances d'un système, l'arbre de défaillance s'appuie sur une analyse dysfonctionnelle d'un système à réaliser préalablement : une analyse des modes de défaillances et de leurs effets (**AMDE**). Cette méthode inductive allant des causes aux effets apparaît donc comme préalable à la construction d'un arbre de défaillance puisque l'identification des composants et de leurs modes de défaillance est généralement utilisée au dernier niveau d'un arbre.

L'analyse par arbre de défaillance et le diagramme de fiabilité sont des méthodes pratiques à condition que les évènements de base soit faiblement dépendant. Dans le cas contraire, ces techniques deviennent caduques et il est nécessaire d'employer une technique plus appropriée reposant sur un modèle dynamique comme un processus de MARKOV.

¹-Un système statique est un système dont la défaillance ne dépend pas de l'ordre de défaillance de ses composants.

1.1.5.2 Utilités des arbres de défaillances :

Les arbres de défaillances sont utilisés dans l'ingénierie de sûreté des industries « à risque » et peuvent être utilisés comme un outil d'évaluation de la conception, ils permettent d'identifier les scénarios conduisant à des accidents dans les phases amont du cycle de vie d'un système et peuvent éviter des changements de conception autant plus coûteux qu'ils sont tardifs.

Ils peuvent aussi être utilisés comme un outil de diagnostic, prévoyant la ou les défaillances des composants la ou les plus probables lors de la défaillance d'un système.

1.1.5.3 Représentation de la méthode de l'arbre de défaillances :

- la ligne la plus haute ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire comment il peut se produire.
- Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées.
- Les relations sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « portes OU » et des « portes ET ».

1.1.5.4 Méthodologie de la méthode arbre de défaillances :

Démarche: L'arbre de défaillance est une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un évènement unique intitulé évènement redouté.

Le point de départ de la construction de l'arbre est l'évènement redouté lui-même (également appelé évènement du sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifier. A partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs évènements du niveau inférieur.

La démarche est la suivante :

- Pour chaque évènement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des évènements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. Des opérateurs logiques (portes) permettent de définir précisément les liens entre les évènements des différents niveaux.
- Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des évènements en combinaison d'évènements de niveaux inférieurs, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de probabilité d'occurrence de l'évènement analysé.
Ces évènements non décomposés de l'arbre sont appelés évènements élémentaires (ou évènements de bases).

Notons que :

- a) Il est nécessaire que les évènements soient indépendants entre eux.
- b) Leurs probabilité d'occurrence doit pouvoir être quantifiée (condition nécessaire seulement dans le cas où l'arbre est destiné à une analyse quantitative).
- c) Contrairement à l'approche inductive de l'**AMDEC** (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillance permet de focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'évènement redouté.

La construction de l'arbre de défaillance est une phase importante de la méthode car sa complétude conditionne celle de l'analyse qualitative ou quantitative qui sera réalisée par la suite.

1.1.5.5 **Analyse qualitative** :

L'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés :

1. 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.
2. 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.

1.1.5.6 **Analyse quantitative** :

Une étude probabiliste peut avoir deux objectifs :

1. L'évaluation rigoureuse de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté.
2. Le tri de scénarios critiques (en partant des coupes minimales de plus fortes probabilités).

Ces calculs ne peuvent se concevoir que si chaque évènement élémentaire peut être probabilisé à partir d'une loi soigneusement paramétrée et de la connaissance du temps de mission associé à l'évènement redouté et / ou à l'aide de données issues du retour d'expérience.

1.1.5.7 **Identification de l'évènement** :

L'identification de l'évènement redouté est absolument essentielle à l'efficacité et à la pertinence de la méthode. Il correspond le plus souvent à un évènement catastrophique en termes humain, environnemental ou économique. Il peut s'avérer nécessaire parfois de caractériser l'évènement redouté pour chacune des missions du système étudié.

Il existe plusieurs méthodes permettant de procéder à l'identification des évènements redoutés. L'analyse préliminaire des risques (APR), est utilisée dans la plupart des industries.

La méthode HAZOP, pour Hazard and Operability Study, est plus particulièrement adaptée aux industries de procédés comme la pétrochimie. Enfin, une analyse des modes de défaillance et de leurs effets sur le système (AMDE) peut également s'avérer efficace.

1.1.5.8 Examen du système :

Lors d'une analyse fiabiliste d'un système, il est toujours difficile de délimiter précisément les contours de l'étude. L'analyste doit pour cela se poser certain nombre de questions incontournables du type :

1. Quelles sont les intentions de l'analyse ?
2. Quelles sont les limites ?
3. S'agit-il de maîtriser une prise de risque relative à la sécurité des personnes ou de comparer différents dispositifs ?
4. L'objectif est-il de démontrer la conformité à des normes officielles et/ou à des spécifications imposées par le client ?

Avant d'entamer la construction de l'arbre de défaillance proprement dite, les analystes chargés de l'étude doivent acquérir au préalable une très bonne connaissance de l'ensemble du système et de sa fonction. Ils doivent s'appuyer pour cela sur l'expérience des ingénieurs et techniciens chargés des opérations sur le terrain.

Il est également nécessaire de délimiter précisément l'étude à différents niveaux :

5. Natures des événements pris en compte ;
6. équipements impliqués ou non dans la fonction du système ;
7. Importance de l'environnement, etc.

Afin d'être complet et rigoureux, l'examen du système doit couvrir obligatoirement chacun des thèmes suivants :

1. La description du système (éléments et sous-systèmes inclus dans l'étude et éléments exclus).
2. La définition de la mission (spécification du système, phase de divers missions, procédure de maintenance et de réparation, reconfiguration possible...)
3. L'analyse de l'environnement ;
4. L'identification des événements à prendre en compte : étendue donnée à l'étude (par exemple : prise en compte des conséquences des erreurs humaines, des problèmes de transport de pièces ou de personnel...)

1.1.5.9 Construction de L'arbre :

Cette construction est détaillée dans plusieurs normes industrielles dont la norme **CEI 61025**.

1. **Evènement sommet (évènement indésirable) :**

La première étape réside dans la définition de l'évènement à étudier d'une façon explicite et précise, cet évènement est appelé sommet, ou encore évènement redouté. Cette étape est cruciale quant à la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse. L'arbre de défaillance se veut être une représentation synthétique ; le libellé de l'évènement devra être bref, mais aussi évocateur que possible dans la boîte qui le représente dans l'arbre, on lui associe un texte complémentaire apportant toutes les précisions utiles sur la définition de l'évènement.

Cette remarque est aussi valable pour tous les éléments qui vont figurer dans l'arbre.

2. Évènement intermédiaires :

L'évènement sommet étant défini, il convient de décrire la combinaison d'évènements pouvant conduire à cet évènement sommet. Les évènements intermédiaires sont des évènements moins globaux. Une fois un évènement défini, ils seront liés à l'évènement sommet via un connecteur. Ces évènements intermédiaires peuvent être, à leur tour, redéfinis par d'autres évènements intermédiaires plus détaillés.

3. Évènements de base, transfert et conditions :

Il est possible de prendre en compte des évènements sur lesquels les informations sont insuffisantes pour les décomposer davantage ou encore qu'il n'est pas utile de développer plus, ces évènements sont appelés évènements non développés. Lors de la construction de gros arbres de défaillances, il est pratique d'utiliser des portes de transfert, permettant ainsi de rendre la lecture et la validation de l'arbre plus aisée. Ces portes signalent que la suite de l'arbre est développée sur une autre page. Les évènements de bases sont les évènements les plus fins de l'arbre, il ne sera pas possible de les détailler davantage ; ils concernent la défaillance (électrique, mécanique, logiciel...) d'un élément du système.

L'apparition de certains évènements (de base ou autres) peut avoir une conséquence à certaines conditions. Nous sommes donc conduits à introduire dans l'arbre des conditions dont la réalisation conditionne l'enchaînement. Ces conditions interviennent dans la construction de l'arbre comme des évènements intermédiaires, à l'exception que ces conditions ne sont plus décomposées donc « de base ».

4. Connecteurs logiques :

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

Les connecteurs fonctionnent comme suit :

- OU : l'évènement en sortie/supérieur survient si, au moins, un des évènements en entrée/inférieur survient/est présent ;
- ET : l'évènement en sortie/supérieur survient seulement si tous les évènements en entrée/inférieur surviennent/sont présents ;
- K/N : c'est un vote majoritaire : l'évènement en sortie/supérieur survient si au moins **K** (c'est un entier qui sert à paramétrer le comportement de la porte) parmi les **N** évènements en entrée/inférieur surviennent/sont présents. Cette porte généralise les deux précédentes : une porte **OU** est une porte **1/N** et une porte **ET** est une porte **N/N**.

L'utilisation exclusive des trois connecteurs mentionnés ci-dessus permet de rester dans le cadre des arbres de défaillances cohérents, et **c'est en pratique ce qui est fait le plus souvent**.

Dans certaines situations, il est nécessaire d'introduire des non cohérences avec des connecteurs **NON**, **OU exclusif** (réalisé si une et une seule de ses entrées est réalisée) ...etc. mais cela rend le **traitement mathématique plus complexe**.

Enfin, il peut être pratique à des fins descriptives d'utiliser des connecteurs plus complexes, comme des connecteurs voteurs, conditionnels... Ces connecteurs permettent de traduire des

comportements particuliers qu'il est possible de rencontrer dans certaines architectures. Au même titre, une dimension temporelle peut être nécessaire pour traduire le comportement d'un système, pour cela il existe des connecteurs ET séquentiels prenant en compte le séquençage des événements, des connecteurs SPARE prenant en compte des lots de rechanges, etc. l'utilisation de ces connecteurs peut conduire à des modèles dont la signification mathématique est ambiguë et est interprétée différemment suivant les outils informatiques dans lesquels ils sont saisis.

1.1.5.10 Symbole graphique :

Les symboles de base utilisés dans les arbres de défaillance sont classés en plusieurs types :

- Evènements ;
- Portes ;
- Symboles de transfert.

(Dans les logiciels permettant d'éditer des arbres de défaillances on pourra constater des variations mineures). Les différents symboles utilisés sont regroupés dans les tableaux 1 et 2.

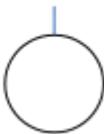
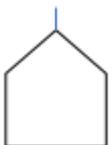
Symbole	Nom	Description
	Evènement de base	Evènement du plus bas niveau pour lequel la probabilité d'apparition ou d'information de fiabilité est disponible
	Evènement maison	Evènement qui doit se produire avec certitude lors de la production ou de la maintenance. On peut aussi le définir comme un évènement <u>non- probalisé</u> , que l'on doit choisir de mettre 1 ou 0 avant tout traitement de l'arbre. Ce type d'évènement permet d'avoir plusieurs variantes d'un arbre sur un seul dessin, en modifiant la logique de l'arbre selon la valeur choisie par l'utilisateur
	Evènement non développé	Le développement de cet évènement n'est pas terminé, soit parce que ses conséquences sont négligeables, soit par manque d'information.

Tableau 1 Symboles des évènements dans les arbres de défaillances

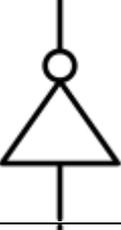
Symbole	Nom	Description	Nombre d'entrées
	OU (OR)	L'évènement de sortie apparait si au moins un des évènements d'entrées apparait	>1
	ET (AND)	L'évènement de sortie apparait si tous les évènements apparaissent	>1
	NON (NOT)	L'évènement de sortie apparait si l'évènement d'entrée n'apparait pas. L'état logique de la sortie est l'inverse de celui d'entrée.	=1
	OU Exclusif (XOR)	L'évènement de sortie apparait si un seul évènement d'entrée apparait.	>1
	Vote Majoritaire	L'évènement de sortie apparait si au moins K évènements d'entrées apparaissent ($K < n$)	>1

Tableau 2 Symboles des portes dans les arbres de défaillances

Les principaux traitements que l'on peut faire à partir de la fonction booléenne sont les suivants :

- ❖ L'énumération des coupes minimales
- ❖ Le calcul des facteurs d'importance structurelle. Très peu utilisés en pratique, ils visent à donner des indications du même ordre que les facteurs d'importance calculés avec des probabilités, lorsque celles-ci ne sont pas disponibles.

Une grande variété d'algorithmes permettant de faire ces traitements

1.15.11 **Résumé des règles importantes de la construction de l'arbre de défaillance :**

1. Partir de l'évènement redouté (sommet de l'arbre),
2. Imaginer les évènements intermédiaires possibles expliquant l'évènement sommet,
3. Considérer chaque évènement intermédiaire comme un nouvel évènement sommet,
4. Imaginer les causes possibles de chaque évènement au niveau considéré,
5. Descendre progressivement dans l'arbre jusqu'aux évènements de base.

Il est important de ne pas considérer immédiatement les évènements de bases (panne d'un composant par exemple).

1.1.5.12 **La cohérence d'un arbre de défaillances :**

Une propriété très importante du point de vue pratique est ce qui est appelé la cohérence d'un arbre de défaillances.

1.1.5.12.1 **Définition :**

Un arbre de défaillances est cohérent si :

- Il n'existe aucun état du système, tel qu'à partir de cet état la défaillance d'un composant (formellement, cela correspond au passage de la valeur zéro à la valeur un pour la variable X_i correspondante) peut réparer le système (formellement, cela correspond au passage de la valeur un à la valeur zéro pour la fonction F),
- La fonction F dépend effectivement de toutes les variables X .

Une façon très simple d'assurer par construction la cohérence d'un arbre de défaillance est de le **construire uniquement avec des portes ET, OU, K/N**. C'est ce qui est fait dans la grande majorité des applications pratiques des arbres de défaillances.

Lorsqu'un arbre de défaillances est cohérent, sa fonction F admet une représentation canonique qui s'écrit comme la disjonction logique de ses coupes minimales.

1.1.5.13 **Coupe minimale :**

Une coupe d'un arbre de défaillances cohérent est un ensemble de défaillances de composants tel que lorsque ces défaillances sont simultanément présentes, l'évènement sommet de l'arbre est réalisé. Plus généralement, la notion de coupe est définie pour l'ensemble des systèmes statiques.

1.1.5.13.1 **Définition :**

Une « coupe minimale » d'un arbre de défaillances cohérent est une coupe comportant un nombre minimal d'évènements défaillants. Autrement dit, dès qu'on enlève une défaillance de la coupe, n'importe laquelle, l'ensemble des défaillances restantes ne suffit plus à provoquer l'évènement sommet. Une seconde propriété des coupes minimales est qu'elles ne peuvent contenir aucune autre coupe. La cohérence du système considéré permet alors de garantir que tout ensemble d'évènements de base contenant cette coupe minimale est également une coupe. L'ensemble des coupes minimales est suffisant pour représenter la défaillance du système, le calcul de cet ensemble peut être réalisé par minimisation de la fonction F .

La notion de coupe minimale admet une généralisation appelée "**impliquant premier**" pour les arbres non cohérents. Cette notion étant peu utilisée en pratique, elle n'est pas décrite dans ce chapitre.

1.1.5.13.2 Cardinal ou Ordre des coupes minimales :

Il est particulièrement intéressant de considérer le cardinal (on dit aussi : ordre) des coupes minimales, autrement dit le nombre minimal d'événements élémentaires nécessaires à produire l'événement sommet de l'arbre.

En particulier pour les systèmes critiques, des règles du type « **il faut la combinaison d'au moins trois événements indépendants pour créer la situation dangereuse** » sont autant, voire plus opérationnelles que des exigences exprimées en probabilités.

Les coupes minimales ayant le plus petit cardinal définissent le nombre minimum d'événements dont l'occurrence simultanée peut provoquer l'événement sommet ; dans un contexte de « **défense en profondeur** », c'est le **nombre de barrières**.

