



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR « BATNA »  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL  
LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE ET PRODUCTIQUE



## MEMOIRE DE MAGISTER

PRESENTE AU

Laboratoire d'Automatique et Productique  
**LAP**

*En vue de l'obtention d'un diplôme de magister*

**Spécialité**

*Génie Industriel et Productique*

**Par**

**SAKHRI LARNENE KAMEL**  
Ingénieur en Génie Industriel

*Thème :*

---

## Ordonnancement de la maintenance et risques associés

---

Soutenu le : Jeudi 31/05/2012, devant le jury composé de :

Dr. M. D. MOUSS	MCA	Université de Batna	Président
Dr. H. SMADI	MCA	Université de Batna	Rapporteur
Dr. K. TALBI	Pr	Université de Constantine	Examineur
Dr. A. MECHENENE	MCA	Université de Batna	Examineur
Mr. Y. BAHMANI	MAA	Université de Batna	Invité

Année 2011/2012

## *Dédicace*

*Je dédie ce Mémoire à mes parents et à toute la famille...*

## **Remerciements**

*Ce travail a été réalisé au Département de Génie Industriel université de Batna à distance pendant deux ans dans le cadre d'un travail de recherche en Magister option Génie Industriel et Productique.*

*Je saisis l'occasion de remercier tous les enseignants du Département de Génie Industriel pour leurs soutiens et formation.*

*Je tiens tout d'abord à remercier très chaleureusement Le Docteur H. SMADI Durant ces deux années, il m'a fait partager toute sa compétence, son savoir et ses nombreuses idées, avec confiance. Cette confiance, associée à son soutien et à sa gentillesse a été un enrichissement incroyable, et pas seulement scientifique. Ce travail a donc été un réel plaisir grâce à lui.*

*Sans oublier de remercier aussi l'équipe du complexe GLIK Skikda qui m'a facilité la tâche de subir mon stage pratique ainsi que leurs soutiens.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur le Docteur M. D. MOUSS qui a bien voulu m'honorer en acceptant d'être le président de jury.*

*Je suis extrêmement sensible à l'honneur que me font Messieurs le Docteur A. MECHENENE, Y. BAHMANI, et K. TALBI professeur à l'université de Constantine, en acceptant de participer à cette mémoire de magister.*

*Et j'ai également une pensée très forte pour mes parents et mes frères et sœurs qui m'ont soutenu au cours de ces années d'études.*

---

## SOMMAIRE

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Développement et historique de l'industrie gazière en Algérie</b>	
1.1 Introduction .....	3
1.2 Industrie du GNL : Caractéristiques techniques de La chaîne de GNL .....	3
1.3 Rétrospective et Situation du GNL au monde .....	4
1.3.1 Les échanges internationaux de GNL.....	4
1.3.2 Évolution de la demande mondiale de GNL .....	7
1.4 L'industrie de GNL en l'Algérie .....	7
1.4.1 Les potentiels.....	7
1.4.1.1 Les usines de liquéfaction GN.....	8
1.4.1.2 Les capacités d'exportation .....	9
1.4.2 Les risques industriels .....	11
1.4.2.1 Accidents survenus sur les installations de GNL .....	11
1.4.2.2 L'explosion du complexe de GNL (GL1K) de Skikda.....	13
1.5 Conclusion .....	16
<b>CHAPITRE II: Analyse et évaluation des risques industriels</b>	
2.1 Introduction .....	17
2.2 Risque : définitions et concepts de base .....	17
2.2.1 Définitions du risque .....	17
2.2.2 Danger .....	17
2.2.3 Dommage .....	17
2.2.4 Accident majeur.....	17
2.3 Les risques industriels .....	18
2.3.1 Définition.....	18
2.3.2 Typologie des risques industriels .....	18
2.4 Gestion des risques .....	19
2.4.1 Définition.....	19
2.4.2 Processus de gestion des risques .....	19
2.4.2.1 Analyse du risque .....	20
2.4.2.2 Evaluation de l'acceptabilité des risques.....	20
2.4.2.3 Traitements du risque .....	20
2.4.2.4 Acceptation du risque .....	20
2.4.2.5 Communication du risque.....	20
2.4.2.6 Surveillance et réexamen du risque.....	20
2.5 Méthodes d'analyse des risques .....	21
2.5.1 Classification des méthodes d'analyse de risque.....	21
2.5.1.1 Méthodes quantitatives et qualitatives.....	21
2.5.1.2 Approche déterministe et Approche probabiliste .....	22
2.5.1.3 Démarche inductive et démarche déductive.....	22
2.5.2 Panorama des méthodes d'analyse de risque.....	23
2.5.3 Critères de choix d'une méthode d'analyse de risque .....	24
2.5.4 Combinaison entre l'HAZOP et l'AdD .....	25
2.5.4.1 La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study) .....	25
2.5.4.2 Arbre des Défaillances (AdD).....	27

---

---

2.6 Méthode d'évaluation des risques des risques.....	30
2.7 Conclusion.....	31
<b>CHAPITRE III : Planifications des tâches de maintenance dans un système de production</b>	
3.1 Introduction.....	32
3.2 Maintenance : définitions et concepts de base.....	32
3.2.1 Définition de la maintenance.....	32
3.2.2 Pronostic.....	32
3.2.3 Dégradation.....	32
3.2.4 Défaillance.....	33
3.2.5 Panne.....	33
3.2.6 Diagnostic.....	33
3.3 Organisation et gestion des activités de maintenance dans un système de production.....	33
3.3.1 La maintenance dans l'entreprise.....	33
3.3.2 Politiques de maintenance.....	34
3.3.2.1 La maintenance corrective.....	34
3.3.2.2 La maintenance préventive.....	35
3.3.3 Comparaison entre les différentes formes de maintenance.....	36
3.3.4 Critères de choix d'une politique de maintenance.....	36
3.3.5 Optimisation d'une politique de maintenance.....	37
3.3.6 Maintenance préventive.....	38
3.3.6.1 Mise en place d'une maintenance préventive.....	38
3.3.6.2 Ordonnancement des tâches de maintenance.....	38
3.3.7 Orientations des politiques de maintenance.....	41
3.3.7.1 Stratégie de type Life Cycle Cost (LCC).....	42
3.3.7.2 Stratégie de type Total Productive Maintenance (TPM).....	42
3.3.7.3 Stratégie de télémaintenance.....	42
3.3.7.4 Stratégie de e-maintenance.....	43
3.3.7.5 Stratégie de type Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF).....	43
3.4 Conclusion.....	43
<b>CHAPITRE IV : Maintenance basée sur le risque (MBR)</b>	
4.1 Introduction.....	45
4.2 Problématique de MBR.....	45
4.3 Les analyses des risques dans un processus de maintenance.....	46
4.3.1 Bref aperçu sur l'évolution de la politique de maintenance vers MBR.....	47
4.3.2 Le risque et sa pertinence dans la maintenance (MBR).....	47
4.3.3 Le rôle des analyses des risques dans l'optimisation des priorités de maintenance.....	48
4.4 Méthodologie de la maintenance basée sur le risque (MBR).....	49
4.5 Historique d'application de la MBR.....	51
4.6 Conclusion.....	52
<b>CHAPITRE V : Etude de cas</b>	
5.1 Introduction.....	53
5.2 Présentation du complexe GL1K.....	53
5.2.1 Localisation.....	53
5.2.2 Historique.....	54
5.2.3 Capacité de production.....	55
5.2.4 Description générale de l'activité de GL1K.....	55
5.2.5 Localisation des risques sur le complexe GL1K.....	59
5.3 Méthodologie de travail.....	59
5.3.1 Description détaillée du procédé PRICO de l'unité 5P et 6P.....	61
5.3.1.1 Section traitement du gaz.....	61

---

5.3.1.2 Section liquéfaction .....	63
5.3.1.3 Section fractionnement .....	65
5.3.1.4 Section Production de vapeur .....	66
5.3.2 Choix de l'équipement de notre application.....	68
5.3.3 Analyse et estimation des risques du groupe turbocompresseur .....	70
5.3.3.1 Analyse qualitative .....	72
5.3.3.2 Analyse quantitative .....	82
5.3.4 Évaluation des risques du GTC (matrice de criticité 5*5).....	89
5.3.5 Planifications des tâches de maintenance du GTC.....	91
5.4 Conclusion .....	96
<b>Conclusion Générale et perspectives .....</b>	<b>97</b>
<b>Référence bibliographiques</b>	
<b>Annexe</b>	

---

## **LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES FIGURES**

<b>Figure 1.1</b> La chaîne de GNL .....	4
<b>Figure 1.2</b> Les plus grands pays Exportateurs / Importateurs de GNL en 2004 .....	5
<b>Figure 1.3</b> Les principales routes maritimes de transport de GNL au monde.....	6
<b>Figure 1.4</b> Évolution et prévision de la demande mondiale de gaz .....	7
<b>Figure 1.5</b> Localisation des unités de liquéfaction de GN en Algérie .....	8
<b>Figure 1.6</b> Les routes d'exportation GN-GNL à partir l'Algérie.....	10
<b>Figure 1.7</b> L'explosion du complexe de GNL (GLK1) de Skikda.....	13
<b>Figure 2.1</b> Typologie des risques industriels .....	18
<b>Figure 2.2</b> Processus de gestion des risques .....	19
<b>Figure 2.3</b> Typologie et Approches des méthodes d'analyse de risque .....	21
<b>Figure 2.4</b> Classification des principales méthodes d'analyse de risque .....	23
<b>Figure 2.5</b> Déroulement de l' HAZOP .....	26
<b>Figure 2.6</b> Déroulement de l'Add .....	29
<b>Figure 2.7</b> Exemple de l'Add.....	29
<b>Figure 2.8</b> Classification des risques .....	30
<b>Figure 3.1</b> Modèle entrée-sortie de la maintenance dans l'entreprise.....	33
<b>Figure 3.2</b> Le contenu de la fonction maintenance .....	33
<b>Figure 3.3</b> Les différentes formes de maintenance .....	34
<b>Figure 3.4</b> Comparaison entre les différentes formes de maintenance .....	36
<b>Figure 3.5</b> Diagramme de choix d'une forme de maintenance .....	37
<b>Figure 3.6</b> Optimisation d'une politique de maintenance .....	38
<b>Figure 3.7</b> Exemple d'un diagramme de GANTT .....	40
<b>Figure 3.8</b> Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance .....	41
<b>Figure 4.1</b> Résumé de la problématique de recherche .....	46
<b>Figure 4.2</b> Architecture de la méthodologie MBR .....	49
<b>Figure 4.3</b> Diagramme de la méthodologie MBR.....	50
<b>Figure 5.1</b> Situation du complexe GL1K dans la Zone Industrielle de Skikda (ZIK) .....	53
<b>Figure 5.2</b> Vue panoramique du complexe GL1K.....	54
<b>Figure 5.3</b> Schéma simplifié de liquéfaction .....	56
<b>Figure 5.4</b> Localisation des unités de liquéfaction 10, 5P, 6P et le nouveau train (Méga train) dans le complexe GL1K.....	57
<b>Figure 5.5</b> Organigramme du complexe GL1K .....	58
<b>Figure 5.6</b> Localisation des risques sur le complexe GL1K .....	59
<b>Figure 5.7</b> Diagramme de la méthodologie de travail.....	57
<b>Figure 5.8</b> Schéma simplifié du procédé de liquéfaction PRICO des unités 5P/6P.....	61
<b>Figure 5.9</b> Décarbonatation .....	62
<b>Figure 5.10</b> Déshydratation et Démercurisation .....	62
<b>Figure 5.11</b> Liquéfaction .....	64
<b>Figure 5.12</b> Compression MCR.....	65
<b>Figure 5.13</b> Fractionnement.....	66
<b>Figure 5.14</b> Production de vapeur.....	67
<b>Figure 5.15</b> Diagramme de Pareto pour les causes d'arrêt d'unité 5P .....	69
<b>Figure 5.16</b> Fiche technique du groupe turbocompresseur CT 201 / C 201 .....	71
<b>Figure 5.17</b> Interface STEAMER .....	78
<b>Figure 5.18</b> Le principe d'un régulateur PID .....	79
<b>Figure 5.19</b> Stratégies de régulation d'un seul élément.....	80
<b>Figure 5.20</b> Stratégies de régulation trois éléments .....	81
<b>Figure 5.21</b> Décomposition fonctionnelle du système.....	82
<b>Figure 5.22</b> Décomposition du GTC .....	83
<b>Figure 5.23</b> Arbre de défaillance du compresseur C 201.....	86
<b>Figure 5.24</b> Coupes minimales .....	87
<b>Figure 5.25</b> Probabilité d'occurrence d'EI en fonction du temps .....	88
<b>Figure 5.26</b> Variation des Probabilité d'occurrence d'ER en fonction du temps .....	89
<b>Figure 5.27</b> Diagramme de Pareto (causes de panne du GTC).....	91
<b>Figure 5.28</b> Cheminement de la demande de travail (DT) maintenance du GTC.....	92
<b>Figure 5.29</b> Modélisation de l'ordonnancement de la maintenance du GTC (diagramme de GANTT).....	94

# **LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau 1.1** Fiche technique des unités de liquéfaction en Algérie..... 9

**Tableau 1.2** Contrat d'exportation de GNL..... 10

**Tableau 1.3** Accidents survenus sur les installations de GNL en Algérie ..... 12

**Tableau 1.4** Les conséquences de l'explosion du GNL de Skikda..... 14

**Tableau 2.1** panorama des méthodes d'analyse de risque ..... 24

**Tableau 2.2** Exemple de tableau pour l'HAZOP ..... 26

**Tableau 2.3** Symboles de certains éléments de l'AdD ..... 28

**Tableau 2.4** Matrice de criticité..... 30

**Tableau 5.1** Capacité de production du complexe GL1K..... 55

**Tableau 5.2** les compositions chimiques de GN, GNL, et MCR..... 67

**Tableau 5.3** Les paramètres de fonctionnement de l'unité 5P ..... 68

**Tableau 5.4** Calcul selon la méthode de Pareto ..... 69

**Tableau 5.5** Feuille présentation HAZOP ..... 73

**Tableau 5.6** Les symboles du régulateur STEAMER..... 79

**Tableau 5.7** AMDEC Compresseur C 201 ..... 84

**Tableau 5.8** Matrice de criticité du Compresseur C 201 ..... 90

**Tableau 5.9** Calcul selon la méthode de Pareto (NP) ..... 91

**Tableau 5.10** Priorité et genre de la maintenance..... 93

---

## LISTE DES SYMBOLES

<b>G/O</b>	Gravité/Occurrence
<b>APR</b>	Analyse Préliminaire des Risques
<b>AMDE</b>	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets
<b>AMDEC</b>	Analyse des Modes de défaillance et de leurs Effets et de leur criticité
<b>ADE</b>	Arbre d'événements
<b>AdD</b>	Arbre de défaillances
<b>HAZOP</b>	Hazard and Operability Study
<b>MOSAR</b>	Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques
<b>MADS</b>	Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes
<b>ICI</b>	Imperial Chemical Industries
<b>UIC</b>	Union des Industries Chimiques
<b>ER</b>	Evénement redouté
<b>v</b>	Vanne
<b>p</b>	Pompe
<b>MC</b>	Maintenance Corrective
<b>MP</b>	Maintenance Préventive
<b>LCC</b>	Life Cycle Cost
<b>TPM</b>	Total Productive Maintenance
<b>MBF</b>	Maintenance Basée sur la Fiabilité
<b>MBR</b>	Maintenance basée sur le risque
<b>RFM</b>	Risk Focused Maintenance
<b>FMECA</b>	Failure Mode, Effect and Criticality Analysis
<b>RBM</b>	Risk Based Maintenance
<b>SMMBR</b>	Système de Management de la Maintenance Basée sur le Risque
<b>PDCA</b>	Plan Do Check Act
<b>HAVAC</b>	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
<b>ISO</b>	International Organisation for Standardization
<b>GNL</b>	Gaz Naturel Liquéfié
<b>GNT</b>	Gaz Naturel traité
<b>GN</b>	Gaz Naturel
<b>CNDG</b>	Centre National de Dispatching Gaz
<b>SONATRACH</b>	Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures
<b>ARIA</b>	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
<b>GLK1</b>	Gaz Liquéfié SKIKDA 1
<b>Mm<sup>3</sup></b>	Millions de m <sup>3</sup>
<b>T/an</b>	Tonnes par an
<b>G</b>	Giga (10 <sup>9</sup> )
<b>Gm<sup>3</sup></b>	Giga de m <sup>3</sup>
<b>m<sup>3</sup> / J</b>	m <sup>3</sup> par jour
<b>MCR</b>	Multi Composant Réfrigérant
<b>LTH</b>	Liquéfaction et Transformation des Hydrocarbures
<b>ZIK</b>	Zone Industrielle de Skikda
<b>GPL</b>	Gaz de Pétrole Liquéfié

---

<b>RA1K</b>	Raffinerie de Skikda
<b>CP1K</b>	Entreprise Nationale Industries Pétrochimiques
<b>GTC</b>	Groupe turbocompresseur
<b>DCS</b>	Distributed Control System
<b>PCF</b>	Plan de Circulation des fluides
<b>PID</b>	Proportionnel Intégral Dérivé
<b>DT</b>	Demande de travail
<b>OT</b>	Ordre de travail
<b>ER</b>	Evénement Redouté
<b>BE</b>	Boite Etanchéité

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Actuellement, le monde industriel est devenu plus sensible à la maîtrise des accidents majeurs à cause des conséquences graves et même catastrophique matérielles, humaines et environnementales. Pour cela des efforts considérables sont fournis en matière de gestion des risques et d'optimisation du politique de maintenance afin de prévenir ces accidents.

Le patrimoine industriel rencontre des difficultés pour assurer une maintenance appropriée qui répond à un besoin nouveau : celui de maîtriser techniquement et économiquement des systèmes productifs, tout en évitant de mettre en péril la sécurité des installations et des personnes, contribuant ainsi à la pérennité. Or, comme les pannes et les incidents des systèmes de production sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie et viennent amputer lourdement la capacité de production.

La question centrale de ce mémoire vient adresser les deux préoccupations citées précédemment : la maîtrise des risques industriels et l'optimisation de la politique de maintenance.

*Comment réduire les risques industriels à partir d'une meilleure planification des tâches de maintenance afin de garantir la sécurité industrielle dans les systèmes de production ?*

Dans le premier chapitre nous commençant par une présentation de notre domaine d'application qui est l'industrie de GNL. Pour aborder ensuite une description de cette industrie en Algérie ces potentiels et les risque industriels encourus.

Le deuxième chapitre intitulé « analyse et évaluation des risques industriels ». Dans un premier temps, nous avons débutés d'abord par présenter quelques concepts et définitions fondamentaux liés à la démarche d'analyse des risques industriels puis décrire la démarche de gestion des risques en expliquant les différents étapes constituant cette démarche. Nous abordons ensuite quelques méthodes qualitatives et quantitatives d'analyse et d'évaluation des risques. Enfin nous examinons en détail les deux méthodes HAZOP et AdD.

Le troisième chapitre est consacré à la planification des activités de maintenance. Ce dernier commence par une présentation des notions de base de la maintenance. Pour exposer ensuite, les déférentes politiques d'organisation de la maintenance dans l'entreprise. Enfin, nous abordons les spécificités des problèmes d'ordonnancement dans un contexte industriel.