Les coupes minimales d'ordre un représentent tous les événements de base qui à eux seuls produisent l'événement indésirable

1.1.5.14 Quantification avec des probabilités fixes :

Ce qui fait la puissance des arbres de défaillances, et, plus généralement des « méthodes booléennes » en sûreté de fonctionnement est l'hypothèse d'indépendance globale des événements. Les principaux traitements que l'on peut faire à partir d'un arbre de défaillances muni de probabilités sont les suivants :

- ❖ L'énumération des coupes minimales ou impliquant premiers associés à leurs probabilités. La possibilité de les quantifier permet de ne lister que ceux dont la probabilité dépasse un certain seuil, ce qui est une façon efficace de limiter l'explosion combinatoire à laquelle peut conduire ce type de traitement ;
- ❖ Le calcul de la probabilité de l'événement redouté $F=1$ (qui s'identifie avec l'espérance mathématique de F).
- ❖ Le calcul de divers facteurs d'importance associés aux événements de base.

1.1.5.15 Quantification avec des probabilités fonction du temps :

En donnant à la valeur 1 de la variable la signification "le ième composant est défaillant à l'instant t", on peut réaliser une série de calculs de la probabilité de l'événement de tête de l'arbre à des instants différents. C'est ainsi que l'on peut calculer l'indisponibilité d'un système en fonction du temps. Par exemple, dans le cas très courant où la durée de vie (aléatoire) d'un composant (le temps avant sa défaillance) est modélisée par une loi exponentielle de paramètre λ , la probabilité que ce composant soit défaillant avant le temps de mission du système (temps pendant lequel l'occurrence de la défaillance peut se produire) est donnée par :

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$P = \lambda t, (\lambda t) <= 0.1 \quad (1)$$

Cette formule suppose le composant non réparable.

Si au contraire il est réparable, et si on suppose que sa durée de réparation suit une loi exponentielle de paramètre μ , alors sa probabilité d'être défaillant à l'instant t (autrement dit son indisponibilité) est donnée par la formule :

$$[(\lambda_i)/(\lambda_i + \mu_i)][1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}] \quad (2)$$

En supposant que tous les composants du système sont ainsi modélisés, on voit qu'il est facile de calculer la probabilité de défaillance du système complet à l'instant t .

Le calcul des probabilités de tous les événements de base à l'instant t à l'aide des formules (1) ou (2) décrites ci-dessus,

Plus généralement, il existe tout un ensemble de formules analytiques permettant de calculer les probabilités de défaillance des composants en fonction du temps. Ces formules permettent de prendre en compte des hypothèses telles que la possibilité de réparer le composant, de le tester périodiquement, et aussi différents types de lois de probabilité pour les durées de vie des composants. Par exemple, on utilise généralement des lois de Weibull pour modéliser les durées de vie de composants soumis à un phénomène de vieillissement.

Il est important de noter que la technique décrite ci-dessus permet de faire seulement des calculs de disponibilité et pas de fiabilité du système. Toutefois, il se trouve que ces deux notions se confondent pour un système cohérent dont aucun composant n'est réparable.

Dans ce cas, que ce soit au niveau d'un composant ou au niveau du système tout entier, toute panne est définitive, et la probabilité d'être en panne à l'instant t (indisponibilité) est égale à la probabilité d'être tombé en panne avant t (défiabilité).

Lorsqu'on a affaire à un système comportant des composants réparables, un calcul de fiabilité reste possible, mais au prix d'une approximation. Le principe de ce calcul consiste à estimer le taux de défaillance du système à différents instants compris entre 0 et t , puis à calculer la fiabilité $R(t)$ à l'instant t par la formule d'intégration du taux de défaillance ci-dessous :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(u) du}$$

L'approximation faite est double : d'une part, dans l'estimation du taux de défaillance, pour lequel il n'existe pas de formule exacte, et d'autre part dans l'intégration numérique de ce taux sur l'intervalle $[0, t]$.

1.1.5.16 Sensibilité, Facteurs d'importance

Les composants constitutifs d'un système peuvent avoir une importance plus ou moins grande pour ce système. Un composant correspondant à un point unique de défaillance sera bien entendu plus important qu'un composant de caractéristiques équivalentes mais mis en parallèle avec d'autres composants.

Sur un système de très petite taille, l'identification de ces composants importants peut se faire par une simple lecture des coupes. Mais pour un système complexe et sûr dont les coupes sont d'ordre élevé, cette lecture est impossible.

C'est pourquoi des facteurs d'importance ont été introduits afin d'établir une hiérarchie des composants. L'importance d'un composant pouvant varier suivant les objectifs recherchés, plusieurs facteurs d'importance ont été créés.

Ci-après, voici cinq facteurs d'importance parmi les plus utilisés :

- a. Birnbaum (aussi appelé facteur d'importance marginal)
- b. Critique
- c. Diagnostic
- d. Facteur d'augmentation de risque
- e. Facteur de diminution de risque

Attention, ces différents facteurs d'importance ne vont pas toujours dans le même “sens”, il peut être difficile d'identifier formellement les composants à améliorer (en les rendant plus fiables, mieux maintenus...). C'est pourquoi il est conseillé de ne pas se fier à un seul facteur d'importance.

1.1.5.17 **Conclusion** :

En conclusion nous pouvons citer les avantages et limites de la Méthode “Arbre de Défaillances” comme suit :

1.1.5.15.1 **Avantages** :

L'analyse par arbre de défaillances est la plus couramment utilisée dans le cadre d'études de fiabilité, de disponibilité ou de sécurité des systèmes. Elle présente en effet un certain nombre d'avantages non négligeables par rapport aux autres méthodes, à savoir :

1. Son aspect graphique tout d'abord, caractéristique particulièrement importante, constitue un moyen efficace de représentation de la logique de combinaison des défaillances. Il participe largement à la facilité de mise en œuvre de la méthode et à la compréhension du modèle. Ainsi, il est un excellent support de dialogue pour des équipes pluridisciplinaires.
2. Le processus de construction de l'arbre basé sur une méthode déductive permet à l'analyste de se focaliser uniquement sur les événements contribuant à l'apparition de l'événement redouté.
3. Une fois la construction de l'arbre terminée, deux modes d'exploitation sont possibles :
 - l'exploitation qualitative servant à l'identification des combinaisons d'événements critiques, la finalité étant de déterminer les points faibles du système;
 - l'exploitation quantitative permettant de hiérarchiser ces combinaisons d'événements suivant leur probabilité d'apparition, et estimer la probabilité de l'événement sommet, l'objectif in fine étant de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention de l'événement redouté.
4. Par opposition aux méthodes de simulation, l'approche analytique offerte par l'arbre de défaillances a l'avantage de pouvoir réaliser des calculs rapides (avantage tout à fait relatif au vu de l'évolution permanente de l'informatique) et exacts.
5. La méthode permet d'estimer la probabilité non seulement de l'événement redouté, mais aussi celle des portes intermédiaires, à partir de celle des événements de base. Il est également possible de faire de la propagation d'incertitudes sur les données d'entrée, et du calcul de facteurs d'importance.
6. La taille de l'arbre de défaillances est proportionnée à la taille du système étudié, et pas exponentielle en fonction de cette taille.

1.1.5.15.1 **Limites** :

L'utilisation de l'arbre de défaillances devient inefficace ou difficilement applicable lorsque les caractéristiques suivantes apparaissent :

1. Dépendance entre les événements

Les calculs de probabilité d'occurrence effectués par le biais de l'arbre de défaillances sont basés sur une hypothèse d'indépendance des événements de base entre eux. Par exemple, la probabilité d'apparition d'un événement de base ne peut pas dépendre de l'apparition d'autres événements de base.

2. Notion d'événements temporisés

L'arbre de défaillances ne rend pas compte de l'aspect temporel des événements. Il ne peut donc considérer ni les dépendances fonctionnelles, ni les états passés. De plus, il ne permet pas de prendre en compte un ordre imposé dans lequel des événements doivent se produire pour induire une défaillance.

3. Système dégradé

L'arbre de défaillances est binaire. Un événement se produit ou ne se produit pas, mais aucune notion de capacité ou d'efficacité ne peut intervenir. Par exemple, une vanne sera considérée comme ouverte ou fermée, mais sans pouvoir déterminer d'état intermédiaire.

4. Taille de l'arbre

La taille n'est pas une limite en soi. Néanmoins dès qu'elle augmente de manière significative, l'arbre doit être divisé en sous-arbres, et la lisibilité ainsi que la compréhension du modèle deviennent alors plus difficiles.

La Maintenance des Installations Technologiques

2.1 Concepts de maintenance ^[1] :

2.1.1 Définition :

Selon la norme **NF-EN 13306**, la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

2.1.2 Historique :

Jusqu'à la fin des années 70, l'entretien était souvent le parent pauvre des services de l'entreprise. Les dirigeants le considéraient uniquement comme un poste de dépenses et ne pensaient qu'à réduire ses coûts.

L'entretien se contentait d'intervenir sur un système défaillant pour relancer la production et effectuait les opérations courantes préconisées par le constructeur.

Il n'y avait donc pas de prise en compte des caractéristiques spécifiques et des conditions de fonctionnement (cadence, ancienneté, température ambiante, etc.) des matériels.

On pouvait donc être conduit à effectuer (sans évaluation à priori ou à posteriori) trop ou pas assez d'entretien.

Les choses ont évolué : la part du coût machine dans le coût de production ne cesse d'augmenter aux dépens de celui de la main-d'œuvre. Ceci est dû à l'automatisation presque systématique des procédés, et à leurs coûts croissants.

Ainsi les arrêts inopinés coûtent cher. Dans ces conditions, la fonction maintenance est devenue stratégique.

Entretenir, c'est subir alors que maintenir, c'est prévoir et anticiper.

Les coûts directs de maintenance sont devenus secondaires voire négligeables par rapport aux coûts indirects (non production, conséquences de la panne).

Pour le gestionnaire, la disponibilité des machines est devenue l'indicateur clé. Parallèlement à cette évolution, la maintenance s'est dotée de méthodes de gestion, d'organisation, d'aide au diagnostic des pannes, de stratégies.

Des techniques d'auscultation sophistiquées se sont développées (analyse vibratoire, analyse des huiles, thermographie IR, etc.). La qualification des techniciens s'est accrue.

La gestion de la maintenance requiert aujourd'hui une spécialisation professionnelle (STS, IUT, écoles d'ingénieurs)

2.1.3 Les formes de maintenance :

2.1.3.1 Différents types de maintenance :

Le diagramme suivant synthétise selon la norme **NF EN 13306** les méthodes de maintenance.

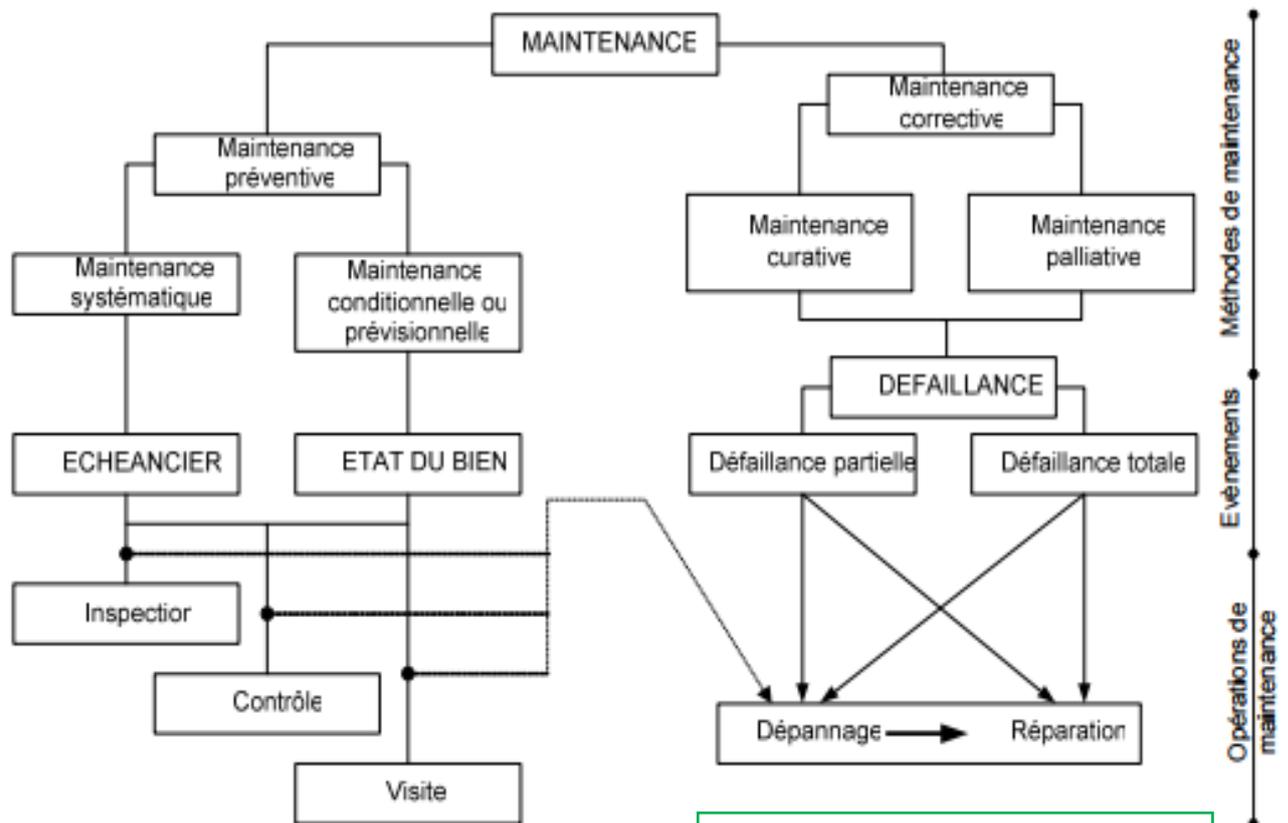


Figure 03 : types de Maintenance [1]

2.1.3.2 Définition selon la norme NF-EN 13306 :

2.1.3.2.1 Maintenance corrective :

Maintenance exécutée après défaillance et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Elle est scindée en deux formes :

- **Maintenance curative** : Réparation
- **Maintenance palliative** : Dépannage

2.1.3.2.2 Maintenance préventive :

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien (EN 13306 : avril 2001). Elle est composée de plusieurs formes :

- **Maintenance préventive systématique**

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (EN 13306 : avril 2001).

- **Maintenance préventive conditionnelle**

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue (EN 13306 : avril 2001).

- **Maintenance préventive prévisionnelle**

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (EN 13306 : avril 2001).

2.1.3.3 Les niveaux de maintenance :

La maintenance et l'exploitation d'un bien s'exercent à travers de nombreuses opérations, parfois répétitives, parfois occasionnelles, communément définies jusqu'alors en **5 niveaux de maintenance**.

Le classement de ces opérations permet de les hiérarchiser de multiples façons. Ce peut être en fonction des critères suivants :

Définir qui fait quoi au regard de chacun des niveaux de maintenance :

- le personnel de production ;
- le personnel de maintenance en tenant compte de la qualification de l'intervenant ;
- le personnel de l'entreprise ou un sous-traitant ;
- une combinaison des 3.



Figure 4 : les Tâches de la Maintenance [1]

Niveaux	Nature de l'intervention	Compétence de l'intervenant	Lieu de l'intervention	Outillage nécessaire à l'intervention	Stock des pièces de rechange
1 ^e	<ul style="list-style-type: none"> • REGLAGE SIMPLES prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture d'équipement. • ECHANGE d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyants, certains fusibles,...) 	Exploitant du bien	Sur place	Instructions d'utilisation sans outillage	Très faible en pièces consommables
2 ^e	<ul style="list-style-type: none"> • DEPANNAGE par échange standard des éléments prévus à cet effet. • OPERATION MINEURES de maintenance préventive (graissage, contrôle de bon fonctionnement...) 	Technicien habilité de qualification (pouvant travailler en sécurité sur une machine présentant certains risques potentiels)	Sur place	Instructions d'utilisation. Outillage portable défini par les instructions de maintenance.	Pièces de rechange nécessaire transportables sans délai et à proximité du lieu d'exploitation
3 ^e	<ul style="list-style-type: none"> • IDENTIFICATION et DIAGNOSTIC des pannes • REPARATIONS par échange de composants ou éléments fonctionnels • REPARATIONS mécaniques mineures. • Toutes opérations courantes de maintenance préventive (réglage général, réaligement...) 	Technicien spécialisé	Sur place ou Local de maintenance	Outillage prévu dans les instructions de maintenance. Appareils de mesure et de réglage. Bancs d'essais et de contrôle des équipements	Pièces approvisionnées par le magasin
4 ^e	<ul style="list-style-type: none"> • Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. • REGLAGE des appareils de mesure utilisés pour la maintenance. • VERIFICATION des étalons de travail. 	Equipe comprenant un encadrement très spécialisé	Atelier spécialisé	Outillage général. Bancs de mesure et étalons. Toute documentation.	
5 ^e	<ul style="list-style-type: none"> • RENOVATION • RECONSTRUCTION ou exécution des réparations importantes 	Constructeur ou Reconstructeur	Atelier central ou Unité extérieure	Moyens proches de la fabrication.	