Le quatrième chapitre intitulé « maintenance basée sur le risque ». Ce chapitre est une liaison entre le deuxième et le troisième chapitre. Il est organisé ainsi : un premier point introduira la notion de risque dans une politique de maintenance. Puis, nous présenterons l'approche MBR « Maintenance Basée sur le Risque» est les déférents domaines

d'application.

Le cinquième chapitre est consacré à une application industrielle de l'approche MBR sur le group turbocompresseur CT201/C201 de l'unité GNL (5P) du complexe GL1K qui a fait l'objet de notre étude de cas :

- Faire une analyse des risques sur le turbocompresseur CT201/C201 ;
- Evaluer les différents risques liés au turbocompresseur ;
- Faire ressortir les risques dominants ;
- Trouver les sources principales de l'apparition du risque élevé ;
- Améliorer le planning de maintenance du groupe turbocompresseur.

Enfin, le présent mémoire sera clôturé par une conclusion générale résumant le travail accompli et les perspectives envisagées.

# **CHAPITRE I.**

## **DEVELOPPEMENT ET HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE GAZIERE EN ALGÉRIE**

## 1.1 Introduction

A partir du milieu des années 60 et jusque maintenant, l'industrie Gazière en Algérie connaît un essor remarquable, pour répondre à une demande croissante du marché, la politique de développement alors consisté à augmenter considérablement la taille des usines de liquéfaction et leur capacité de production. Ce passage à plus grande échelle eut pour conséquence une augmentation rapide des risques liés à la manipulation, au stockage et au transport de Gaz Naturel Liquéfié (GNL).

## 1.2 Industrie du GNL : Caractéristiques techniques de La chaîne de GNL

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est obtenu à partir de gaz naturel extrait sur le site de production. Une fois extrait, le gaz naturel est rendu liquide aux usines de liquéfaction par refroidissement à moins de 160°C. Pour une même quantité d'énergie, le volume du GNL est environ 600 fois inférieur à celui du GN à l'état gazeux.

La contraction de volume résultant de la liquéfaction du gaz naturel permet de transporter une grande quantité d'énergie, par méthaniers, jusqu'aux terminaux méthaniers des clients. Sur ces terminaux, le GNL est regazéifié et injecté dans le réseau de transport de gaz naturel. Le terminal méthanier comporte, d'une part, des installations de déchargement et de stockage, et d'autre part des installations de regazéification de GNL, par réchauffage à l'eau de mer ou à l'eau chaude produite à partir d'une unité de cogénération alimentée par le GNL évaporé.

On entend par chaîne GNL l'ensemble des installations techniques mises en jeu pour le transport du gaz naturel sous forme liquide, une chaîne de GNL comprend les principales installations suivantes : Liquéfaction du gaz, stockage et chargement, transport par méthaniers, réception, déchargement et stockage, regazéification [Houmeur, 08] (Voir Figure 1.1).

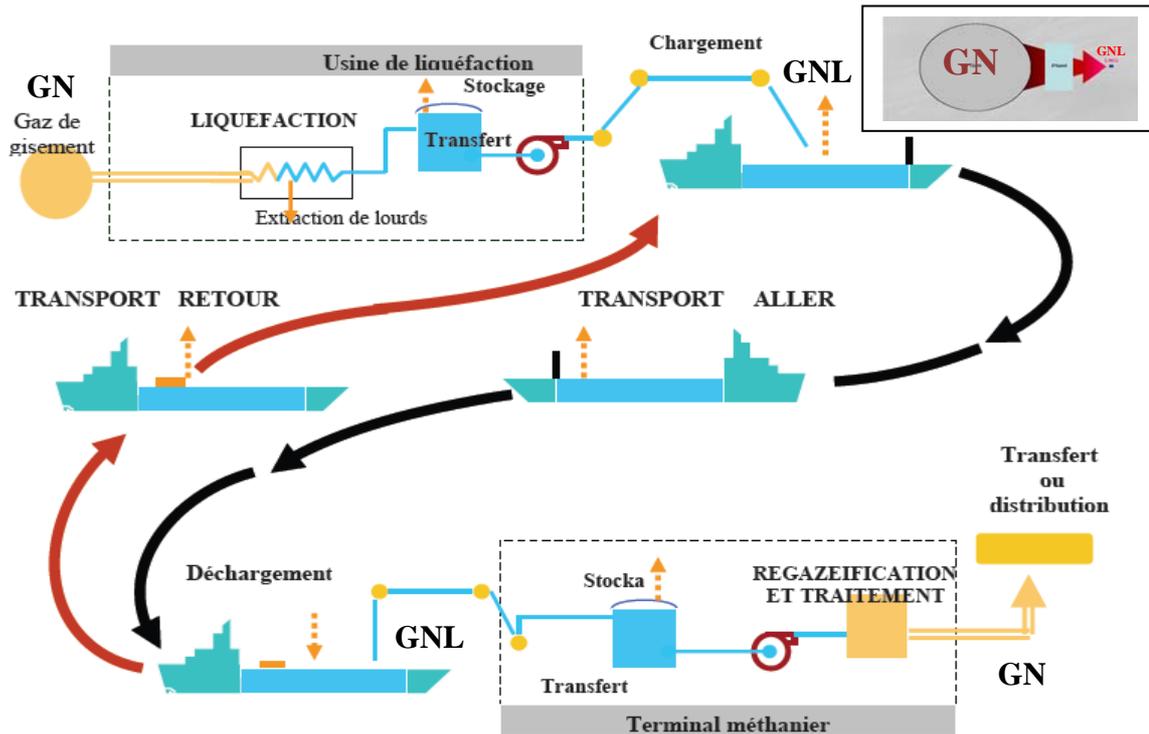


Figure 1.1 La chaîne de GNL [Houmeur, 08].

### 1.3 Rétrospective et Situation du GNL au monde

#### 1.3.1 Les échanges internationaux de GNL

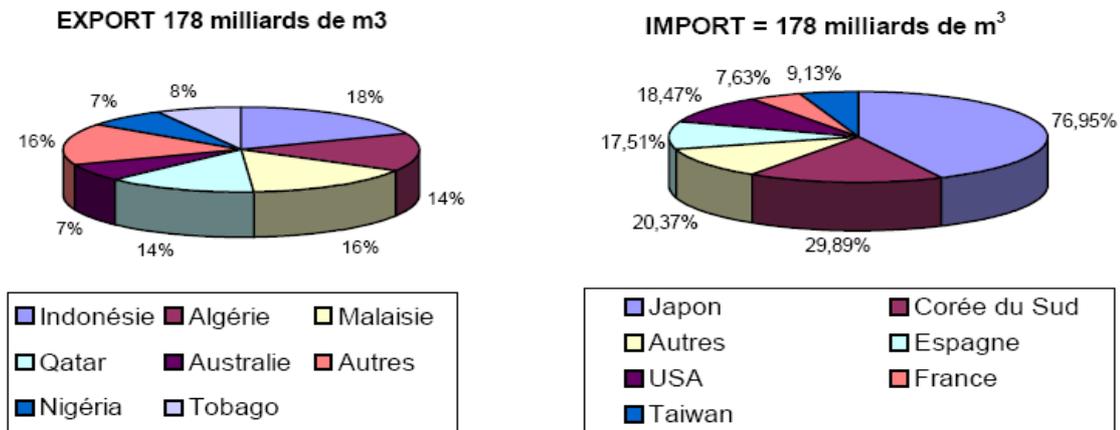
79% des échanges internationaux du commerce gazier sont réalisés par gazoducs entre pays ou continents proches. D'abord articulés autour des marchés américains et européens, des gazoducs internationaux ont progressivement été mis en place. Des terminaux de réception de GNL ont ensuite peu à peu complété l'infrastructure d'importation et permis une meilleure desserte de ces régions.

Des progrès technologiques pour les gazoducs offrent des perspectives de développement intéressantes. Mais il semble que l'alternative maritime du GNL devrait progresser plus rapidement. Le transport par méthaniers va certainement être le grand gagnant de l'essor du GNL, parce que la souplesse de ce transport maritime permet d'ajuster l'offre à la demande du marché [Chabrelié, 06].

De cette situation, ont résulté trois marchés régionaux

- Le marché Nord américain, basé sur des gazoducs, avec une exportation croissante du Canada vers les Etats-Unis et des échanges mineurs avec le Mexique.
- Le marché asiatique, basé sur le transport de gaz liquéfié. Les producteurs sont l'Indonésie, l'Australie, la Malaisie et des pays du Moyen Orient. Les consommateurs sont le Japon, Taïwan et la Corée.

- Le marché européen autour d'un réseau de gazoducs et une liaison par méthanier avec l'Algérie.



**Figure 1.2** Les plus grands pays Exportateurs / Importateurs de GNL en 2004 [Cedigaz, 04]

La figure 1.3 illustre les échanges internationaux de GNL, en particulier l’allongement des routes maritimes et l’effacement progressif des deux bassins historiques au profit d’un commerce mondial [Comtois, 06].