Tableau 5 : les Niveaux de Maintenance [1]

Les niveaux et les tâches de la maintenance sont donnés par les Tableaux 4 et 5.

2.1.3.4 Stratégies de maintenance :

La stratégie de maintenance, qui résulte de la politique de maintenance, impose des choix pour atteindre, voire dépasser, les objectifs fixés.

Ces choix sont à faire pour :

- développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance ;
- élaborer et optimiser les gammes de maintenance ;
- organiser les équipes de maintenance ;
- internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance ;
- définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.

Il s'agit de décider sur les trois points suivants :

- Quelles méthodes de maintenance mettre en œuvre et sur quels biens ?
- Quels biens **fiabiliser** ?
- Quand remplacer un équipement ?

Avec comme objectifs :

- Augmenter la productivité de l'entreprise et la qualité des produits fabriqués ;
- Améliorer la **sûreté de fonctionnement** des installations, et leur **durabilité** ;
- Augmenter le taux de rendement global des installations ;
- Diminuer les coûts associés à une politique (Coûts directs et indirects, coût global) ;
- Optimiser les stocks de pièces de rechange ;
- Optimiser les méthodes de maintenance mises en place ;

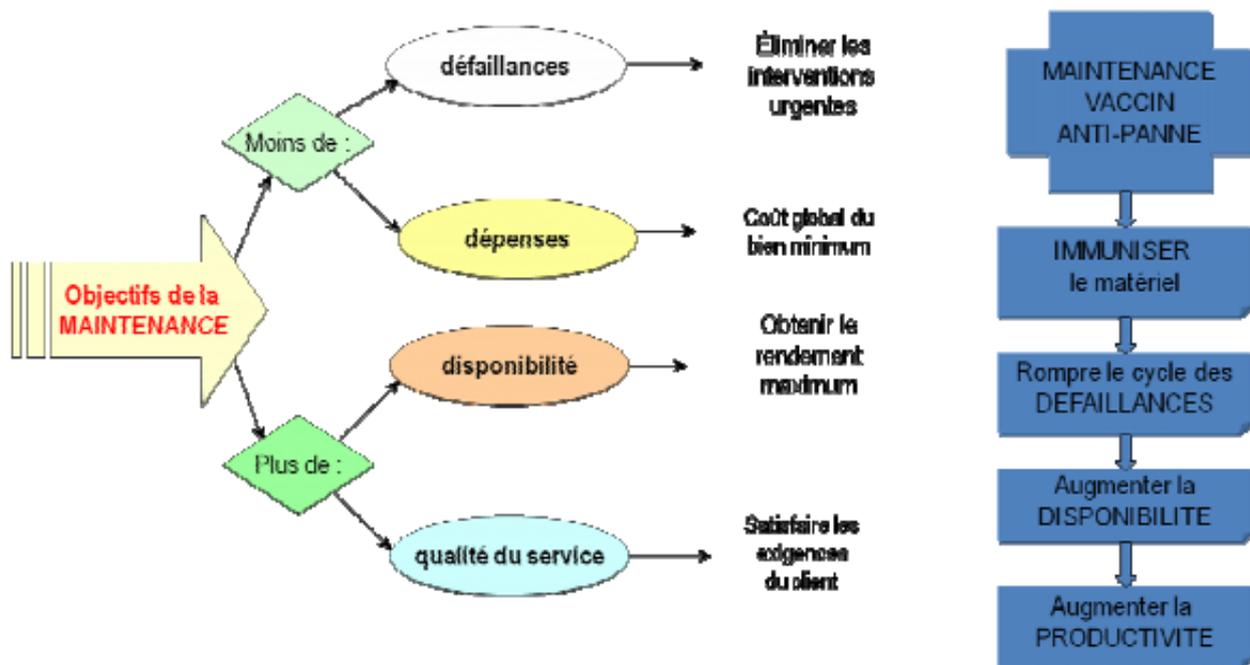


Figure 6 : Les Objectifs de la Maintenance

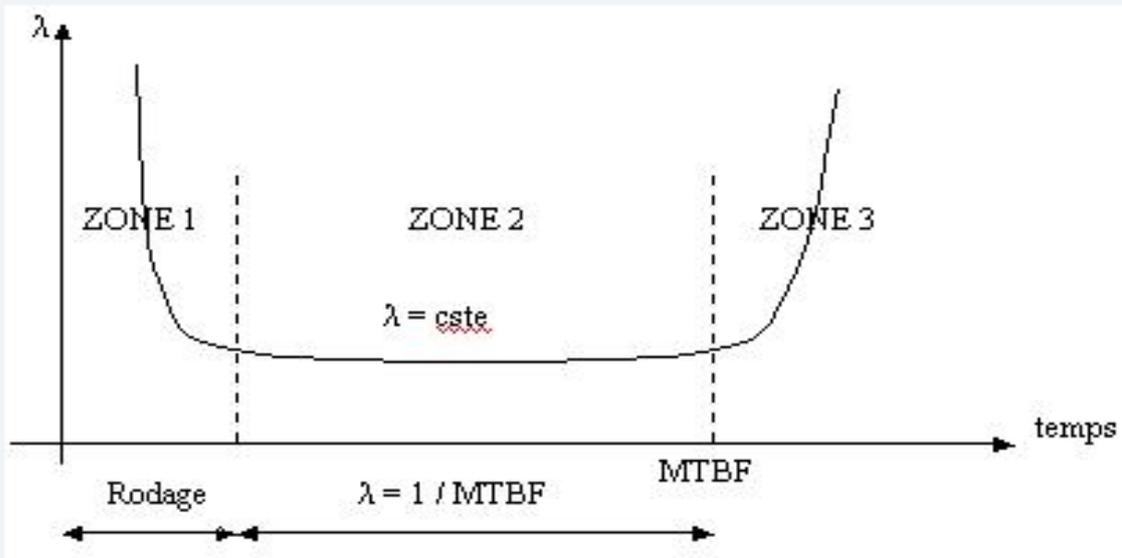


Figure 7 : Niveau optimal de préventif Maintenance [1]

2.1.3.5 Les indicateurs de la maintenance moderne:

2.1.3.5.1 Evolution d'un équipement tout au long de son cycle de vie :

- Zone 1 : période de rodage, les pannes nombreuses au début diminuent
- Zone 2 : période durant laquelle le nombre de pannes est le plus faible
- Zone 3 : période de vieillissement accéléré, le nombre de pannes augmente sans cesse

Aspects économiques

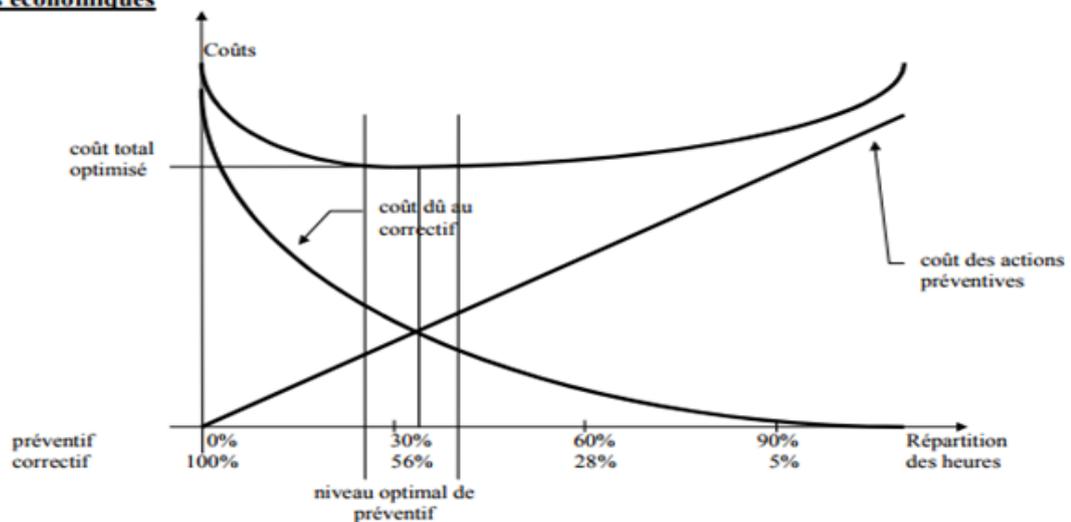


Figure 08 : Courbe en baignoire « cycle de vie d'un équipement » [4]

Durant la période où λ est constant il est opportun de faire de la maintenance conditionnelle. On veille à ne pas « en faire trop ».

4.1.3.5.2 Diagramme de Weil bull [4] :

Permet de savoir dans quelle zone de la courbe du cycle de vie on se trouve: Zone 1, 2 ou 3.

$$R(t) = e^{-(t-\gamma)^\beta / \eta}$$

4.1.3.5.3 Taux de Défaillance(4) :

Taux de défaillance désigné communément par : $\lambda(t)$

Son unité est [pannes / heure]

Le taux de défaillance est fourni par les constructeurs mais on peut le définir par exploitation des historiques de pannes. Il se calcule comme suit :

$$\lambda(t) = \frac{\text{Nombre de pannes}}{\text{Nombre d'heures de pannes fonctionnement}}$$

4.1.3.5.3.1 Présentation du taux de défaillance [5] :

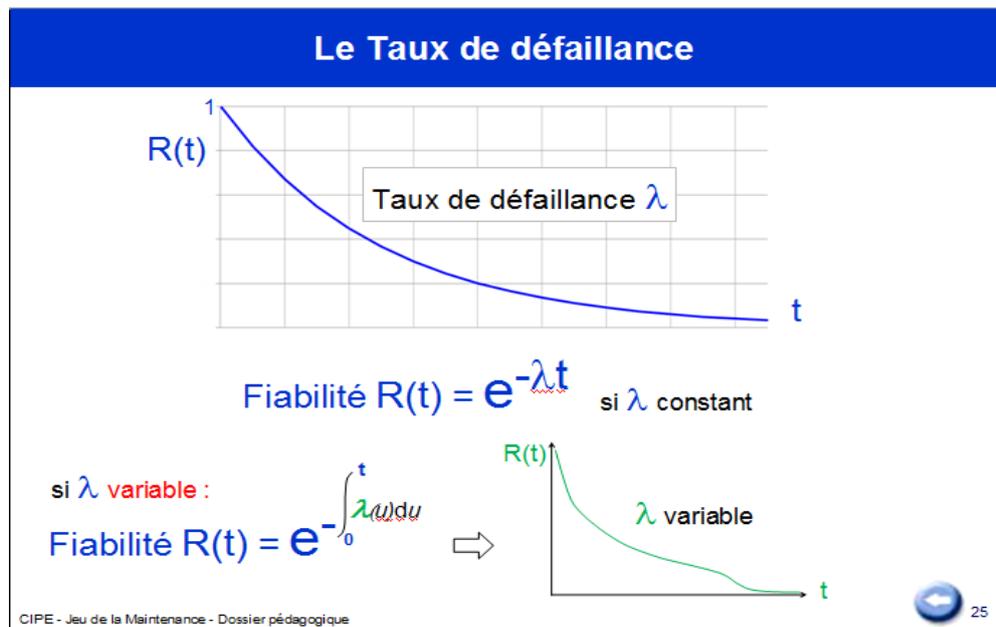
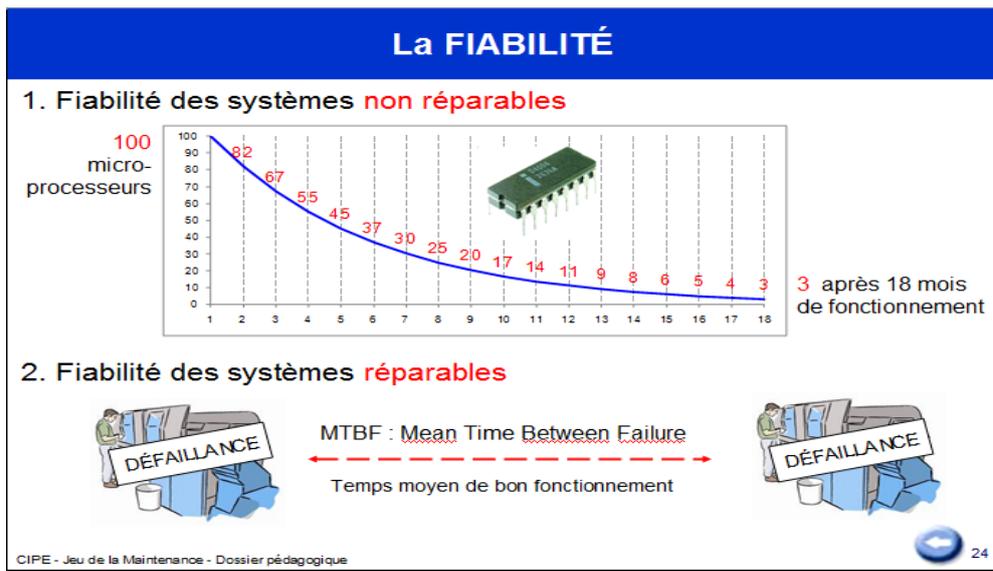


Figure 09 : courbe taux de Défaillance [1]

2.1.3.5.3 Présentation de la Fiabilité des Systèmes(s) :



2.1.3.5.4 Présentation des lois de Composition de la Fiabilité des Systèmes (s):

Les lois de composition de la fiabilité sont regroupés dans la Figure 11.

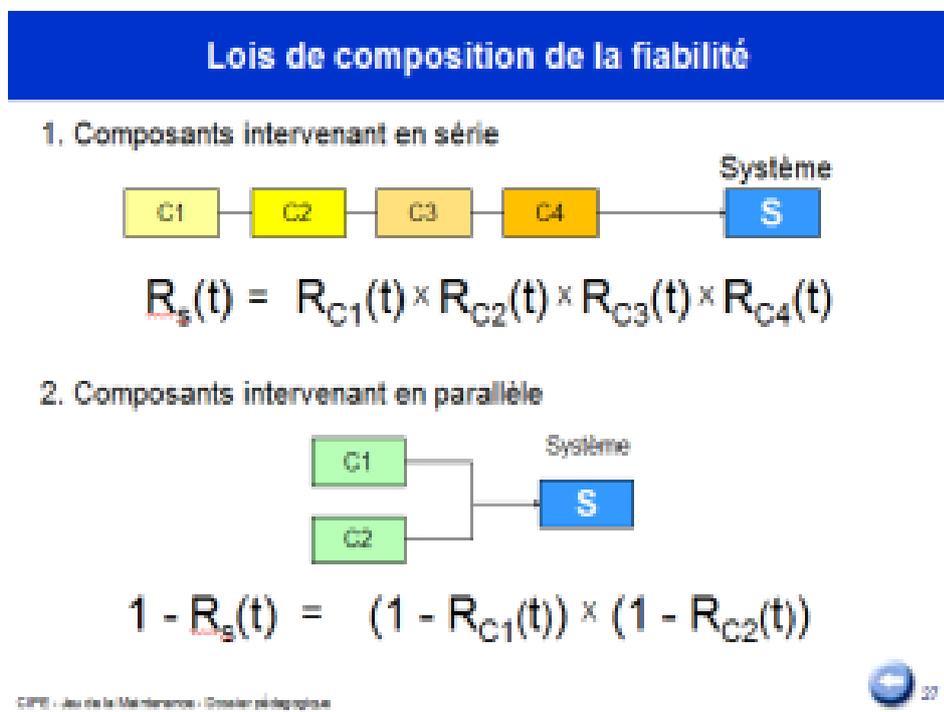


Figure 11 : Loi de composition de la Fiabilité [1]

2.1.3.5.5:Présentation de la Disponibilité [5] :

Toutes les définitions et lois de la disponibilité sont visualisées dans la Figure 12.

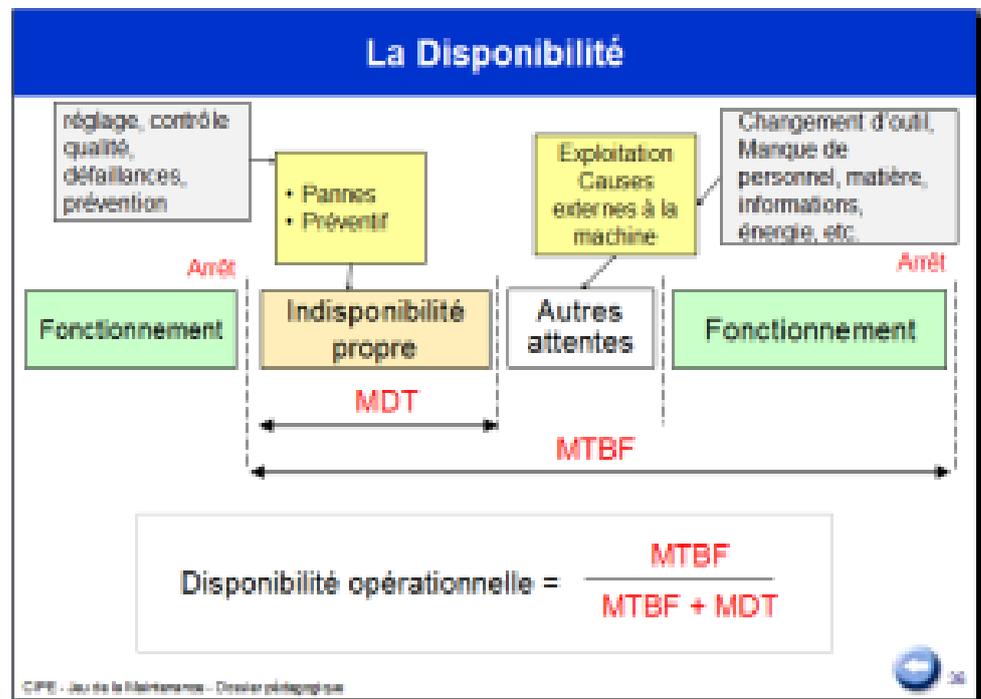


Figure 12 : la Disponibilité [1]

2.1.3.5.6:Disponibilité d'une ligne de production[5]:

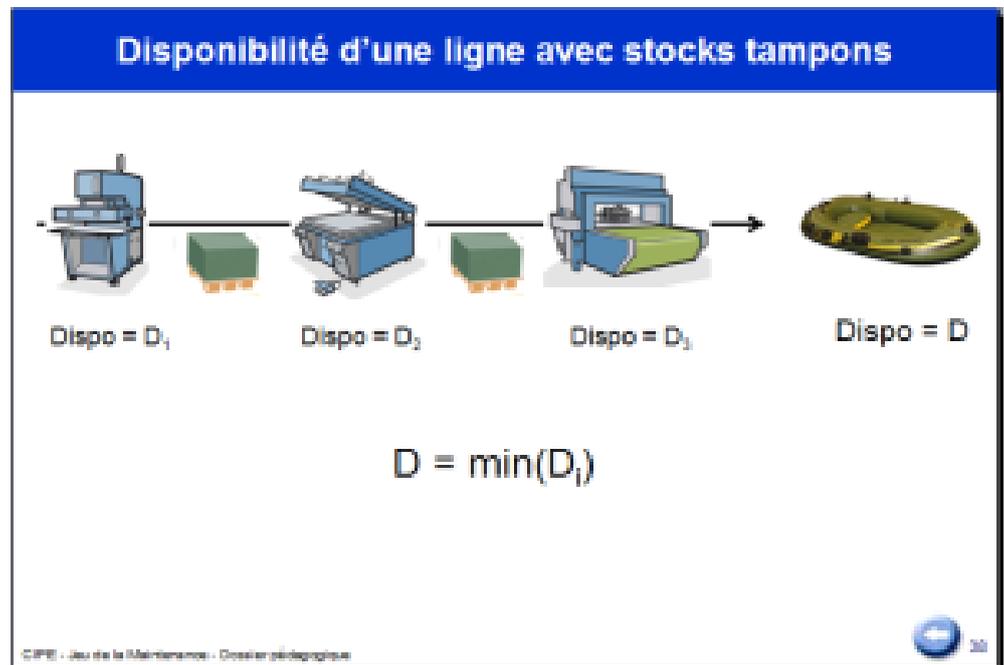


Figure N°13 : Disponibilité d'une ligne de production

2.1.3.5.7:Disponibilité d'une ligne avec stock tampon [5]:

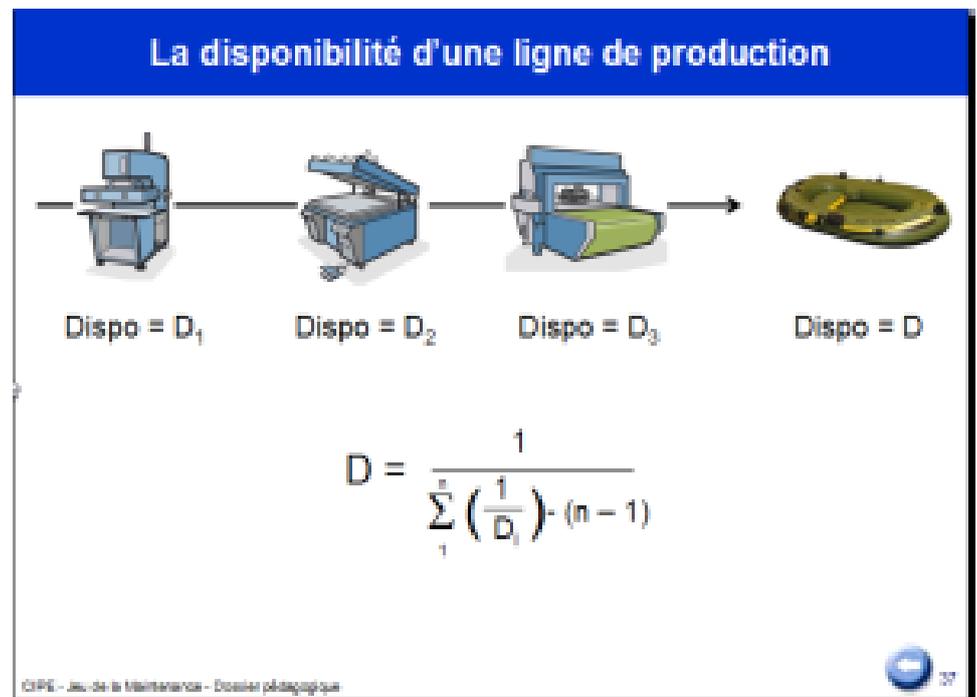


Figure N°14 : Disponibilité d'une ligne avec stock tampon

2.1.3.5.8 La Maintenabilité [5]: :

2.1.3.5.9 L'approche probabiliste de la Maintenabilité [5]::

Les figures 15 et 16 illustrent l'approche probabiliste de la maintenabilité et les critères de maintenabilité intrinsèque (définitions et lois).

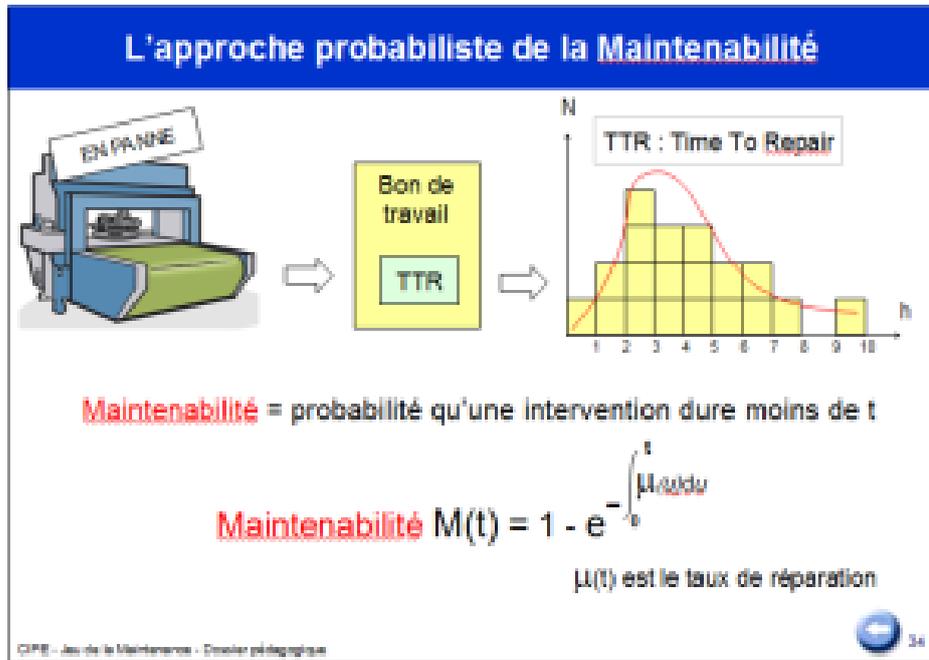


Figure 16 : La Maintenabilité

2.1.3.5.9 Les critères de la Maintenabilité intrinsèque [5]:

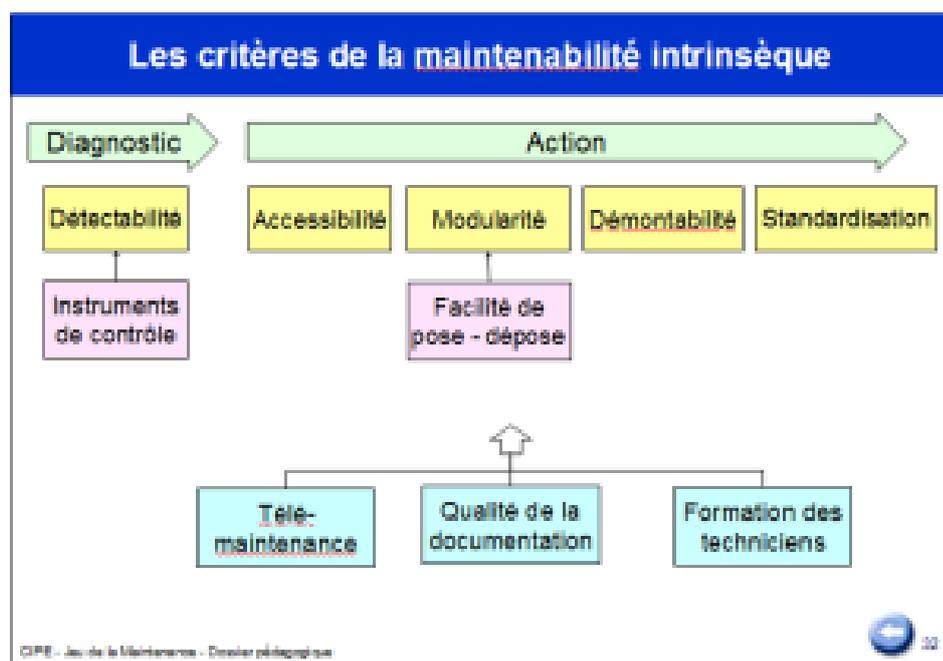


Figure N°17 : Critère de la maintenabilité Intrinsèque

2.1.3.5.10 La réalité de la maintenabilité opérationnelle :

- La machine est implantée contre le mur; on ne peut pas accéder à l'organe défaillant ;
 - Le roulement fait un bruit anormal
 - Le dépanneur est en en RTT
 - La Maintenance ne savait pas qu'il y avait une panne
 - La Machine n'a aucune procédure de diagnostique
 - On a la pièce de rechange en stock mais ce n'est pas la bonne référence
-
- La tension parait trop forte, mais personne ne connait la valeur normale
 - Le sous-traitant se perd dans l'usine
 - Le dépanneur retourne au magasin cherche l'outil qu'il a oublié
 - Il y a une erreur dans le plan

Figure N°19(5) : Fiabilité – Maintenabilité - Disponibilité

2.1.3.5.11 Les différents paramètres influençant les gros indicateurs de fiabilité [5]:

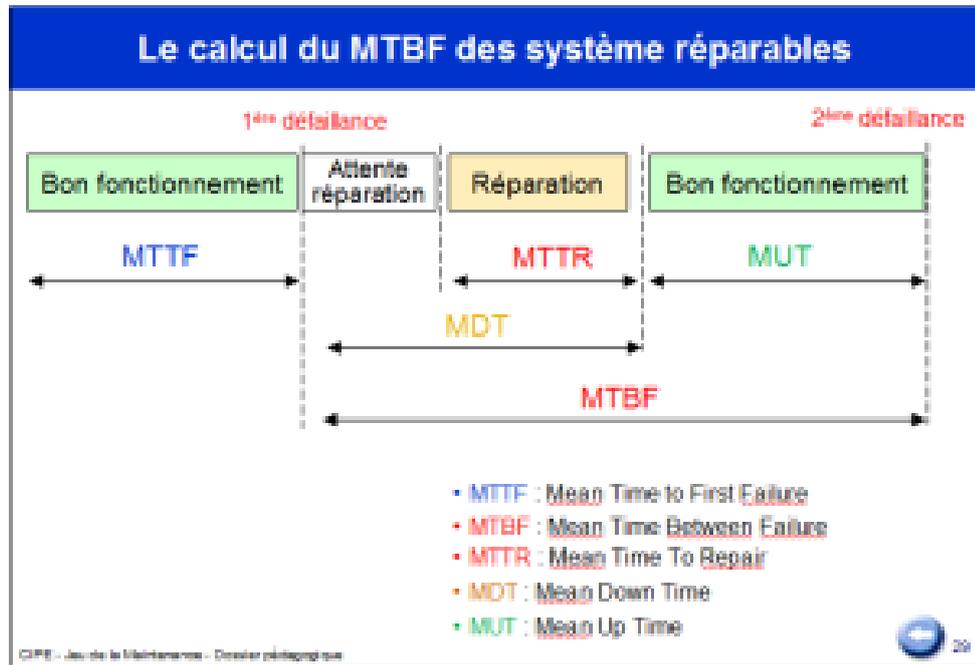


Figure N°18: Paramètres de fiabilité-maintenabilité

2.1.3.5.13 Conclusion :

1. On peut conclure que la fiabilité et la maintenabilité sont les deux facteurs décisifs sur le sort de la disponibilité. C'est en améliorant la Fiabilité et la Maintenabilité qu'en gagne sur la Disponibilité des systèmes

2. La Disponibilité Opérationnelle est dépendante :
 - Des facteurs propres au constructeur de l'équipement,
 - Des facteurs relatifs aux utilisateurs de l'équipement.

La figure ci-dessous présente cette dépendance.