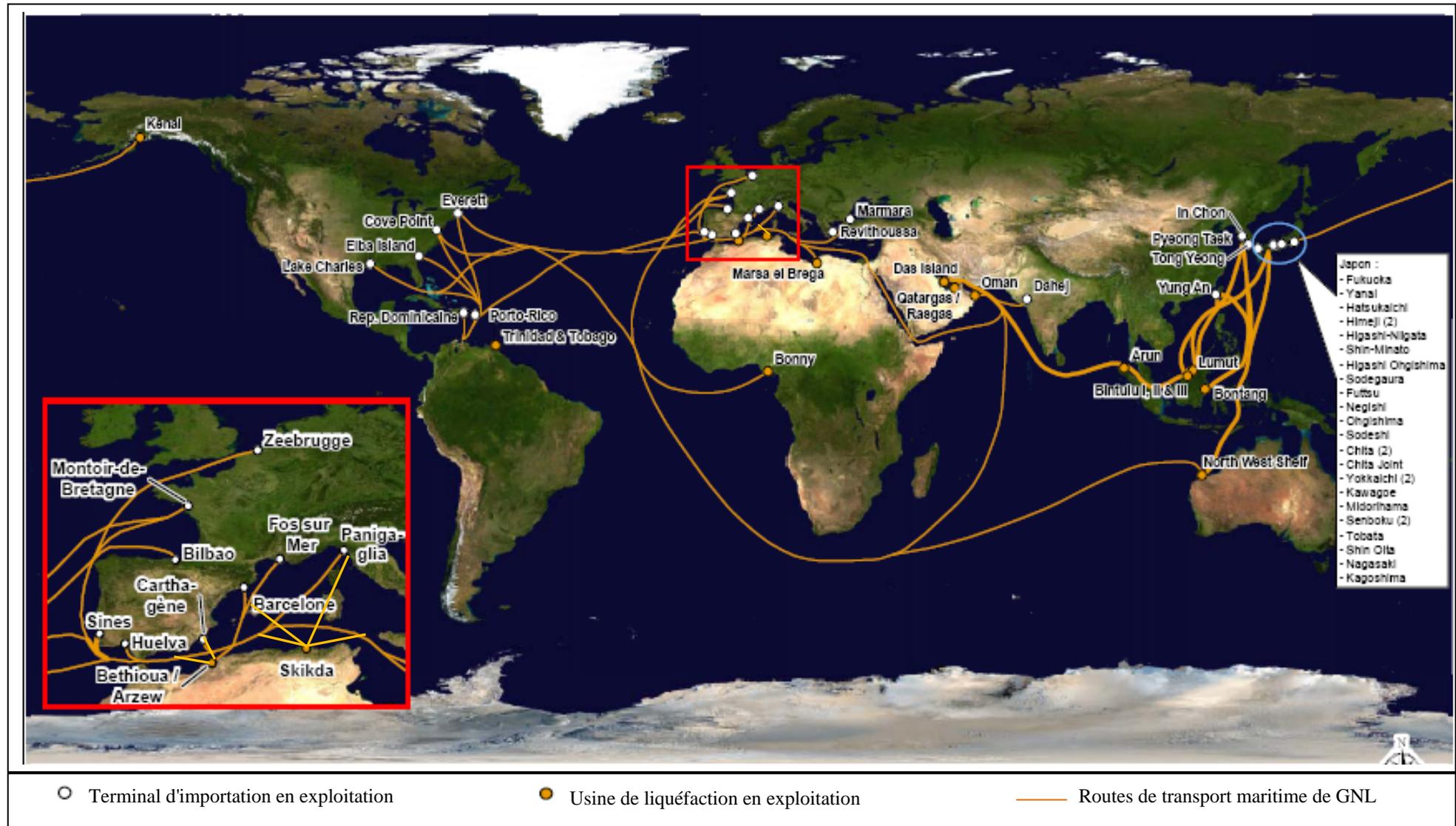


Figure 1.3 Les principales routes maritimes de transport de GNL au monde [Comtois, 06]

### 1.3.2 Évolution de la demande mondiale de GNL

Le rôle du GNL dans les échanges mondiaux sera important et sa part devrait croître plus rapidement que celle des flux par gazoducs. On envisage un taux de progression des échanges par méthaniers de l'ordre de 7 %/an d'ici à 2020, ce qui porterait la part du GNL dans le commerce mondial à environ 38 %, contre 31 % actuellement [Chabrelie, 06].

La figure 1.4 ci-dessous démontre l'évolution et les prévisions de la demande mondiale de gaz [Comtois, 06].

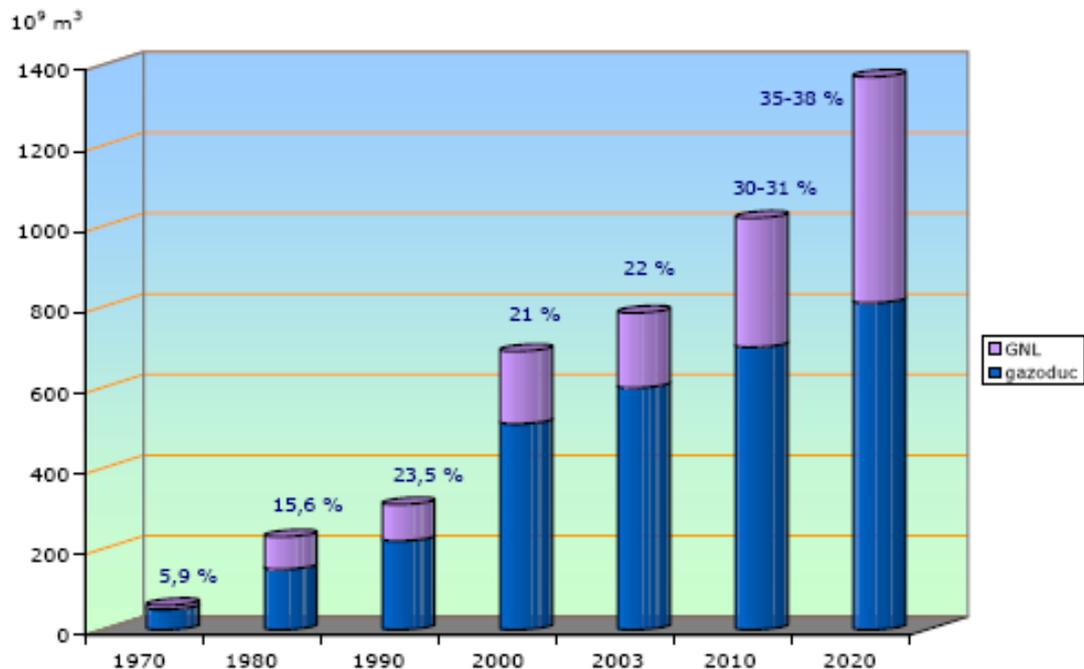


Figure 1.4 Évolution et prévision de la demande mondiale de gaz [Comtois, 06]

## 1.4 L'industrie de GNL en l'Algérie

Les premières expériences de liquéfaction du gaz naturel datent de 1934 en URSS et de 1940 aux États-Unis. Toutefois, ce n'est qu'en 1961 que fut entreprise la réalisation de l'usine Camel (Arzew, Algérie), premier projet de transport de GNL au monde destiné à exporter le gaz du gisement d'Hassi R'Mel en Algérie. Depuis le démarrage de cette usine, ses premières livraisons commerciales au terminal britannique de Canvey Island en 1964, l'industrie du GNL a connu un bel essor.

### 1.4.1 Les potentiels

L'Algérie est un grand producteur de GNL et est en voie de doubler sa production nationale par rapport au niveau actuel, pour atteindre 85 Gm<sup>3</sup> de GN par an dans les prochaines Années. Son champ, Hassi R'mel, est l'un des plus grands gisements de gaz au

monde, avec une capacité de traitement du gaz de  $286 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{J}$  et 200 puits en exploitation. Les importantes réserves recelées par ce gisement sont supérieures à  $200 \text{ Gm}^3$  et constituent un atout important pour lancer une politique d'industrie gazière de grande envergure pour le pays.

#### 1.4.1.1 Les usines de liquéfaction GN

L'Algérie dispose actuellement quatre (4) unités de liquéfaction dont trois se situent dans le pôle industriel d'Arzew (deux à Bethioua et une à Arzew) et une Unité à Skikda. La capacité totale  $30,5 \text{ Gm}^3$ , dont  $28 \text{ Gm}^3$  de GNL sont dédiés à des contrats de long terme (contrat d'exportation GNL). SONATRACH prévoit à terme de lancer deux nouveaux trains de liquéfaction :

- Un à Skikda (Méga Train), d'une capacité de 4 millions de tonnes/an, suite à l'incident survenu début 2004 ;
- Un deuxième train d'une capacité annuelle de 4 millions de tonnes/an à Arzew, dans le cadre du Projet Intégré de Gassi Touil.