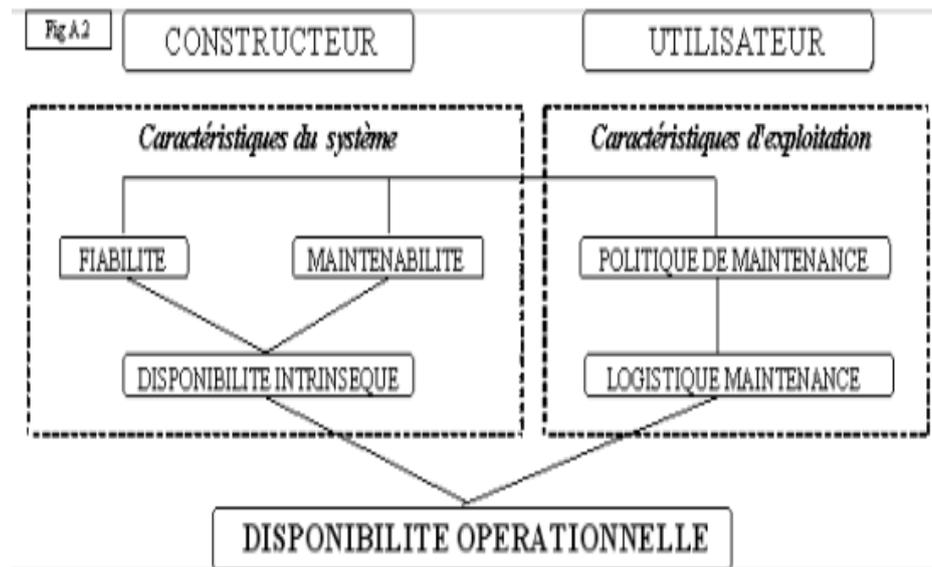


Figure N°20(5) : Disponibilité Opérationnelle

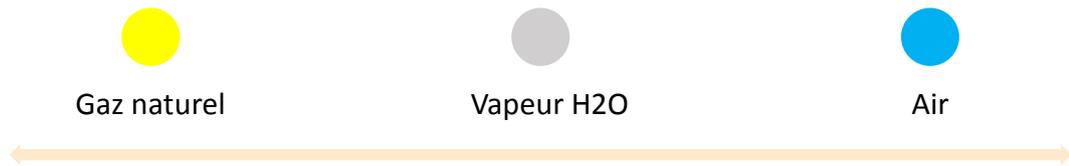
L'Unité de Production Ammoniac Annaba



3.1 Généralités et procès [8]:

L'installation de l'Unité Ammoniac Annaba est utilisée pour la production de 1000 Tonnes par journée de production d'ammoniac liquide, en partant des matières premières préliminaires qui sont:

1. Le gaz naturel
2. La vapeur d'eau
3. L'air



Et ceci s'accomplit par la méthode dite « reforming Kellogg » à haute pression dans l'ordre suivant :

1. Préparation de la matière brute d'alimentation
 - a. compression et désulfuration du gaz naturel
 - b. reforming
 - c. shift oxyde de carbone
2. Purification des gaz
 - a. Extraction du gaz carbonique
 - b. Méthanisation
3. Synthèse ammoniac
 - a. compression du gaz de synthèse purifié
 - b. synthèse de réfrigération de l'ammoniac
 - c. stockage et distribution des produits.

3.2 Classes des équipements installés :

Dans tout projet industriel et pour des raisons de commodité et de gestion technique, on adopte un code alphanumérique pour désigner les différents matériaux utilisés dans la construction de tout projet.

Ces codes sont présents dans plusieurs documents de tout projet industriel à savoir :

- ❖ **Schéma d'implantation** : qui est une vue d'ensemble de l'unité préparée à l'échelle.
- ❖ **Schéma de principe** : ces plans sont des représentations schématiques de l'installation, n'indiquant que les lignes principales de procédé et les récipients avec des données de calcul et des conditions de fonctionnement.
- ❖ **Conditions d'exploitation envisagées** : schéma de principe de repérage, montrant les valeurs envisagées pour les conditions normales d'exploitation.
- ❖ **Schéma de tuyauterie et d'instrumentation** : ces plans comprennent une représentation complète et authentique des gros appareils, de la robinetterie, de la

tuyauterie et de l'instrumentation de l'installation. Ces plans forment une référence de base avec illustration.

Les listes des vannes et les vues de détails qui figurent sur ces plans doivent être étudiées ; ainsi que la liste des symboles d'instrumentation qui paraissent sur les plans et dans les textes pour désigner les différents types d'appareils de contrôle.

- ❖ **Schéma de régulation du procédé** : ce sont des schémas simplifiés qui détaillent les boucles, l'appareillage de contrôle dans le procédé et donnent d'un coup d'œil les appareils de contrôle pour un système quelconque.
- ❖ **Plans de gros appareillages et données** : ce sont des feuilles de données pour les fourneaux et les récipients principaux, et autres données et graphiques.

Concernant notre sujet d'étude, les **codes ou classes** utilisés sont les suivants :

Classes	Familles	Codes équipements	Fonction
B	Chaudière	105- B	Chaudière auxiliaire
B	Chaudière	101- B	Reforming primaire
C	Echangeur	101- C	Chaudière de récupération
C	Echangeur	102- C	Chaudière de récupération
D	Récipient et réservoir	102-D	Réacteur de désulfuration
	Récipient et réservoir	103-D	Reforming secondaire
	Récipient et réservoir	104-D	Convertisseur de shift
	Récipient et réservoir	106-D	Méthanateur
	Récipient et réservoir	105-D	Convertisseur d'ammoniac
E	Récipient et réservoir		
F	Récipient et réservoir		
F	Récipient et réservoir		
J	Machines	101-J	Compresseur centrifuge d'air
J	Machines	102-J	Compresseur Gaz d'alimentation
J	Machines	103-J	Compresseur gaz de synthèse
J	Machines	104-J/A/B/C	Turbo- Pompe centrifuge d'alimentation ballon à vapeur 101-F
J	Machines	104-JS	Moto- Pompe centrifuge d'alimentation ballon à vapeur 101-F
J	Machines	Pompe- 2004-j	
J	Machines	Turbines	
J	Machines	Moteurs	
U	Machines	102-U	Système de condensat sous- vide et unité d'Épuration
U	Machines	101-U	Dés aérateur
U	Machines	2001-U	Epurateur d'eau dessalée
U	Machines	2001-US	Epurateur d'eau dessalée
M	Tuyauteries	Tuyauteriespéciaux	
N	Partieélectrique		
O	Instrumentation		
P	Isolation et peinture		
W	Catalyseurs		
W	Produitchimique		

Tableau N° 01 : codification des équipements

3.3 Description des étapes de circulation et du procédé :

❖ Phase A : Compression et désulfuration du gaz naturel :

1. Arriver du gaz naturel d'alimentation par la limite nord de la batterie, avec une pression minimum de 29.5 bars et une température maximum de $T(^{\circ}\text{C}) = 42$
2. Le gaz passe à travers un séparateur de liquides **116-F**, où il est débarrassé de toutes traces de liquides ;
3. Le compresseur **102-J** alimente le ballon collecteur en gaz sous une pression de 41 bars
4. Le gaz naturel devenu **SEC** est collecté dans un ballon collecteur de gaz ;
5. Le contrôleur **PICa-140** (régulateur de pression) surveille la pression du collecteur ;
6. Le compresseur est entraîné par une turbine à vitesse variable actionnée par un **PRCa-102**
7. Le **PRCa-102** est sensible à la pression du gaz à la sortie du désulfurateur **102-D** ;
8. Maintien d'un écoulement minimum de recirculation du gaz depuis le refoulement vers l'aspiration
9. Le gaz stocké au ballon collecteur est distribué aux différents utilisateurs à savoir :
 - aux brûleurs du reforming primaire **101-B** (comme combustible)
 - au réchauffeur de démarrage **102-B** (comme combustible)
 - au préchauffeur de désulfuration **103-B** (comme combustible)
 - Aux chaudières auxiliaires **105-B** (comme combustible)
10. Le gaz dont la pression est augmentée jusqu'à environ 41 bars par le compresseur **102-J**, est contrôlée par le régulateur de pression **PIC a-104**, passe par le préchauffeur **103-B** pour rejoindre le réacteur de désulfuration **102-D** en descendant par le lit catalytique en oxyde de zinc qui absorbe **H₂S**.
11. Une ligne de mise à l'atmosphère est prévue pour **102 D** pour le démarrage et les cas d'urgence.
12. En fonctionnement normal, le gaz d'alimentation qui sort de **102-D** passe au reforming primaire **101-B**.
13. Une ligne de piquage sur cette ligne venant de **102 D**, passe par le réfrigérant **112 C** et se divise sur deux collecteurs qui alimentent en gaz naturel désulfuré :
 - Le convertisseur de Shift à basse température **104-D** pendant la réduction catalytique.
 - L'absorbeur de **CO₂**, **101 E**, comme agent de mise en pression pendant le démarrage.

Note : Les équipements spéciaux installés répondent aux Normes : ASTM-API.

14. Une ligne de piquage sur cette ligne venant de 102 D, passe par le réfrigérant **112 C** et se divise sur deux collecteurs qui alimentent en gaz naturel désulfuré :
- Le convertisseur de Shift à basse température **104-D** pendant la réduction catalytique.
 - L'absorbeur de CO₂, **101 E**, comme agent de mise en pression pendant le démarrage.

❖ **Phase B : Préparation du gaz de synthèse :**

15. Le débit du gaz naturel d'alimentation provenant de **102-D** est réglé par FRCA-14.
En cas de secours, une vanne à commande motorisé sur cette ligne peut être fermée à partir du panneau de contrôle, le gaz qui sort de **102-D** s'échappe à l'atmosphère.
16. De la vapeur moyenne pression est injecté dans la ligne du gaz naturel désulfuré.
17. La vapeur étant régulée par FRCa-105 pour maintenir le rapport voulu de vapeur et de carbone (selon la Norme TS.524M).
18. Au cas où le rapport vapeur-gaz naturel tomberait en dessous de la valeur de consigne de LFRA-123, la vanne à solénoïde VS.109. se ferme ce qui interrompt l'alimentation en gaz naturel.
19. Le mélange vapeur-gaz passe ensuite par les 48 tubes de la section de convection du reforming 101-B. A ce point la température de ce mélange monte de 339° à 524°C par les gaz chauds de carneau qui sortent du fourneau du reforming.
20. Le mélange s'écoule ensuite à travers des tubes remplis de catalyseurs de la section rayonnement du reforming primaire.
21. Les pressions d'entrée et de sortie du mélange étant respectivement de l'ordre de 34.9 à 29.6 bars.
22. La teneur en méthane du gaz en partie traité enregistre par l'analyseur AR1-1.
23. Le reforming est alimenté en chaleur par 200 brûleurs dont le combustible est soit du gaz naturel ou un mélange de gaz avec des gaz de purge.
24. Les 200 brûleurs sont disposés en 10 rangés de 20 prévus avec des pilotes.

Le contrôle de la pression du gaz dans chaque collecteur s'exerce sur les appareils Mica-121 à 130.

Le contrôle de la pression du gaz de combustion qui alimente ces brûleurs se fait à partir de Mica-131, sur le panneau de contrôle.

25. En plus du préchauffage auquel ils soumettent le gaz d'alimentation, les gaz de carneau qui sortent de la section rayonnement du fourneau fournissent de la chaleur à ce qui suit :
- a) Circulation vapeur-air pour reforming secondaire ;
 - b) Serpentin de surchauffeur chaud (vapeur 103.5 bars) ;
 - c) Serpentin de surchauffeur froid (vapeur 103.5 bars) ;
 - d) Serpentin d'eau d'alimentation de chaudière ;
 - e) Serpentin de préchauffage du gaz combustible.

Pour que la vapeur surchauffée à fournir atteigne 440°C, 18 brûleurs horizontaux supplémentaires à gaz sont prévus pour le serpentin surchauffeur. Le contrôle de l'alimentation des brûleurs se fait au moyen de TICa-125 qui est sensible à la température de sortie du serpentin

26. Le fourneau (reforming- primaire) est aussi prévu avec une chaudière indépendante auxiliaire dont la chauffe se fait par 05 brûleurs à gaz combustibles lourds pour produire 103.5 bars de vapeur saturée provenant de 05 serpentins en circulation fermée.
Cette chaudière assure le maximum de souplesse de fonctionnement, pour une production de vapeur dans l'ensemble de l'unité et fournit de la vapeur à haute pression pour la mise en route avant la marche du fourneau du reforming à ces températures et capacités de calcul et avant que les générateurs de vapeur non mis à feu commencent à produire.
27. Le gaz de reforming en partie traité et provenant de 101-B à une pression de 30-31 bars est refoulé au reforming secondaire **103-D** en passant par la ligne de transfert du reforming primaire.
28. La ligne de transfert du reforming et l'enveloppe du reforming secondaire sont à double paroi pour la circulation d'eau.
29. L'air et la vapeur préchauffé à 460°C en **101-B** entrent dans la chambre de combustion de **103-D** au-dessus du lit catalytique via un bec spécial et se combine avec le gaz pour descendre par un lit catalytique au nickel.
30. L'air de combustion du reforming secondaire est fourni par un turbocompresseur d'air 101-J.
31. Un débit de vapeur d'environ de 2900kg/h à 38.5 bars est maintenu à tout moment par le serpentin de préchauffage d'air de 101-B pour éviter le sur chauffage du serpentin à des débits de calcul d'air.
32. En cas de panne total d'air de procédé, **Mica-102** s'ouvrira et la vapeur sera régulée pour maintenir une température de sortie acceptable pour le serpentin et évitera le coulage de ce dernier.
33. Dans l'unité du reforming secondaire la chaleur libérée par la combustion du gaz en partie traité élève la température à environ 1000°C à la sortie du récipient et fournit l'énergie nécessaire à compléter la deuxième partie du reforming secondaire.
34. La teneur en méthane dans le gaz du reforming est réduite à 0.33 moles sur la base d'un gaz sec.
35. Le circuit est en analyse constante pour le méthane par **AR1-2** placé en amont du convertisseur de shift à haute température.
36. Le gaz traité sort du reforming secondaire **103-D** à une température de 994 °C et passe par la chaudière de récupération primaire **101-C** où il est refroidi par l'eau d'alimentation de cette chaudière lors de la production de vapeur saturée à 103.5 bars, le gaz va ensuite à la chaudière de récupération secondaire 102-C.
37. Le gaz traité et la vapeur à 371°C pénètrent par le haut du convertisseur de shift HT **104-D** et descendent par le lit catalytique de conversion de shift CO où l'oxyde de carbone réagit avec la vapeur pour former des quantités équivalentes d'hydrogène et

de gaz carbonique. Cette réaction est exothermique et augmente la température du gaz à environ 430°C.

38. Deux thermocouples multipoints pénètrent dans le catalyseur pour pouvoir obtenir des profils de température du lit catalytique.
39. Partout du convertisseur de shift HT, le gaz passe par la chaudière de récupération **103-C** cédant la chaleur à l'eau d'alimentation de la chaudière pour produire 103.5 bars de vapeur dans **101-F**.
40. Le gaz sort de **103-C** passe par le côté des tubes dans **104-C** et fournit de la chaleur au produit d'alimentation du méthanier.
41. Le gaz refroidit sort de 104-C et va au convertisseur de shift basse température (BT) et descend par le lit catalytique de l'oxyde de zinc qui sert de protection contre l'empoisonnement du soufre au second lit formé de catalyseur de shift à basse température où la teneur de CO dans le gaz est réduite à un pourcentage de 0.5 moles.
42. Le gaz de procédé converti, composé d'environ 30% de vapeur et 70% de gaz sec est amené à la température de saturation **177°C** par du condensat en circulation.
43. Le gaz est encore refroidi jusqu'à environ **127°C** en produisant de la chaleur de rebouillage aux strippers de CO₂ **105-CA** et **105-CB**.
44. Le gaz est alors refroidi jusqu'à 63°C par de l'eau déminéralisée dans **106-C** avant de passer par le séparateur de gaz brut **102-F**.
45. Au stade **102-F** se produit la séparation entre le gaz de procédé et le condensat.
46. Le gaz dégagé va à l'absorbeur **101-E** du CO₂. dans lequel sont incorporées les alarmes de niveau haut HLLA-107 et bas HLLA-108.
La pression différentielle dans la colonne est donnée par **Pdla-114**.
47. Le niveau bas de 101-E est contrôlé par le régulateur indicateur de niveau Lica-107 d
48. Le condensat nécessaire pour refroidir l'effluent du convertisseur de shift **BT** (pt 27) est aspiré de **102-F** par la pompe **106-J**.
49. Le condensat de **102-F** sert aussi à l'appoint du système **mono-éthanol-amine** dans les strippers de CO₂ : 102EA et EB.
50. Le condensat en excédent est dirigé sur les égouts, contrôlé par LC-106 du 102-F.
51. Alors que l'appoint au système provient de la **pompe à eau d'alimentation 104-J de la chaudière 101-F**.