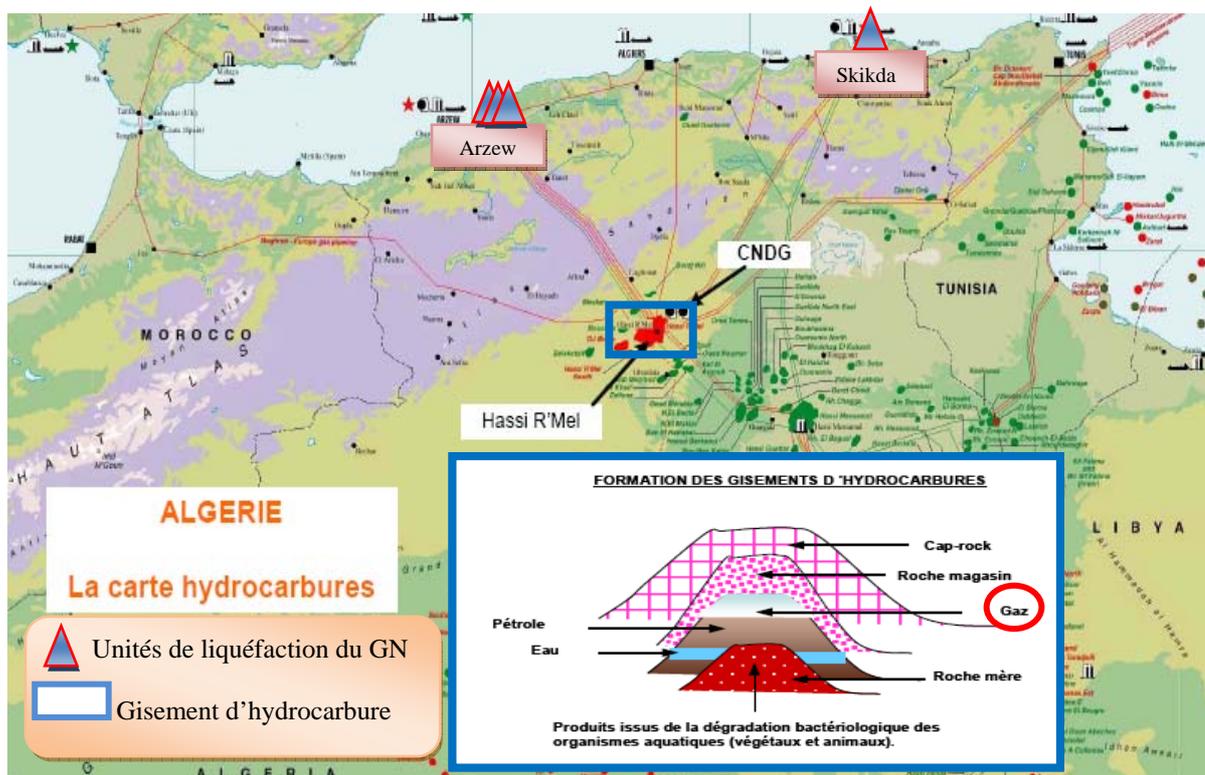


Figure 1.5 Localisation des unités de liquéfaction de GN en Algérie

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques des usines de liquéfaction en Algérie.

Unités	GL4Z	GL1Z	GL2Z	GL1K
<b>Localisation</b>	Arzew	Bethioua	Bethioua	Skikda
<b>Superficie</b>	73 hectares	72 hectares	72 hectares	92 hectares
<b>Objet</b>	Traitement de 17 G m <sup>3</sup> de GN/an	Traitement de 10.5 Gm <sup>3</sup> de GN/an	Traitement de 10.5 Gm <sup>3</sup> de GN/an	Traitement de 7.8 G m <sup>3</sup> de GN/an
<b>Produits</b>	GNL, butane	GNL, gazoline	GNL, butane, propane, gazoline	GNL, éthane, butane, propane, gazoline
<b>Procédés utilisés</b>	Cascade classique	Air products	Air products	- TEAL pour l'unité 10 - PRICO pour 5 et 6
<b>Capacité de production</b>	2 millions m <sup>3</sup> GNL 1850 t/an butane	17 millions m <sup>3</sup> de GNL	17.8 millions m <sup>3</sup> de GNL	- 6.94 millions m <sup>3</sup> /an de GNL - Ethane 170000 T/an. - Propane 108400 T/an. - Butane 92600 t/an - Gazoline 60250 t/an
<b>Nb de train</b>	3	6	6	3
<b>Capacité de stockage</b>	-3 bacs GNL aérien de 11000 m <sup>3</sup> - un bac GNL en excavation de 38000 m <sup>3</sup>	-3 bacs GNL aérien de 300000 m <sup>3</sup>	-3 bacs GNL aérien de 300000 m <sup>3</sup> -2 bacs de gazoline 28500 m <sup>3</sup>	-3 bacs de GNL de 308000 m <sup>3</sup> -2 bacs de propane de 25000t - un bac de butane de 20000 t - un bac de gazoline de 3300 t
<b>Source d'approvisionnements</b>	Hassi R'Mel	Hassi R'Mel	Hassi R'Mel	Hassi R'Mel
<b>Date de mise en service</b>	1 <sup>er</sup> ligne 64 2 <sup>ème</sup> ligne 64 3 <sup>ème</sup> ligne 65	20 février 1978	29 janvier 1981	-Les unités (10, 20 et 30) en1972 -L'unité 40 en 1981 -Les unités 5P et 6P en 1981

**Tableau 1.1** Fiche technique des unités de liquéfaction en Algérie [SONATRACH]

#### 1.4.1.2 les capacités d'exportation

Les exportations de GNL commencent dès 1964, à Arzew, à partir de la première usine de liquéfaction de gaz naturel au monde. SONATRACH compte, dès lors, l'Angleterre et la France comme premiers clients pour des volumes de 1,5 milliard de m<sup>3</sup>.

L'Europe reste le principal marché pour le gaz naturel algérien avec plus de 94,5% des exportations algériennes en 2005, suivie par les Etats-Unis (4,4%) et la Tunisie (1%).

Le GNL algérien est aujourd'hui livré, sous forme contractuelle, à l'Italie, la France, la Belgique, l'Espagne, la Turquie, la Grèce et Etats-Unis. Le tableau ci-dessous présente les contrats d'exportation de GNL [SONATRACH].

Clients	Date de Signature	Volume (Gm <sup>3</sup> / an)
Gaz de France (France)		10.21
Contrat 1	1964	
Contrat 2	1971	
Contrat 3	1976	
Contrat 4	1976	
Distrigaz (Belgique)	1975	4.50
Gaz Naturel (Espagne)	1975	3.80
Botsa (Turquie)	1988	4.00
Depa (Grèce)	1999	0.70
Distrigas LLC (USA)	1988	1.28
Eni / gp (Italie)	1997	1.80
Endesa (Espagne)	2001	1
Cepsa (Espagne)	2002	0.60
Iberdrola (Espagne)	2002	1.00

**Tableau 1.2** Contrat d'exportation de GNL [SONATRACH]

SONATRACH signe alors, une série de contrats de fourniture de GNL avec différents clients en Europe et aux Etats-Unis. Une nouvelle impulsion est ainsi donnée aux exportations de GNL.



**Figure 1.6** Les routes d'exportation GN-GNL à partir l'Algérie

## **1.4.2 Les risques industriels**

### **1.4.2.1 Accidents survenus sur les installations de GNL**

Les dangers potentiels du GNL sont attribuables à ses propriétés de base, notamment sa nature cryogénique et ses caractéristiques de dispersion et d'inflammabilité : en raison de sa nature cryogénique, le GNL gèle tout ce qui entre en contact avec lui. Lorsqu'il est liquéfié, le gaz naturel ne brûle pas et ne peut exploser. Ce n'est que lorsque le GNL se réchauffe et retrouve son état gazeux, se mélange à l'air et entre en contact avec une source d'inflammation qu'il peut exploser ou s'enflammer (en milieu confiné). Mais pour cela, il faut d'abord qu'une fuite se produise [Desmercieres, 09]. les incidents les plus fréquents dans les installation de GNL sont:

- la fuite de gaz (plus de 60% des accidents),
- le feu d'huile (16% des accidents).

Les causes les plus fréquentes de fuite sont les pertes d'étanchéité de raccord, type soudure ou joint d'équipement, type soupape ou vanne, ainsi que l'usure des tuyauteries.

Les sources d'inflammation relevées pouvant entraîner le feu d'une nappe d'huile sont dues à des travaux de soudure à proximité ou à l'échauffement sur un équipement.

Les recherches effectuées dans la base ARIA ont porté sur les installations de liquéfaction, de stockage, de chargement et de déchargement de GNL en Algérie . Les résultats obtenus sont reproduits dans le tableau qui suit [ARIA, 92].

Description de l'accident	Analyse de l'accident
<p align="center"><b>1977 – ALGERIE – Arzew (usine de liquéfaction)</b></p> <p>La défaillance d'une vanne en aluminium en contact avec du GNL est à l'origine d'un rejet de liquide pendant environ 10 heures. La nappe de GNL s'est répandue et déplacée vers la mer. Plusieurs Transitions Rapides de Phase ont alors été observées lorsque le liquide cryogénique est entré en contact avec l'eau de mer. Les ondes de surpression et des projectiles ont endommagé les vitres de bâtiments situés à proximité.</p>	<p><b>Phénomène physique :</b> Rejet de GNL</p> <p><b>Evénement initiateur :</b> Equipement non conçu avec des matériaux cryogéniques</p>
<p align="center"><b>1979 –ALGERIE– Navire Mostefa Ben Boulaid (déchargement de GNL)</b></p> <p>Au cours du déchargement de la cargaison, la défaillance d'un clapet anti-retour du réseau de canalisations du navire a entraîné la libération d'une petite quantité de GNL. Il en est résulté des fractures peu importantes au niveau du bordé du pont.</p>	<p><b>Phénomène physique :</b> Rejet de GNL</p> <p><b>Evénement initiateur :</b> Défaillance d'un clapet antiretour</p>
<p align="center"><b>1989 – ALGERIE – Port de Skikda</b></p> <p>Un méthanier rompt ses amarres lors d'une tempête. Des installations portuaires et celle du navire sont endommagées.</p>	<p><b>Phénomène physique :</b> Endommagement du quai de déchargement</p> <p><b>Evénement initiateur :</b> Rupture des amarres</p>
<p align="center"><b>Le 19/01/2004 – ALGERIE – Skikda (usine de liquéfaction)</b></p> <p>Une explosion se produit en fin d'après-midi dans un complexe pétrochimique portuaire. L'accident se serait produit dans l'unité traitant du gaz naturel (GNL), à la suite de l'explosion d'une chaudière à haute pression fabriquant de la vapeur.</p>	<p><b>Phénomène physique :</b> Explosion d'une chaudière à haute pression</p> <p><b>Evénement initiateur :</b> fuite de gaz</p>

**Tableau 1.3** Accidents survenus sur les installations de GNL en Algérie [ARIA, 92].

### 1.4.2.2 L'explosion du complexe de GNL (GL1K) de Skikda.

#### a- Causes et conséquences

Dans la nuit du 19 au 20 janvier 2004 à 18 h 34, une fuite de Gaz provenant d'un train de liquéfaction GNL a causé une explosion de la chaudière de l'unité 40 du complexe GL1K entraînant la destruction de trois (03) trains de liquéfaction (20, 30, 40) sur 6 ( 50 % ) . Ces infrastructures, réalisées par l'entreprise britannique Pritchard, datent de 1978 et sont entrées en production en 1981. L'explosion du complexe de GNL de Skikda) aurait pu être plus meurtrière si elle avait eu lieu dans la journée.



Complexe GL1K (unités 20,30 et 40) avant l'accident



Complexe GL1K (unités 20,30 et 40) après l'accident

**Figure 1.7** L'explosion du complexe de GNL (GL1K) de Skikda.

L'accident a provoqué 27 morts et 74 blessés. Les dégâts matériels sont considérables, d'après les premières estimations, la destruction des trois unités de GNL constituent une perte de 500 millions de dollars (pour la rénovation), et entre 300 et 400 million de dollars de déficits de la recette totale du complexe, ainsi 200 véhicules endommagés. Au niveau de la centrale thermique des dommages de 40 milliards de centimes, au niveau des dommages sur l'habitation, il est difficile de faire un bilan, mais d'après des témoignages les dégâts sont recensés sur un rayon de 4 kilomètres [Hadeff, Soukehal, 04].

<b>conséquences de l'explosion</b>	
<b>Economique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perte de 3 trains de liquéfaction (500 millions de dollars).</li> <li>-Déficits de la recette totale du complexe (400 millions de dollars).</li> <li>-Détérioration des infrastructures de base.</li> <li>-Réadaptation du plan d'investissement et de développement</li> <li>-Indemnisation des victimes.</li> <li>-Perte de 80% de la documentation des données informatisées.</li> </ul>
<b>Social</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perte de 27 travailleurs.</li> <li>-Affectation directe de 112 blessés dont 70 hospitalisés.</li> <li>-Suivi social et psychologique des agents affectés.</li> <li>-Angoisse et stress affectant le milieu industriel du pôle.</li> <li>-Inquiétude et angoisse des riverains et des familles des travailleurs en milieu industriel.</li> <li>-Réadaptation du collectif du complexe GL1K.</li> </ul>
<b>Organisationnel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Déstructuration du système.</li> <li>-Révision et actualisation des plans d'urgence.</li> <li>-Ajustement organisationnel.</li> <li>-Mise à jour des études de danger et études d'impact.</li> <li>-Elaboration des nouvelles instructions R1/R2 tenant compte du retour d'expérience de l'incident.</li> <li>-Planification du module formation (Risque majeur).</li> <li>-Promulgation de la nouvelle loi du 25/12/2004 sur les risques majeurs naturels et technologiques dans le cadre du développement durable.</li> </ul>

**Tableau 1.4** Les conséquences de l'explosion du GNL de Skikda.

***b- Retour d'expérience***

Lors d'un discours prononcé le 19 janvier 2005 à l'occasion de la journée d'étude sur la prévention des risques majeurs, un an après la catastrophe de Skikda, le ministre de l'énergie et des mines algérien Chakib Khelil a énuméré les différents engagements pris afin de limiter les dégâts et les victimes si un tel désastre venait à se reproduire. Vu que toute installation industrielle, et particulièrement dans le secteur pétrolier, comporte toujours des risques d'exploitation.

L'industrie pétrolière et gazière est une activité à hauts risques, et par conséquent la sécurité d'exploitation doit être un enjeu important et prioritaire. Un suivi rigoureux des procédures de gestion et un respect stricte des mesures de sécurité sont nécessaires afin d'assurer la fiabilité des installations et la protection des ressources humaines.

Le Parlement algérien vient d'adopter une loi relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. Cette loi vise à prévenir et prendre en charge les effets des risques majeurs sur les établissements humains, leurs activités et leur environnement afin d'améliorer la connaissance des risques et le renforcement de leur surveillance et de leur prévention. Ceci passe également par le déploiement de l'information préventive sur ces risques et la prise en charge efficace de toute catastrophe. Tout cela devra évidemment avoir un coût économiquement acceptable.

Les mesures édictées par cette loi seront mise en œuvre au moyen d'un plan général de prévention des risques industriels et énergétiques qui définit un système intégré de veille et d'alerte ainsi que des programmes de simulation nationaux. Des sanctions seront prévues à l'encontre de ceux qui seraient responsables d'un accident. Concrètement, sur le terrain, l'application de cette loi se traduira par un renforcement de la concertation et de la coordination entre secteurs en terme de prévention et de lutte contre les risques industriels majeurs.

En matière de formation, un groupement a été créé avec des actionnaires. Ce groupement va accélérer la formation du personnel du secteur de l'énergie et des mines en partenariat avec des instituts étrangers et développer notamment des filières de sécurité industrielle. Des conférences annuelles sur la formation sont déjà organisées au sein de ces instituts. Pour la première fois, un module spécifique dédié à l'enseignement de la sécurité industrielle a été introduit dans leurs programmes.

## **1.5 Conclusion**

L'industrie de GNL constitue un des piliers incontestables de l'économie mondiale, elle doit faire face depuis quelques années à une image peu flatteuse d'industrie dangereuse et polluante. Les accidents comme ceux survenus aux usines de liquéfaction ont démontré à quel point les incidents causés par ce type d'industrie pouvaient être impressionnants et destructeurs.

En Algérie, c'est l'accident de l'usine GL1K de Skikda du 19 janvier 2004 et ses conséquences dramatiques qui ont relancé le débat sur la sécurité industrielle et sur les priorités à définir, tant au niveau de l'Etat et des industriels que du grand public. Cet accident reste, de par son ampleur, l'accident industriel le plus important de l'industrie Algérienne. Il a mis en exergue des carences au niveau de la mise en sécurité des installations et de la protection des personnes sur le complexe. Il a fait prendre conscience à l'ensemble des parties intéressées (administration, chercheurs et industriels) la problématique des risques industriels majeurs.

## **CHAPITRE II.**

### **ANALYSE ET ÉVALUATION DES RISQUES INDUSTRIELS**

## 2.1 Introduction

Le risque industriel résulte de l'exploitation des installations industrielles dangereuses et qui est plus particulièrement relatif à la possibilité d'occurrence d'un accident majeur. Gérer un risque est un processus itératif qui a pour objectif d'identifier, d'analyser, d'évaluer et de le réduire au maximum ou de le maintenir dans des limites acceptables. La gestion des risques est une des composantes fondamentales de la gestion d'un système. Elle est essentielle à la réussite des entreprises, que ce soit en terme économique ou environnemental.

L'analyse des risques est une étape clé du processus de gestion des risques. Sa réalisation nécessite de mettre en œuvre une démarche structurée systématique. C'est ce à quoi sont destinées les méthodes que nous présentons dans ce chapitre. Celles-ci sont applicables à une variété de risques d'origine technique, en particulier aux risques industriels majeurs.

## 2.2 Risque : définitions et concepts de base

Le mot « risque » est relativement moderne. Il provient du mot français « risqué ». Ce n'est qu'au milieu du 17<sup>ème</sup> siècle que les Anglo-Saxons ont adopté le terme « Risk », avant qu'il ne soit fort présent dans le jargon des Assurances [Flanagan & Norman, 93].

### 2.2.1 Définitions du risque

1. Le risque est la combinaison de deux éléments :

- La probabilité d'occurrence d'un événement ou d'une combinaison d'événements conduisant à une situation dangereuse, ou la fréquence de tels événements.
- Les conséquences de cette situation dangereuse [AFNOR, 00].

2. Combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences [ISO, 02].

3. Le risque est considéré comme la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux. C'est une espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée [GT Méthodologie, 03].

### 2.2.2 Danger

La notion de danger définit une propriété intrinsèque à une substance (ex : butane, chlore), à un système technique (ex : mise sous pression d'un gaz), à une disposition (ex : élévation charge), à un organisme (ex : microbes), etc., de nature à entraîner un dommage sur un «élément vulnérable» [GT Méthodologie, 03].

### 2.2.3 Dommage

Effets néfastes d'un événement pour les personnes, la société, ou l'environnement [GT Aspects sémantiques du risque, 97].

---

### 2.2.4 Accident majeur

Événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement couvert par la présente directive, entraînant pour la santé humaine, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et/ou pour l'environnement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses [Nichan, 06].

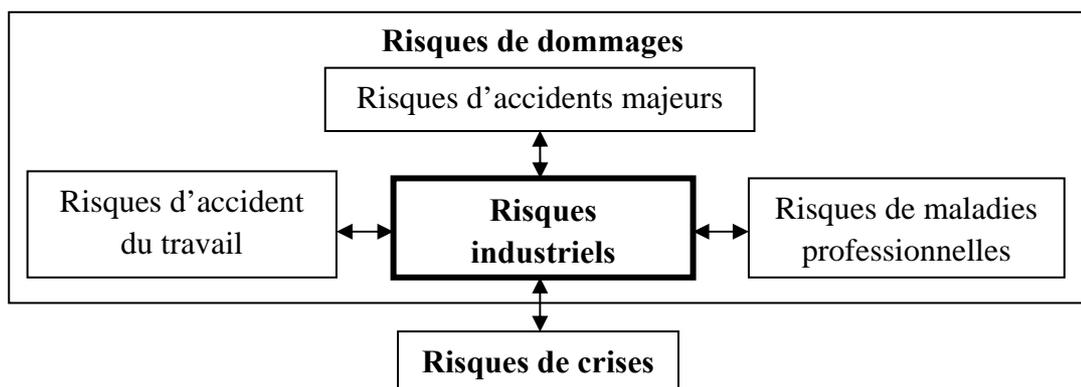
## 2.3 Les risques industriels

### 2.3.1 Définition

Les risques industriels peuvent être définis comme des situations dangereuses rencontrées dans les activités dites industrielles, dans les usines de production et leurs annexes comme les locaux de stockage des matières premières et des produits finies, les laboratoires de recherche, de mise au point et de contrôle [Nichan, 06].