❖ Phase C : Purification du gaz de synthèse :

a) Extraction du gaz carbonique :

Dans cette partie de l'unité, le gaz de synthèse brut venant de 102-F à environ 27 bars et 63°C est traité pour extraire le gaz carbonique et une faible quantité résiduelle d'oxyde de carbone et produire un gaz de synthèse **hydrogène/ azote** très pur avec pourcentage d'oxyde carbonique de 0.6 moles sur la base d'un gaz sec.

52. Le gaz du séparateur de gaz brut **102-F** entre dans l'absorbeur **101-E** du CO₂ par un distributeur à la base de la colonne, et remonte en passant au travers les vingt plateaux.
53. Le mono-éthanol-amine (**M.E.A**) entre au-dessus du plateau supérieur et descend en absorbant les oxydes carboniques du gaz de procédé ascendant.
54. Le M.E.A riche en CO₂ sort par le fond de l'absorbeur 101-E pour aller aux strippers de CO₂ : 102-EA et EB d'où le CO₂ est extrait du MEA qui est récupéré pour être utilisé à nouveau.
55. Le gaz qui sort par le haut de la colonne entre dans **118-F**, le séparateur et absorbeur de CO₂, d'où tout liquide entraîné est séparé et refoulé aux égouts de produit chimiques par le régulateur de niveau **LC-113**.
56. Le gaz libéré du CO₂ sort de 118-F et passe par la section de méthanisation dont la teneur en CO₂ est contrôlée par l'analyseur enregistreur **AR-5**.

b) **Méthanisation** :

57. Le gaz de procédé venant du séparateur **118-F** de l'absorbeur de **CO₂** se dirige vers le méthanateur **106-D**, sa température est accrue par l'échangeur de chaleur avec le gaz de synthèse qui vient du refoulement du 1^{er} étage de 103-J dans **136-C** et par l'effluent du convertisseur de shift **HT** dans **104-C**.
58. Le contrôle de la température à env. **316°C** à l'entrée du méthanateur se fait par **TRCa-104** qui contrôle la vanne de dérivation **104-C0**.
59. Le gaz de procédé qui entre par le haut du méthanateur traverse le lit catalytique au Nickel où tous oxyde carbonique se transforme en méthane et eau.
La chaleur exothermique de la réaction par méthanisation augmente la température du gaz de sortie jusqu'à env. 359°C.
60. Le méthanateur est calculé sur la base d'une concentration de 061% de mole de CO + 0.01% mole de CO₂ (sur la base d'un gaz sec) dans le gaz d'alimentation.
Toute augmentation importante de concentration de CO ou de CO₂ aura pour résultat l'accroissement rapide des températures dans le récipient et du gaz de sortie.
61. La protection du méthane contre la haute température se fait par la fermeture d'une vanne papillon et une vanne motorisée à passage direct dans la ligne d'entrée du récipient.
62. Le gaz qui sort du méthanateur est alors progressivement refroidi par l'eau d'alimentation de la chaudière **114-C**, par l'eau déminéralisé dans **115-C** et enfin par l'eau tempéré dans **2003-F**.
63. Le gaz entre dans le ballon **104-F** à l'aspiration du compresseur du gaz de synthèse **103-J**, à env. **38°C**.

Phase D : Compression de gaz de synthèse et d'ammoniac:

64. L'eau séparée du gaz de synthèse dans **104-F** est envoyé à l'égout sous contrôle de **LC-117**.
65. Des alarmes de niveau Haut et Bas sont installées sur place et à distance dans la salle de contrôle par **HLLA-117**. Un niveau très élevé dans **104-F** actionne l'interrupteur **HHLS-119** qui arrête le compresseur de gaz de synthèse **103-J**
66. La pression sur **104-F** normalement de l'ordre de 24.6 bars est contrôlé par **PRCa-120** qui régule l'arrivée de vapeur dans **103-JBT**, contrôlant ainsi la vitesse du compresseur de gaz de synthèse **103-J**.
67. Le gaz de synthèse sort de 104-F sous analyse constante :

 Pour le CH₄ c'est l'analyseur AR-1-3

 Pour CO, CO₂ c'est l'analyseur AR-2

 Et Pour H₂ c'est l'analyseur AR-3-1
68. Pendant la mise en route, ou lorsque la production du gaz de système dépasse les besoins de la boucle de synthèse, le gaz est libéré à l'atmosphère par le collecteur de sortie **104-F**. ceci est contrôlé par **Pica-121** dont le réglage est à une pression légèrement au-dessus de **PRCa-120**.
69. Le compresseur de synthèse **103-J** est composé d'étages haut et bas montés sur le même arbre et entraîné par les turbines haute pression et basse pression (**103-JAT** et **103-JBT**) également disposées en tandem.
70. Le gaz de synthèse venant de **104-F** entre dans la chambre basse pression et est comprimé à **63.5 bars**.
71. La chaleur créée par la compression est éliminée en faisant passer le gaz par l'échangeur **136-C** et le réfrigérant intermédiaire **116-C** refroidi à l'eau, ensuite par le refroidisseur intermédiaire du compresseur de gaz de synthèse.
72. A partir de la sortie de **129-C**, le gaz va au séparateur **105-F** du 1^{er} étage du compresseur. A ce point, la température normale doit être de l'ordre de **8°C**.
73. Etant donné que l'eau est contenue dans les gaz, des mesures doivent être prises pour éviter que la température du fluide atteigne **0°C**.
74. Le liquide entraîné est séparé dans **105-F** pour aller à l'égout, et contrôlé par **LC-120**. Le récipient est prévu avec une alarme de niveau haut **HLLA-120** et montée sur un panneau ainsi qu'un interrupteur de niveau très haut **HHLA-122** se déclenche pour arrêter le compresseur.
75. Le gaz sort de **105-F**, passe par un tamis contre entraînement et est aspiré au 2^{ème} étage. Le débit est mesuré par **FICa-112** qui régule la vanne de contrôle dans la ligne de recyclage vers l'aspiration du 1^{er} étage prévu pour éviter de surcharger le compresseur lorsqu'il fonctionne à de faibles débits.
76. En plus du gaz venant du séparateur du 1^{er} étage, un gaz de recyclage à **134 bars** et **43°C** venant de la boucle de synthèse, entre dans le 2^{ème} étage par l'aspiration à la dernière roue. Cette circulation représente env.**85%** du refoulement total du compresseur.

77. Le gaz refoulé de **103-J** à 150 bars et env.70°C est refroidi à l'eau dans **124-C** jusqu'à 35°C. le contrôle du recyclage au 2^{ème} étage du compresseur est à la sortie de **124-C**.
78. Le débit total du refoulement du compresseur est mesuré par **FICa-113**, qui contrôle le gaz recyclé s'introduisant dans le circuit de retour vers la dernière roue du 2^{ème} étage.
79. Le gaz synthétique peut également être dirigé du refoulement de **103-J** au méthaneur **106-D** comme gaz de refroidissement de secours.
80. Le collecteur principal de refoulement du compresseur se divise en deux circuits de refroidissement :
- Un circuit à débit réglé par **HCV-104**, est pour une circulation par **120-C** où le gaz est refroidi à **-9°C** par échange de chaleur avec le gaz qui sort du séparateur d'ammoniac **106-F** à **-23°C**.
 - L'autre circuit est pour une circulation qui passe successivement par **117-C** où le gaz est refroidi jusqu'à **19°C** par de l'ammoniac à **13°C** et par **118C** où ce gaz est refroidi jusqu'à **-2°C** par l'ammoniac à **-7°C**.
81. Les deux circuits se reforment en un seul (à -6°C), et le gaz est soumis à un dernier refroidissement à -23°C dans 119-C par échange avec l'ammoniac à -33°C.
82. L'ammoniac liquide, condensé aux étages refroidisseurs, au refoulement du compresseur de gaz de synthèse 103-J, est séparé dans 106-F, le séparateur d'ammoniac secondaire, à -23°C et à 147.2 bars.
83. L'ammoniac est détendu sous le contrôle de **LIC-123**, dans le ballon de détente de NH3, 107-F.
84. La pression dans 107-F qui reçoit l'ammoniac de 106-F et de 108-F est contrôlé par **PICa-126** à env.17.2 bar

3.4 Production de vapeur dans le Ballon à vapeur 101-F:

La production principale de vapeur dans **101-F** s'obtient par récupération de chaleur perdue des lignes de procédé et par la chaudière auxiliaire **105-B** qui procure la charge de base.

Cette chaudière auxiliaire 105-B comprend cinq (05) serpentins de production de vapeur. La mise à feu des cinq (05) brûleurs est contrôlée par **PIC a-143**, réglé par **PRC a-171** qui enregistre la pression de vapeur à la sortie du ballon **101-F**.

3.5 Schéma d'intégration du circuit ballon à vapeur :

Voir figure N° 20 (feuille ci-contre)

3.6 Caractéristiques techniques :

3.6.1 Caractéristique du Ballon à vapeur 101-F (sujet de notre étude):

N° Poste	Partie équipt	O.D Mm	Long m	T°C d'opération	Isolation			Remarque	Surface m2
					Type	Classe	Epais mm		
Ballon à vapeur 101-F	Calandre	2212	16000	314	1	HI	50		116
Ballon à vapeur 101-F	Calotte	2212		314	1	HI	50	Fond hémisphérique	17

Tableau N°02 : caractéristiques techniques de 101-F

3.6.2 Désaérateur 101-U (réceptif d'aspiration) :

N° Poste	Partie équipt	O.D Mm	Long m	T°C d'opération	Isolation			Remarque	Surface m2
					Type	Classe	Epais mm		
Réceptif à eau 101-U	Calandre	3 400	80 000	130	2	HI	40		87.5

Tableau N°03 : caractéristiques techniques de 101-

3.7 Système de régulation du ballon à vapeur:

- les raccords des éléments de régulation sont de type NPT de 1/4"(F)
- La gamme des signaux : 0.2 – 1.0 bars
- Les relais de distorsion : RLa-104/RLa-105/RLa-109 et la vanne de régulation sont commandées par le gaz azote (N2).

3.7.1 Liste des composants du système de régulation :

Repères des composants	Fonction des composants	Remarques
LRa-151A	Transmetteur de niveau du ballon	
LRa-151B	Transmetteur de niveau du ballon	
LRa-151	Transmetteur de débit vapeur	
LRa-152	Transmetteur de débit eau d'alimentation chaudière (EAC)	
AS-101	Interrupteur pneumatique	
AS-102	Interrupteur pneumatique	
AS-103	Interrupteur pneumatique	
LICa-104	Régulateur xxxxxxxx	
RLa-104	Relais de distorsion	
RLa-105	Relais de distorsion	
LIC-151A	Extracteur de la racine carrée xxxxxxxx	
LIC-151B	Extracteur de la racine carrée xxxxxxxx	
RLa-107B	Relais de soustraction	
RLa-107A	Relais de distorsion	
LIC-151 E	Régulateur de précision avec indicateur	

Tableau N° 04 : composants du système régulateur

3.7.2 Fonctionnement du système de régulation:

- AS-101 permet à l'un ou l'autre des transmetteurs de niveau d'eau de fournir des entrées au système.
- AS-102 permet l'utilisation du régulateur de niveau direct pendant les périodes d'entretien effectués sur le système à trois (03) éléments.
- AS-103 permet l'utilisation du régulateur de débit direct au cours du démarrage.
- RLa-107B est le relais de soustraction qui, compare les signaux venant des transmetteurs de débit d'eau et de débit de vapeur et donnera une sortie de mesure moyenne (0.6kg/cm^2) lorsque le débit d'eau diffère du débit de la vapeur d'une grandeur égale à la quantité de purge continue du ballon (fixée par l'intermédiaire du régulateur LIC-151E).
- RLa-107A est un relais de décalage qui, dans le cas d'un débit de 0.6 kg/cm^2 de RLa-107B, permettre au signal de niveau émis par le transmetteur de passer sans modification au régulateur.

Une hausse de niveau apparente se produisant lorsqu'il y a une forte demande de vapeur (effet de gonflement), provoquera une baisse de débit de la part du relais de distorsion, et ce faisant, neutralisera le signal d'augmentation de niveau du transmetteur et incitera le régulateur LIC151 à demander d'avantage d'eau d'alimentation de chaudière.

3.7.3 Schéma de principe du régulateur de niveau du ballon à vapeur 101-F :

(Référence du schéma : CREUSOT – LOIRE ENTREPRISES/JOB N° 5142/ DRAWN : JGD / DRAWING N° : 961-A1/Date : 14.07.1976)

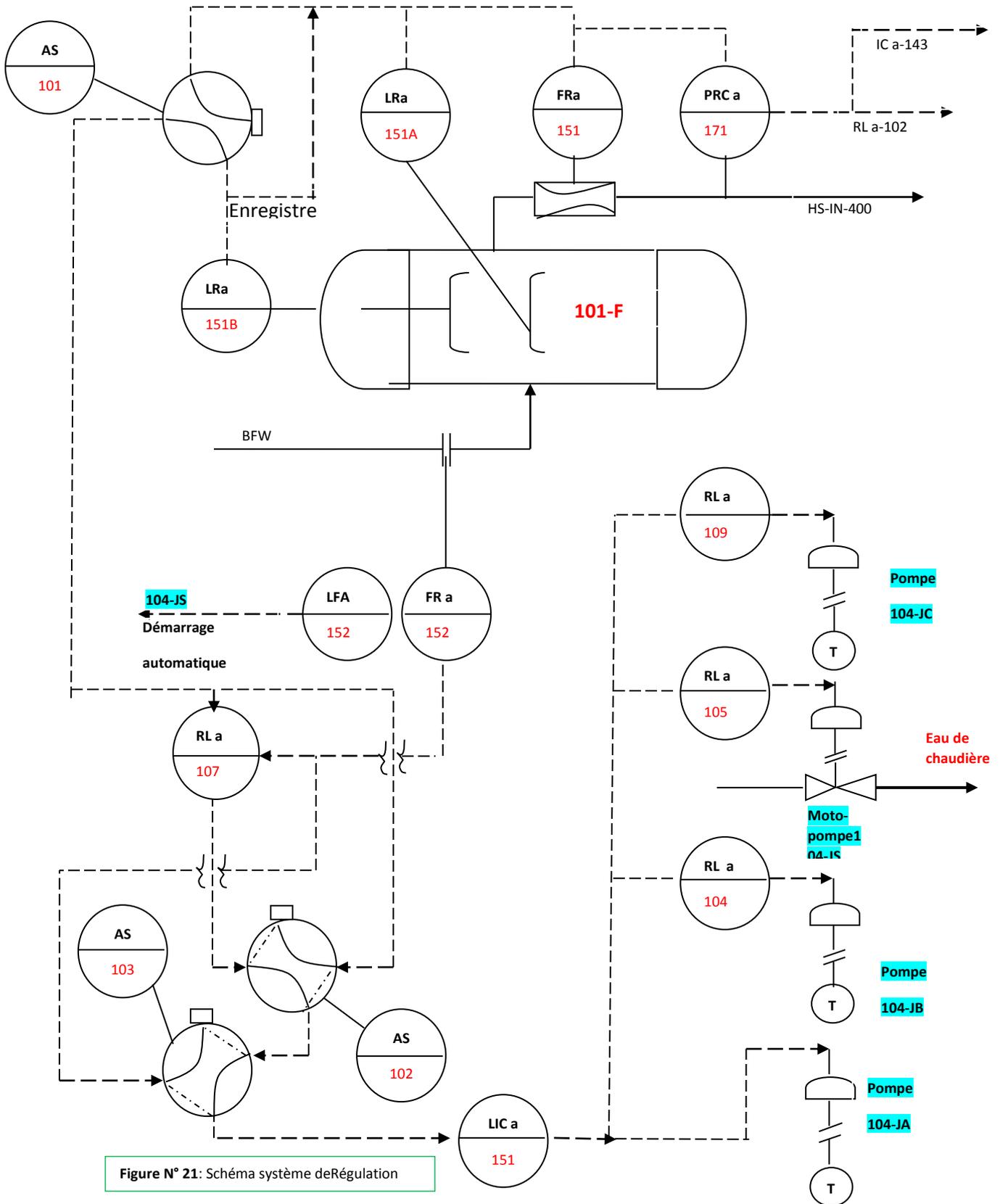


Figure N° 21: Schéma système de Régulation

Le niveau dans le ballon à vapeur est capté par deux enregistreurs de niveau,

LR-151A et LR-151B.

Un sélecteur AS-101 facilite la commutation entre les enregistreurs de niveau pour l'entretien des instruments ou en cas de panne.

Ce niveau est régulé en faisant varier la quantité d'eau qui alimente le ballon.

Le niveau dans le ballon est réglé par **LIC a-151** et le signal de sortie de ce régulateur fait varier la quantité de vapeur admise aux turbines qui entraînent les pompes 104-JA, JB et JC.

Les relais de polarisation RLa-104 et RLa-109 assurent un démarrage et une mise en charge progressifs des pompes pour répondre à la demande en vapeur.

Dans le cas de la pompe de réserve 104-JS à entraînement par moteur électrique, le signal de LICa-151, via le relais RLa-105, actionne la vanne de contrôle sur la ligne de refoulement de la pompe.

Le démarrage automatique de 104-JS se fait par signal de LFA-152 quand FRa-152 indique un faible débit d'eau d'alimentation de chaudière.

Le signal d'entrée dans LICa-151 est normalement dérivé du relais ordinateur RLa-107.

Les signaux venant de l'enregistreur de niveau du ballon, LRa-151A/B, de l'enregistreur de débit vapeur Fra-151 et l'enregistreur de débit d'eau de chaudière Fra-152 sont envoyées au relais RLa-107. Le net de sortie donne un signal d'entrée de mesure pour LICa-151.

Remarque :

- 1. Le système est aussi prévu pour fonctionner sur une commande à un élément. Le commutateur AS-102 permet la transmission directe du signal de l'enregistreur de niveau du ballon LRa-151A/B à LICa-151 pour dévier RLa-107.**
- 2. Le signal de l'enregistreur de débit d'eau d'alimentation de chaudière, FR a-152, peut être transmis directement à LICa-151 en actionnant le commutateur AS-103. Ceci peut être d'utilité pendant les périodes creuses de demande en eau d'alimentation de chaudière, exemple le démarrage. Le régulateur indicateur de niveau LIC agit en fait comme régulateur indicateur de débit FIC.**

3.7.4 Les causes de perte d'eau d'alimentation de chaudière vers 101-F:

La perte totale en eau de chaudière au ballon à vapeur peut se produire à cause de ce qui suit :

1. Rupture de tube dans les éléments de préchauffage ou de production de vapeur, ou dans les échangeurs.
2. Perte en eau déminéralisée au dés-aérateur 101-U à la suite d'une panne de pompe de transfert (pompe 2001-J) ou d'unité de traitement d'eau.
3. Panne généralisée des pompes à eau d'alimentation des chaudières.
4. Colmatages des filtres aux aspirations des pompes à eau d'alimentation des chaudières.

5. Vanne de sectionnement fermées dans la ligne principale de refoulement.
6. Panne de la régulation automatique du niveau au ballon à vapeur.

Remarque : sans tenir compte de la cause de cette perte en eau, le résultat sera de ne pas maintenir le niveau dans le ballon à vapeur et l'unité devra immédiatement être arrêtée. Si ceci n'est pas fait, les serpentins de production de vapeur, en chauffe ou non, couleront.

3.8 Circuit eau d'alimentation du ballon à vapeur 101-F [8]:

L'installation est composée de quatre pompes dont trois commandées par turbines à vapeur et la quatrième commandée par un moteur 5.5 KV qu'on appelle communément groupe de secours ou de démarrage.

3.9 Caractéristiques du groupe Moto -pompe [11]:

Le système à vapeur comporte une pompe motorisée dont les caractéristiques sont : suivant :

- Type de pompe : MF 410 Z
- Repère du Moto pompe : 104-JS
- Fabricant du moteur : Jeumont- Schneider type TAC 78-45-2-825 KW- 2980tr/min plein charge I=102 A

3.10 Caractéristiques du groupe Turbopompe [11]:

Le système à vapeur comporte trois pompes à turbine dont les caractéristiques sont : suivant :

- Repère Pompe N°1 : pompe 104-JA
- Repère Pompe N°2 : Pompe 104-JB
- Repère Pompe N°3 : Pompe 104-JC
- Groupe turbo- pompe : turbine Worthington type T 2 RA- 773 KW- 2965 tr/min
- Température de fonctionnement des pompes T°C= 120 °C
- Gravité spécifique de la pompe égale à 0.941
- Débit pompe = 168 m³/h
- Pression de refoulement = 113.9 bar / pression aspiration = 1.89 bar
- Rendement volumétrique = 74%
- Hauteur pratique d'aspiration (NPSHA) = 8.5 m

3.11 Type de construction des pompes [11]:

Les pompes sont de type centrifuge multicellulaire (dans notre cas la pompe comporte 10 roues) et à dispositif d'équilibrage, du fabricant Ensival France.

- Les pompes sont de type de construction à fourreau à chemise d'eau ce qui permet de donner des machines robustes ne comportant qu'un seul joint haute pression vers l'extérieur ; la suspension du corps de pompe dans l'axe, garantie une marche impeccable à tous les états thermiques.
- Les roues sont montées glissantes sur l'arbre, sauf la roue d'aspiration, qui est placée à chaud. Le rotor est bloqué par un écrou et est équilibrée dynamiquement
- Les paliers sont du type à coussinet garnis de métal anti- friction et lubrifiés à l'huile sous pression. Le palier côté refoulement (opposé à la commande) est combiné avec une butée à bloquets, capable d'absorber la poussée résiduelle dans les deux directions.
Les paliers sont fixés sur les boîtes à bourrages, leur position est réglable suivant les deux axes au moyen de 4 vis de pression.
- Ces pompes sont équipées de garnitures mécaniques « Borg- Warner » type D 4000- 5 N4 A 5 (carbone/carbure de tungstène/AISI 316 /Viton).
Chaque boîte à bourrage est précédée d'un lamage refroidi ; un circuit de refroidissement à forte vitesse de circulation entoure la boîte de la garniture et l'eau de ce circuit est entièrement séparée de l'eau pompée.
Le débit d'eau froide à prévoir pour le refroidissement est de 1m³/h.
Une circulation d'eau déminéralisée s'effectue en circuit fermé au travers de la boîte à bourrage et d'un échangeur de chaleur. Cette circulation est accélérée par une bague de pompage. La température de l'eau à l'endroit de la garniture ne doit pas dépasser 80°C.
La propreté des circuits d'eau sur ces garnitures est primordiale pour assurer un bon fonctionnement ; un séparateur magnétique est installé sur chaque circuit. Il y a lieu de procéder périodiquement à leur nettoyage en utilisant le by-pass et les vannes d'isolement.
- Le dispositif d'équilibrage (piston/cylindre) est conçu pour être examiné sans démonter le couvercle principal. L'usure est contrôlée par l'écart de pression entre la conduite d'évacuation de la fuite et la conduite d'aspiration. Si cette différence de pression augmente c'est que le débit de fuite a augmenté.

3.12 Accessoires des pompes [11]:

- Clapets de retenue à by passe automatique et manuel « SHROEDER »
- Accouplement à denture sphérique «Tacke»
- Dispositif de préchauffage
- Système de lubrification «GERBERICH »
- Filtre d'aspiration inoxydable à mailles de 300 microns
- Indicateur de pression à l'aspiration de la pompe (une perte de charge de 1.5 m indique que le filtre d'aspiration est colmaté et il faut le nettoyer)

- A l'aspiration une vanne totalement ouverte avant tout démarrage et pendant le service.
- Au refoulement une vanne et un clapet anti- retour.
- Un débit minimum doit circuler à travers la pompe même lorsque le débit vers la chaudière est nul. Des by-pass automatique et manuel sont prévus, en amont du clapet, avec retour à la bêche d'alimentation.

3.13 Système de lubrification à l'huile [11]:

Le circuit de lubrification se compose de :

- Un réservoir d'huile de 500 litres, avec raccord de remplissage, filtre, tuyauterie d'aspiration et de retour d'huile, vanne de vidange et indicateur de niveau visuel.
- Un groupe moto- pompe à axe vertical monté sur le réservoir (3CV- 1500 tr/min.- 380V- 50 HZ- V1- 100 l/min.).
- Pompe mécanique montée en bout d'arbre de la pompe principale (100l/min. – 3000 tr/min.).
- Un filtre réfrigérant 15000 kcal/h. – débit d'huile 100 l/min. débit d'eau 85 l/min. – degré de filtration 0.13 mm double filtre commutable et nettoiable.
- Une soupape de réglage de pression (réglage 1.1 bar min.- 1.6 bar max.).
- Clapet de retenue, clapet de pied, manomètres, thermomètres, purgeurs d'air, indicateur visuel de débit, tuyauterie de distribution d'huile sous pression.
- Tuyauterie de retour d'huile par gravité.
- Un pressostat sur moto- pompe uniquement (verrouillage du groupe) 1 contact normalement ouvert (NO) se fermant à 0.9 bar et s'ouvrant à 0.6 bar.
- Un pressostat (commande de l'électro- pompe) 1 contact normalement fermé (NF) s'ouvrant à 1.8 bar et se fermant à 1.3 bar.
 1. Le premier pressostat autorise le démarrage du groupe principal si la pression en aval du réfrigérant est supérieure à 0.9 bar et le déclenche si la pression est inférieure à 0.6 bar.
 2. Le second pressostat enclenche la moto- pompe électrique pour une pression en amont du filtre inférieure à 1.3 bar.
 - Le déclenchement de la moto- pompe doit être manuel.
 - Type d'huile préconisé : 4°E à 50°C.
 -

3.14 Précaution à prendre durant le démarrage des pompes [8]:

Durant la période de démarrage de l'installation on utilise le by- passe manuel en permanence et la ligne de retour vers la bêche doit être munie d'un détendeur assurant un débit minimum de **50 m³/h**. le by- passe automatique est combiné avec le clapet de retenue et le détendeur y est incorporé.

Les conduites de by- passe partent des orifices latéraux du clapet « Schroeder », ces conduites de recirculation retournent au point haut de la bêche d'alimentation.

Sices conduites comportent des vannes des vannes d'isolement, il faut veiller à ce qu'elles soient constamment et entièrement ouvertes (enlever le volant par mesure de précaution ou le plomber en position ouverte).

3.15 Le Préchauffage de la pompe :

Une conduite de préchauffage est installée en by-pass du clapet « Schroeder » avec vanne d'isolement et détendeur.

3.16 Dispositif d'équilibre [7]:

- Le débit de fuite doit être rentré à la bêche alimentaire sans perte de charge exagérée. Une vanne d'isolement est montée sur cette conduite elle doit être constamment et entièrement ouverte (enlèvement du volant ou le plomber).
- Une soupape de sécurité « Sapag » est montée en dérivation sur cette conduite, pour éviter toute surpression accidentelle et la destruction de la pompe. Cette soupape est tarée à **8 kg/cm²** et peut décharger 17.5 m³/h. pour une surpression de +/- 10% au-dessus de sa valeur de réglage.

3.17 Contrôle à effectuer en exploitation [11]:

Contrôler périodiquement le manomètre placé sur la conduite de fuite du plateau d'équilibre ; une augmentation de l'écart de pression entre la sortie de la fuite du piston d'équilibre et l'aspiration de la pompe traduit une augmentation de débit de fuite donc une usure du dispositif d'équilibre. Cette pression ne peut pas dépassée **8 kg/cm²** qui est la pression de tarage de la soupape de sécurité, celle-ci ne doit pas débiter, sinon il faut vérifier la conduite de retour à la bêche si celle-ci est libre il faut contrôler la pompe.

- a) ➤ Contrôler la température à la sortie du circuit de refroidissement ; l'écart de température entre l'entrée et la sortie est de +/- 10°C. En cas d'échauffement supérieur vérifier les indicateurs de débit, une conduite peut être colmatée ou bien il peut y avoir repassage entre l'eau chaude pompée et le circuit de refroidissement. Cet incident demande une vérification minutieuse.
- b) Si la conduite de recirculation reste chaude lorsque la pompe est en service normal ; cela signifie que le by- passe automatique du clapet est défectueux.
- c) Si la pompe détourne à l'arrêt. Cela provient du fait que le battant du clapet principal ne ferme pas. Il faut immédiatement fermer les vannes, isoler la pompe et inspecter le clapet. La pompe ne peut dévirer, la lubrification n'est plus assurée à l'arrêt du groupe.
- d) Contrôler l'amplitude des vibrations aux paliers qui ne peuvent dépasser 25 microns (amplitude simple).
Les vibrations peuvent provenir soit d'un désalignement entre la pompe et l'engin d'entraînement, soit une usure de la pompe.
- e) Le débit vers la chaudière devient insuffisant à la charge maximum. Cela signifie que les cercles d'étanchéité entre roue et corps de pompe sont usés,

la pompe doit être révisée. La pression de service de la pompe ne doit pas être inférieure à 85% de la pression nominale.

3.18 Conditions à respecter avant le démarrage de la pompe [11]:

3.18.1 Démarrage en eau froide (la pompe et la chaudière étant

vides d'eau) :

- Admettre l'eau sur les circuits de refroidissement et vérifiant les indicateurs de débit.
L'eau utilisée pour la réfrigération doit être propre et non incrustante.
- Purger l'air en ouvrant les vannes sur les circuits d'eau de refroidissement.
- Ouvrir en premier lieu la vanne sur l'aspiration (V_A) de manière que l'eau qui entre dans la pompe soit passée sur le filtre. Cette vanne doit être et rester entièrement ouverte.
- Ouvrir la vanne de Recirculation manuel V_{RM} (la vanne de recirculation automatique est fermée)
- Ouvrir la vanne de fuite V_F du plateau d'équilibre.
- Purger l'air en ouvrant les vannes sur les circuits internes des garnitures mécaniques.
- Mettre la pompe en service, le sens de rotation ayant été préalablement contrôlé (pompe découplée).
- Ouvrir les purgeurs sur le circuit d'huile.
- Ouvrir l'entement la vanne de refoulement V_R tout en contrôlant la pression de refoulement, celle-ci ne doit pas descendre en-dessous de 85% de la pression nominale, la pompe étant entraînée à sa vitesse normale de rotation.

3.18.2 Démarrage en eau chaude (la chaudière étant à pression nominale) :

- L'eau de refroidissement doit être maintenue sur les circuits d'eau.
- La vanne de préchauffage V_P est ouverte.
- L'efficacité du préchauffage peut être contrôlé avec des jauges d'épaisseur et ce en contrôlant la concentricité de l'arbre de la pompe avec l'alésage des couvercles des garnitures mécaniques.
- La pompe étant en « **stand-by** » donc les vannes : V_A, V_F, V_{RA}, V_{RS} sont ouverts. Le groupe peut être démarré.

Chapitre 4



4.1 Application de la Méthode « **Arbre de défaillance – adD - » sur le Système à Ballon à vapeur 110-F:**

4.1.1 Définition du Système à étudier :

L'installation comme s'est décrit au paragraphe « Description du circuit du ballon à vapeur 101-F », est composé essentiellement par :

1. Trois groupes de turbopompes centrifuges et identiques utilisés principalement dans les procédés- pétrochimique ;
2. Un groupe motopompe idem aux trois pompes citées ci-dessus, seulement celui-là au lieu d'être commandé par une turbine à vapeur, il est commandé par un moteur électrique 5.5 KV et il est utilisé au démarrage de l'unité et/ou vient en secours pour les trois (03) turbopompes en cas de manque vapeur pour les Turbines ;
3. La pression de service du système est de l'ordre de 123.5 bars ;
4. Un ballon de stockage eau+ vapeur (caractéristique technique défini dans une feuille de donnée par le constructeur)
5. Vannes d'aspiration,
6. Vannes de refoulement,
7. Clapets anti-retour,
8. Vannes de by –pass,
9. Canalisation principale de circulation d'eau,
10. Canalisation auxiliaire de régulation de la circulation eaux débit minimal,
11. Système à huile de lubrification des paliers de pompes, 8
12. Système de refroidissement de l'huile de lubrification
13. Système de régulation (SR) du ballon **110-F**.