### 2.3.2 Typologie des risques industriels

Wybo [Wybo, 04] propose une distinction entre deux types de risques : les risques de dommages et les risques de crises qu'il distingue de la manière suivante : les risques de dommages correspondent à des situations qui ont été étudiées et pour lesquelles des mesures de prévention et de protection ont été prises par l'organisation. Les risques de crises, au contraire, correspondent à des situations pour lesquelles il y a eu peu d'anticipation et il n'existe aucune expérience antérieure. La figure suivante (figure 2.1) illustre ces deux typologies de risques industriels.



**Figure 2.1** Typologie des risques industriels [Wybo, 04]

Dans le cadre de notre travail, nous n'intéresserons qu'aux risques que nous appellerons risques HSE (risques de dommages).

- Les risques "Hygiène industrielle", ayant comme conséquences les maladies professionnelles ;
- Les risques "Sécurité", ayant comme conséquences les atteintes aux personnes ou aux biens ;
- Les risques "Environnement", ayant pour conséquences les accidents majeurs provoquant les atteintes à l'environnement au sens large (riverains, milieux naturels, installations industrielles voisines, zones résidentielles, etc.).

Ces risques HSE correspondent ainsi aux risques de dommage décrits par Wybo.

## 2.4 Gestion des risques

### 2.4.1 Définition

Activités coordonnées visant à diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque. La gestion du risque inclut typiquement l'appréciation du risque, le traitement du risque, l'acceptation du risque et la communication relative au risque [ISO, 02].

### 2.4.2 Processus de gestion des risques

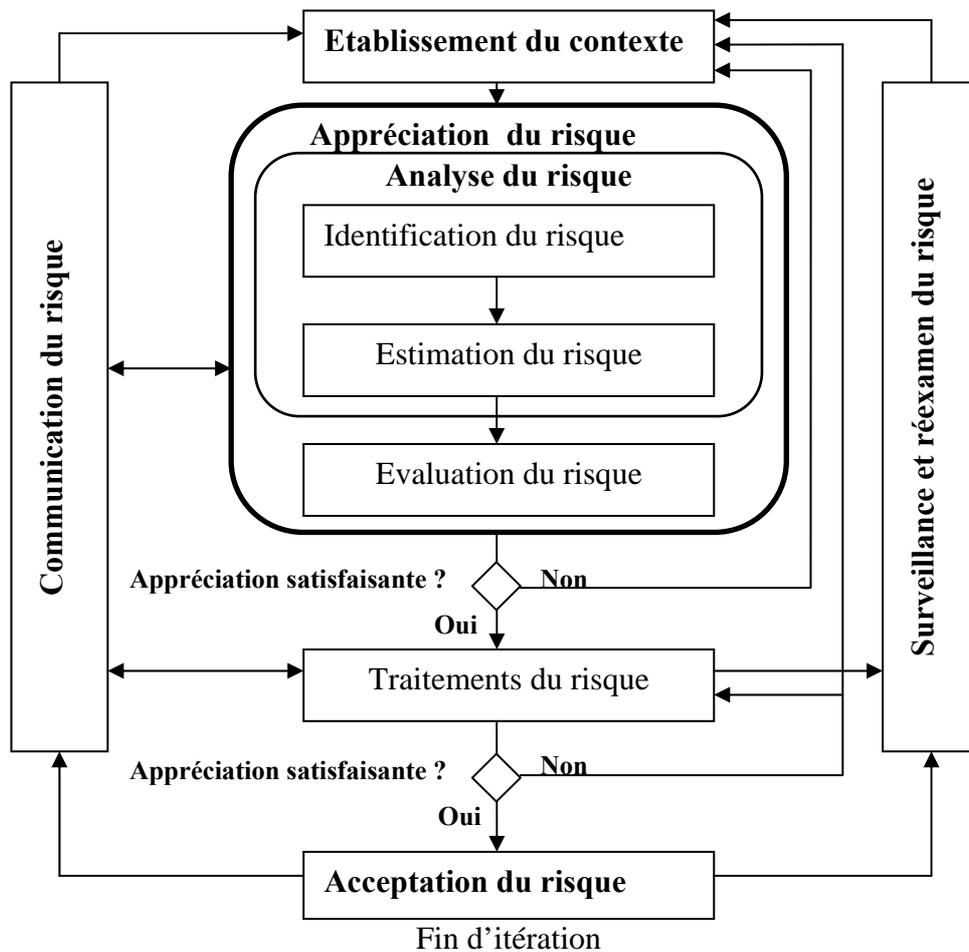


Figure 2.2 Processus de gestion des risques [ISO, 08]

### **2.4.2.1 Analyse du risque**

Utilisation systématique d'informations pour identifier les facteurs de risque et pour estimer le risque. [ISO, 02].

#### ***a- Identification des facteurs de risque***

Un facteur de risque est un paramètre que l'on observe et dont on pense qu'il joue un rôle dans la séquence accidentelle sans qu'il puisse être prouvé qu'il en est une cause directe ou indirecte [ISO, 02].

Selon le Guide ISO/CEI 73 [ISO, 02], L'identification des facteurs de risque est un processus permettant de trouver, lister et caractériser les éléments du risque. Les éléments peuvent inclure les sources, les événements, les conséquences et la probabilité. L'identification des risques peut également concerner les préoccupations des parties prenantes.

#### ***b- Estimation des risques***

L'estimation d'un risque se définit comme un processus utilisé pour affecter des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque. L'estimation du risque peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque [ISO, 02].

### **2.4.2.2 Evaluation de l'acceptabilité des risques**

Processus de comparaison du risque estimé avec des critères de risque donnés pour déterminer l'importance du risque. La comparaison peut être menée par rapport à un référentiel préétabli dans l'objectif de permettre la prise de décision vis-à-vis de l'acceptation du risque ou de la nécessité de son traitement [ISO, 02].

### **2.4.2.3 Traitements du risque**

Il convient de choisir des mesures de sécurité pour réduire, maintenir, éviter ou transférer les risques, et de définir un plan de traitement du risque [ISO/CEI 27001].

### **2.4.2.4 Acceptation du risque**

Il convient de prendre la décision d'accepter les risques et les responsabilités de cette décision et de l'enregistrer formellement [ISO/CEI 27001].

### **2.4.2.5 Communication du risque**

Il convient d'échanger et/ou de partager les informations relatives au risque entre le décideur et les autres parties prenantes [ISO/CEI 27001].

### **2.4.2.6 Surveillance et réexamen du risque**

Il convient de surveiller et de réexaminer les risques et leurs facteurs (à savoir valeur des actifs, impacts, menaces, vulnérabilités et vraisemblance) pour identifier au plus tôt toutes

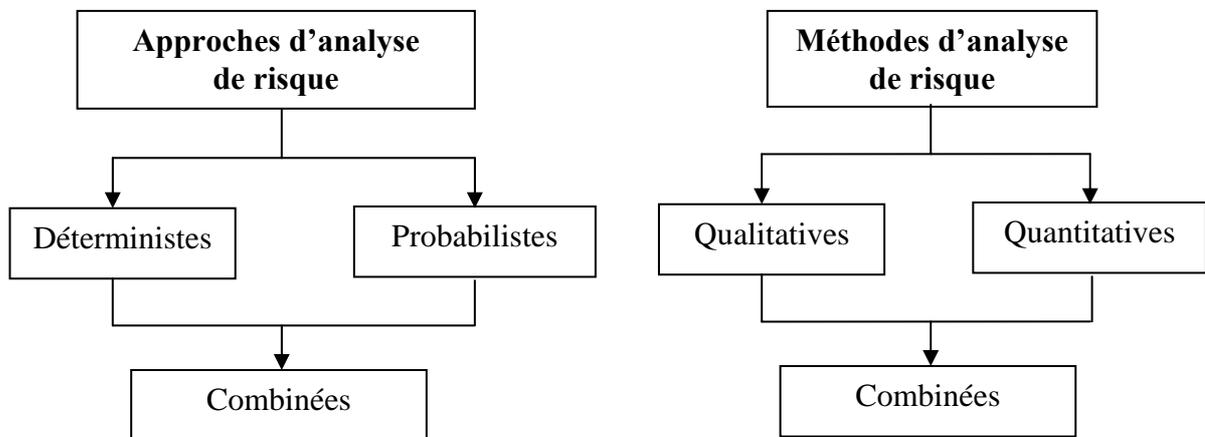
les modifications dans le contexte de l'organisme et pour maintenir une cartographie complète des risques [ISO/CEI 27001].

## 2.5 Méthodes d'analyse des risques

Afin de prévenir les risques associés à un procédé, un certain nombre de méthodologies ont été développées pour procéder à une analyse systématique des risques et de leurs conséquences [Brown, 99].

Ces méthodologies servent à mettre en évidence toutes les sources de dangers, à identifier les risques posés par les éléments du système et leurs interactions, à anticiper des dérives et mettre en place des mesures de sécurité (ou barrières dans le cas d'accidents majeurs), pour d'une part éviter que ces déviations apparaissent et d'autre part en limiter les conséquences dans les cas où cette déviation ne pourrait être corrigée. L'application de méthodes d'analyse de risques permet donc de regrouper un certain nombre de données dans le but de maintenir à tout instant l'installation en sécurité que ce soit en fonctionnement normal ou en marche dégradée [Benaissa, 06].