4.1.2 Fonctionnement du système à étudier :

Le système fonctionnent avec quatre groupes de pompes **104-JS/104-JC/104-JB/104-JA**. Il démarre avec le groupe Motopompe par manque de vapeur et après l'accumulation de vapeur en quantité suffisante au bon fonctionnement de la boucle production d'ammoniac, il cède le tour aux turbopompes à tour de rôle pilotées par un système de régulation automatique basé sur le niveau d'eau dans le ballon à vapeur 110-F.

L'eau pompé depuis le réservoir **101-U (RE)** est traité a priori avant son stockage au réservoir (procédé de déminéralisation, conductivité d'eau exigée = xxxxxx siemens)

4.1.3 Enoncé de la défaillance à analyser :

Le scénario que j'envisage à analyser est le suivant : perte du niveau d'eau d'alimentation du ballon à vapeur 101-F durant la production de l'Ammoniac.

4.1.4 Etude du système :

Selon les visites sur le terrain accompagnées par les techniciens de l'unité ammoniac (il nous a été très difficile d'accéder aux installations vu le degré de sécurité accordé à cette zone : défense de circulation aux étrangers inclus les étudiants sans le port des effets de sécurité adéquate et c'est ce qui nous a manqué, défense de prise de photos et le temps de séjour très limité vu les risques imminents pour les personnes.), nous avons pu avec un peu d'effort et de volonté de comprendre le système du ballon à vapeur :

- son importance dans la boucle de fonctionnement de l'unité ammoniac (Prise de contacts avec les opérateurs superviseurs du procès),
- de connaître les différents pannes ayant surgit avec le temps (malheureusement ne sont pas consignés nulle part, chose qui nous a étonné)
- les méthodes de maintenance adoptés (Mix : Conditionnel + Curative + Palliative),
- inspection sommaire de l'état physique des composants constituant le système (voir le schéma de l'étude ci- après).
- L'environnement du système difficile à vivre en cas de panne (trop de bruit et sifflement de la vapeur) ainsi le risque de brûlure en contact avec les organes est fréquent ce qui impacte l'état psychologique des intervenants.

4.1.5 Reconnaissance des causes (événements) probables possible :

Afin d'identifier tous les événements possibles et probables générateurs de l'évènement redouté, nous avons adopté la démarche basée sur le principe dit « **déductif** ». Chaque événement de rang (**n-1**) est déduit d'une manière logique de l'évènement (**n**) jusqu'à la fin de l'opération et au dernier événement dit « **évènement de base** ».

Donc les différents événements recensés sur notre système d'étude "Ballon à vapeur110-F" sont regroupés dans le tableau suivant :

N°	Evènements probables
1	Défaillance des clapets antiretour
2	Fissure ou fuites du réseau (conduites) de transport d'eau d'alimentation
3	Défaillance des vannes de refoulement
4	Défaillance des vannes de recirculation à débit minimale
5	Défaillance du système de régulation des débits d'eau d'alimentation
6	Défaillance des pompes
7	Défaillance moteur électrique
8	Défaillance du circuit en amont des pompes

Tableau N° 04 : Evènements probables

4.1.6 Construction de l'arbre de défaillance correspondant du scénario fixé au point 4.1.3 :

Voir figure N°25 Ci-contre

4.1.7 Traitement qualitatif du système :

4.1.7.1 Codage de l'arbre de défaillance :

On auscultant le système du Ballon à vapeur, on a pu recensé les évènements probabilistes consignés dans le tableau suivant :

Codes Evènements	Désignations des Evènements
ER	Perte niveau d'eau d'alimentation chaudière vers 101-F
A	Débit faible/ nul en aval du clapet antiretour de motopompe 104-JS
B	Débit faible/ nul en aval du clapet antiretour de turbopompe 104-JC
C	Débit faible/ nul en aval du clapet antiretour de turbopompe 104-JB
D	Débit faible/ nul en aval du clapet antiretour de turbopompe 104-JA
E	Rupture tubes du circuit d'eau d'alimentation du ballon à vapeur 110-F
F	Clapet Anti retour défaillant 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
G	Vanne Refoulement fermée 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
H	Vanne de recirculation manuelle trop ouverte 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
I	Vanne de recirculation automatique ouverte
K	Débit faible ou nul à la sortie de la pompe 104-JA/104-JB/104-JC/104-JS
L	Insuffisance d'eau d'aspiration 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
M	Système de régulation à trois éléments défaillant pour 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
N	Moteur électrique de la pompe de secours 104-JS en panne
O	Vanne aspiration fermée 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
P	
Q	Colmatage des Filtres 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA
R	Pompe en panne 104-JS/104-JC/104-JB/104-JA

Tableau N° 05 : Codes des évènements

L'équation de l'Evènement Redouté « ER » et après des réductions successives devienne :

$$ER = EF+EG+EH+EI+EL+EM+ER+EN+EO+EP+ET$$

4.1.9 chemin critique (coupes minimales) :

$$ER = EF+EG+EH+EI+EL+EM+ER+EN+EO+EP+ET$$

4.1.10 Ordres des Coupes Minimales :

L'ensemble Coupes Minimales sont d'Ordre 2

- EF=coupe minimale d'ordre 2,
- EG=coupe minimale d'ordre 2,
- EH=coupe minimale d'ordre 2,
- EI=coupe minimale d'ordre 2,
- EL=coupe minimale d'ordre 2,
- EM=coupe minimale d'ordre 2,
- ER=coupe minimale d'ordre 2,
- EN=coupe minimale d'ordre 2,
- EO=coupe minimale d'ordre 2,
- EP=coupe minimale d'ordre 2,
- ET=coupe minimale d'ordre 2,

4.1.11 Tableau du nombre d'apparition des évènements de base par longueur :

Les fréquences d'apparition des évènements par longueur nous donne une idée sur le degré d'importance de l'évènement. De ce fait, le Service de Maintenance doit éradiquer cet évènement par des solutions technologiques ou une prise en charge particulière afin de l'étouffer.

Evènements	E	F	G	H	I	L	M	R	N	O	P	T
L2	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau N° 29 : Tableau d'apparition des évènements

D'après le tableau ci-dessous, l'évènement E est très présent dans toutes les coupes minimales, ce qui mérite une prise en charge particulière.

4.2 Traitement quantitatif :

4.2.1 Quantification des probabilités des évènements de base :

La probabilité de défaillance se calcule d'après la formule suivante:

$$P = 1 - R(t)$$

La fiabilité est donnée par la formule suivante :

$$R = e^{-\lambda t}$$

Avec $t = 720 \text{ h}$ (durée de référence pour l'analyse du système)

Donc la quantification des probabilités de l'ensemble des évènements se résume dans le tableau suivant :

Evènement	E	F	G	H	I	L	M	R	N	O	P	T
Défaillance λ (1/h) (1)	3.3 E-5	1.3 E-4	1.6 E-4	4.1 E-4	1.3 E-4	0.7 E-4	1.0 E-3	0.3 E-2	1.1 E-3	1.8 E-3	0.3 E-3	5.3 E-4
$\lambda.t$	0,023	0,093	0,115	0,295	0,093	0,050	0,72	2,16	0,79 2	1,296	0,216	0,3816

(1) Donnée Constructeur

Tableau N° 06 : probabilités des évènements de base

4.2.2 Calcul de la probabilité de l'évènement redouté :

La probabilité de l'évènement redouté P(ER) se calcule comme suit :

$$ER = A.B.C.D.E$$

$$A = F+G+H+I+K$$

$$B = F+G+H+I+K$$

$$C = F+G+H+I+K$$

$$D = F+G+H+I+K$$

Avec $K = L+M+R+N+O+P+T$

$$P(K) = f(L, M, R, N, O, P, T)$$

$$1 \quad P_{LM} = P(L) + P(M) - [P(L)P(M)]$$

$$2 \quad P_{RN} = P(R) + P(N) - [P(R)P(N)]$$

$$3 \quad P_{OP} = P(O) + P(P) - [P(O)P(P)]$$

$$4 \quad P(T)$$

1+2 $P_{LMRN} = P_{LM} + P_{RN} - [P_{LM} \cdot P_{RN}]$
 (1+2)et 3 $P_{LMRNOPT} = P_{LMRN} + P_{OP} - [P_{LMRN} \cdot P_{OP}]$

[(1+2)et+] et4 $P_{LMRNOPT} = P_{LMRNOPT} + P_T - [P_{LMRNOPT} \cdot P_T]$

P_{LM}	P_{RN}	P_{OP}	P_T	P_{LMRN}	$P_{LMRNOPT}$	$P_{LMRNOPT}$
0,734112	1,24128	1,232064	0,3816	1,0642	0,9851	0,990793

$P(K) = 0,990$

calcul de P(A)

$A = F + G + H + I + K$

5 $P_{FG} = P(F) + P(G) - [P(F)P(G)]$

6 $P_{HI} = P(H) + P(I) - [P(H)P(I)]$

7 P_K

(5+6) $P_{FGHI} = P_{FG} + P_{HI} - [P_{FG} \cdot P_{HI}]$

(5+6)et7 $P_{FGHIK} = P_{FGHI} + P_K - [P_{FGHI} \cdot P_K]$

P_{FG}	P_{HI}	P_K	P_{FGHI}	P_{FGHIK}
0,198017	0,36116928	0,99	0,48767	0,9949

$P(A) = 0,9949$

Comme $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = 0,9949$

$P(ER) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) \cdot P(K)$

P(A)	P(B)	P(C)	P(D)	P(E)	P(ER)
0,9949	0,9949	0,9949	0,9949	0,0238	0,0233

$P(ER) = 0,0233$

$P(ER) = 0.023$ probabilité de réalisation de l'évènement redouté

Le résultat obtenu de P(ER) reflète la Sdf du système, chose qui est évidente par la faible valeur de probabilité obtenue.

4.3 Tableau de synthèse type 1 :

Code	Evènement de Base	Probabilité d'apparition	Gravité		
			Ordre 1	Ordre 2	TC (taux de contribution de la Coupe dans ER)
E	Rupture ou fuite du réseau d'eau	0.06		X	
F	Défaillance CAR	0.24		X	1.54%
G	vanne refoulement bloquée	0.29		X	1.91%
H	Vanne manuelle ouvert de recirculation débit minimal	0.58		X	4.92%
I	Défaillance Vanne automatique de recirculation débit minimal	0.24		X	1.54%
L	Insuffisance eau aspiration	0.15		X	0.8%
M	Défaillance système de régulation	0.88		X	12.03 %
R	Pompe en panne	0.99		X	36.47 %
N	Défaillance moteur électrique	0.90		X	13.38%
O	Vanne aspiration fermée	0.98		X	21.91%
P	Filtre aspiration colmaté	0.47		X	3.60%
T	Défaillance turbine à vapeur	0.68		X	6.39%

Tableau N° 08 : Tableau de synthèse type 1

4.4 Interprétation des résultats :

- L'analyse des résultats dressés dans le tableau de synthèse « &4.2.2 » ci-dessus, montre avec évidence que la Méthode «**Arbre de Défaillance** » a donné des résultats très cohérentes avec la réalité et la nature des équipements.
- Le classement des évènements suivant un ordre décroissant de défaillance se manifeste comme suit :
 1. Pompe en panne
 2. Vanne d'aspiration fermée
 3. Moteur en panne
 4. Système de régulation défaillant
 5. Turbine
 6. Vanne manuel de recirculation à débit minimal
 7. Filtre d'aspiration colmaté
 8. Vanne de refoulement bloquée
 9. Clapet antiretour « CAR » défaillant
 10. Vanne automatique de recirculation à débit minimal

4.5 Recommandations :

A la lumière des résultats obtenus dans notre modeste diagnostic utilisant l'outil « **ARBRE DE DEFAILLANCE** » nous préconisons aux utilisateurs, équipe de production et équipe de maintenance chacun en ce qui le concerne, de bien veillez à exécuter les tâches suivantes :

A. Equipe de production :

- ✓ Veillez à ce que le récipient d'aspiration soit protégé contre tout intrus afin de protéger les filtres de la défaillance de colmatage,
- ✓ Respecter les consignes d'exploitation du système selon le cahier de charge,
- ✓ L'ouverture de la vanne manuelle doit être une ouverture optimum
- ✓ La vanne de refoulement doit être libre à l'ouverture et à la fermeture

B. Equipe de Maintenance :

- ✓ Préventif régulier du système de régulation du niveau d'eau du ballon,
- ✓ Préventif régulier de l'Alimentation Electrique du moteur (commande et puissance)
- ✓ Prévoir une alarme sonore si vanne aspiration fermé ou bloqué à l'ouverture,
- ✓ Une rotation continue de préventif du groupe turbopompes ;
- ✓ Un test périodique des clapets antiretour doit se faire afin d'éviter le virage du sens de rotation des pompes, ce qui provoque l'usure sûr les deux paliers de pompe en régle.

Conclusion générale

Le stage pratique que nous avons effectué au sein de l'entreprise FERTIAL a été une expérience bénéfique.

En s'appuyant sur les conseils de mon encadreur le Professeur Mr Sari Mohamed Rafik, j'ai pu terminer ce travail d'analyse et d'application de l'outil de diagnostic, qui s'intitule « **Arbre de défaillance** », avec une certaine méthodologie scientifique. De même, les résultats trouvés qui s'avèrent très cohérents avec la réalité. En effet, la probabilité de défaillance trouvée, manifeste clairement les barrières de sécurité de fonctionnement sur lesquels est conçue le système du ballon à vapeur 101-F.

Notre système d'étude est intégré dans une chaîne complexe de réaction chimique où le temps de réponse de tous les équipements est primordial, c'est la raison pour laquelle le Concepteur a choisi une telle architecture du système d'alimentation en eau de chaudière.

Pour assurer un niveau de sécurité élevé, il est fortement recommandé de :

- ✓ Protéger les filtres de la défaillance contre le colmatage.
- ✓ Assurer une ouverture optimale de la vanne manuelle
- ✓ Contrôler régulièrement le niveau d'eau du ballon,
- ✓ Contrôler l'alimentation Electrique du moteur (commande et puissance)
- ✓ Prévoir une alarme sonore si vanne aspiration fermé ou bloqué à l'ouverture,
- ✓ Contrôler régulièrement le groupe des turbopompes ;
- ✓ Contrôler régulièrement les clapets anti-retour.

Finalement, la formation et la motivation continue des opérateurs de l'entreprise va permettre sans doute d'augmenter d'une manière appréciable le niveau de sécurité du système.

- **Bibliographie :**

- [1] Internet : 09-10ATI2 OI Cours Maintenance S115- organisation et suivi de la maintenance-CH1 Concepts de maintenance.
- [2]]Internet : Thèse_LGardes_01 pdf.
- [3] LCSi –Institut pour une culture de sécurité Industrielle- les Cahiers de la sécurité Industrielle 2009-09- l’analyse de risque fréquence des évènements initiateurs d’accidents.
- [4] HTML Document. Fiabilité en Maintenance, conseil, accompagnement, formation (fiabilité-comportement du matériel, défaillance, probabilité).
- [5] HTML Document. Maintenance-Thème.
- [6] Probabilité et Statistique : Cours et Problème. Série SHAUM Auteur : MURRAY R SPIEGEL.
- [7] Volume v - Ammoniac Annaba, Creusot-Loire Entreprises, KELLOGG France.
- [8] Manuel opératoire NH3 volume 1- SANATRACH ANNABA
- [9] Arbre de défaillances : Wikipedia.html
- [10] Analyse arbre de pannes : Norme CEI/IEC 61025 second édition 2006-12 (International Electro technical Commission)
- [11] Notice d’entretien et de conduite : Matériel 104-j pompe ENSIVAL année 1977.
- [12] André Lannoy : Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement - repères historiques et méthodologiques. Lavoisier 2008
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre de défaillance.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_de_d%C3%A9faillance)