### 1.5.1 Classification des méthodes d'analyse de risque



**Figure 2.3** Typologies et Approches des méthodes d'analyse de risque [Mazouni, 08]

#### 2.5.1.1 Méthodes quantitatives et qualitatives

##### a- Méthodes quantitatives

Les analyses quantitatives sont supportées par des outils mathématiques ayant pour but d'évaluer la sûreté de fonctionnement et entre autres la sécurité. Cette évaluation peut se faire par des calculs de probabilités (par exemple lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté) tels que les Arbres de défaillances ou bien par recours

aux modèles différentiels probabilistes tels que les Chaines de Markov, les Réseaux de Pétri, les automates d'états finis, etc.

### ***b- Méthodes qualitatives***

L'APR, HAZOP restent des méthodes qualitatives même si certaines mènent parfois aux estimations de fréquences d'occurrence avant la classification des risques.

La plupart des méthodes revêtent un caractère inductif dans une optique de recherche allant des causes aux conséquences éventuelles. En contrepartie, il existe quelques méthodes déductives qui ont pour but de chercher les combinaisons de causes conduisant à des événements redoutés [Mazouni, 08]

## **2.5.1.2 Approche déterministe et Approche probabiliste**

### ***a- Approche déterministe***

L'approche déterministe a généralement été adoptée dans les domaines à haut risque tels que nucléaire, militaire, transports guidés, où le moindre risque significatifs est traqué et réduit à la source. Elle consiste à recenser les événements pouvant conduire à un scénario d'accident en recherchant le pire cas possible et en affectant une gravité extrême à ses conséquences potentielles. Par conséquent, les sous systèmes critiques (systèmes de sauvegarde, de protection et de prévention) sont dimensionnés pour éviter toute défaillance dangereuse et organisés rigoureusement selon une stratégie de défense en profondeur.

### ***b- Approche probabiliste***

L'approche probabiliste fait intervenir le calcul de probabilités relatives à l'occurrence d'événements faisant partie du processus de matérialisation d'un scénario d'accident donné.

Il s'agit d'une approche complémentaire qui permet d'analyser le dispositif de défense en profondeur décidé à l'issue d'une approche purement déterministe, ceci a été le cas dans le domaine nucléaire ou les techniques probabilistes viennent appuyer l'approche déterministe [Mazouni, 08].

## **2.5.1.3 Démarche inductive et démarche déductive**

### ***a- Démarche inductive***

Le principe de ces méthodes consiste à partir d'une cause d'anomalie (défaillance, erreur humaine, agression externe, etc.) et à déterminer les scénarios d'événements qui en résultent et/ou l'ensemble de ses conséquences possibles [RE, 86].

### ***b- Démarche déductive***

Les méthodes d'analyse déductive ont pour finalité la recherche des combinaisons des causes possibles d'un événement redouté [RE, 86].

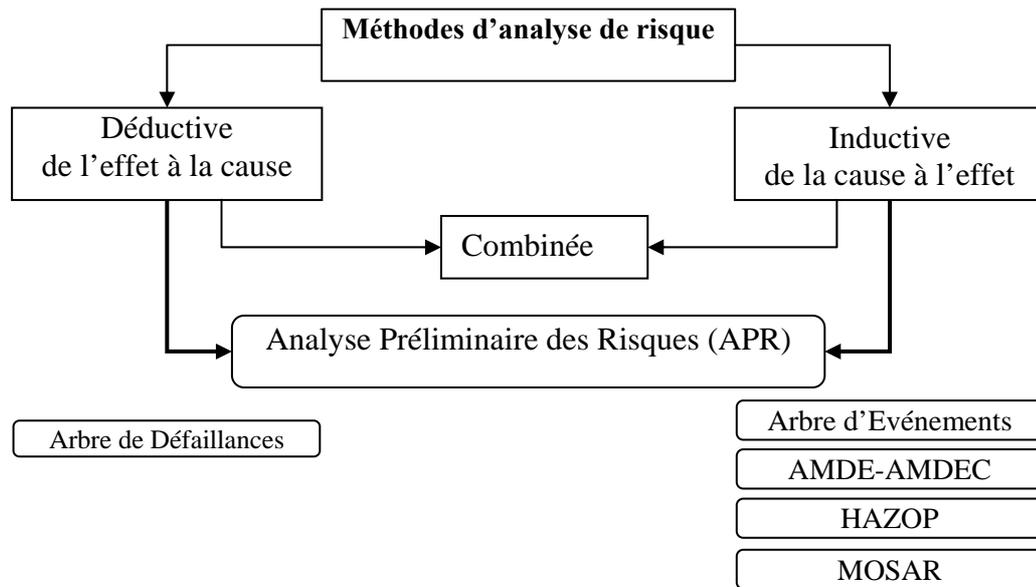


Figure 2.4 Classification des principales méthodes d’analyse de risque [Mazouni, 08]

**2.5.2 Panorama des méthodes d’analyse de risque**

Le Tableau 2.1 présente une synthèse des principales caractéristiques des méthodes d’analyse de risque : inductive/déductive, déterministe/Probabiliste, phases du cycle de vie du système, domaines d’application privilégiés.

Méthodes	Inductive/déductive	Déterministe/Probabiliste	Phases du cycle de vie du système	Domaines d’application Privilégiés
<b>Analyse Préliminaire des Risques (APR)</b>	Inductive et déductive	Déterministe et Probabiliste	Conception, exploitation, test & validation Modification	Domaines aéronautique et militaire, secteurs industriels
<b>Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)</b>	Inductive	Déterministe	Conception, exploitation, test & validation Modification	l’industrie aéronautique secteurs industriels défaillance des matériaux et des équipements
<b>Analyse des Modes de défaillance et de leurs Effets et de leur criticité (AMDEC)</b>	Inductive	Déterministe et Probabiliste	Conception, exploitation test & validation Modification	l’industrie aéronautique, secteurs industriels défaillance des matériaux et des équipements
<b>Arbre d’événements (ADE)</b>	Inductive	Probabiliste	Test & validation modification, Exploitation	Domaines du nucléaire
<b>Arbre de défaillances (ADD)</b>	déductive	Probabiliste	Conception, exploitation test & validation modification	l’industrie aéronautique, nucléaire, chimique, etc
<b>Hazard and Operability Study (HAZOP)</b>	Inductive	Déterministe	Conception test & validation modification, exploitation	Systèmes thermo hydrauliques, l’industrie chimique et pétrochimie

<b>Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques (MOSAR)</b>	Inductive	Déterministe	Test & validation, modification, Exploitation, réalisation	Les installations à hauts risques (nucléaire, chimique, etc.).
<b>Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes (MADS)</b>	Inductive	Déterministe	Test & validation, modification, exploitation	secteurs industriels
<b>Nœud Papillon</b>	Inductive et déductive	Probabiliste	Test & validation, modification, exploitation	secteurs industriels
<b>What-If</b>	Inductive	Déterministe	Conception, exploitation, test & validation, modification, réalisation.	Systèmes thermo hydrauliques, l'industrie chimique et pétrochimie

**Tableau 2.1** Panorama des méthodes d'analyse de risque

### 2.5.3 Critères de choix d'une méthode d'analyse de risque

Mazouni [Mazouni, 08] est retenu l'essentiel des critères pesant dans la mise en œuvre d'une méthode plutôt qu'une autre dans l'étude d'un système donné, ces critères sont :

- Domaine de l'étude.
- Stade de l'étude (spécification, conception, ..., démantèlement).
- Perception du risque dans ce domaine.
- Culture de la Sûreté de Fonctionnement de l'organisation.
- Caractéristiques du problème à analyser.
- Niveau envisagé de la démonstration de la sécurité.
- Savoir-faire des intervenants.
- Nature des informations disponibles (spécifications du système et de ses interfaces, contraintes, etc.).
- Retour d'expérience et base de données disponibles.
- Moyens humains, logistiques et autres.

Toutefois, l'utilisation séparée d'une seule méthode d'analyse de risque peut ne pas apporter une démonstration définitive de la réalisation des objectifs de sécurité. En effet, il est nécessaire de combiner plusieurs méthodes pour une meilleure complétude et une bonne cohérence en termes de résultats.

Les paragraphes suivants présentent les deux méthodes utilisées au cours de ces travaux : l'analyse qualitative (la méthode HAZOP) et l'analyse quantitative des risques (arbre de défaillance).

## 2.5.4 Combinaison entre l'HAZOP et l'Add

### 2.5.4.1 La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study)

La méthode HAZOP a été développée par la société « Imperial Chemical Industries (ICI) » au début des années 1970. Elle sert à évaluer les dangers potentiels résultants des dysfonctionnements d'origine humaine ou matérielle et aussi les effets engendrés sur le système. [Debray, Chaumette, Descouriere, Trommeter, 06].

L'Union des Industries Chimiques (UIC) a publié en 1980 une version française de cette méthode dans son cahier de sécurité n°2 intitulé « Etude de sécurité sur schéma de circulation des fluides ».

#### *a- Principe de la méthode*

La méthode de type HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit, le niveau ...

L'HAZOP ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. Pour chaque partie constitutive du système examiné (ligne ou maille), la génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction :

- de mot-clé comme par exemple « Pas de », « Plus de », « Moins de », « Trop de » ;
- des paramètres associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés sont la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer

La combinaison des paramètres observés avec les mots clé précédemment définis se fait de la manière suivante : *Mot-clé + Paramètre = Dérive*

Le groupe de travail doit ainsi s'attacher à déterminer les causes et les conséquences potentielles de chacune de ces dérives et à identifier les moyens existants permettant de détecter cette dérive, d'en prévenir l'occurrence ou d'en limiter les effets. Le cas échéant, le groupe de travail pourra proposer des mesures correctives à engager en vue de tendre vers plus de sécurité.

#### *b- Déroulement de la méthode*

La méthode HAZOP suit les étapes présentées sur le schéma de la figure 2.5.

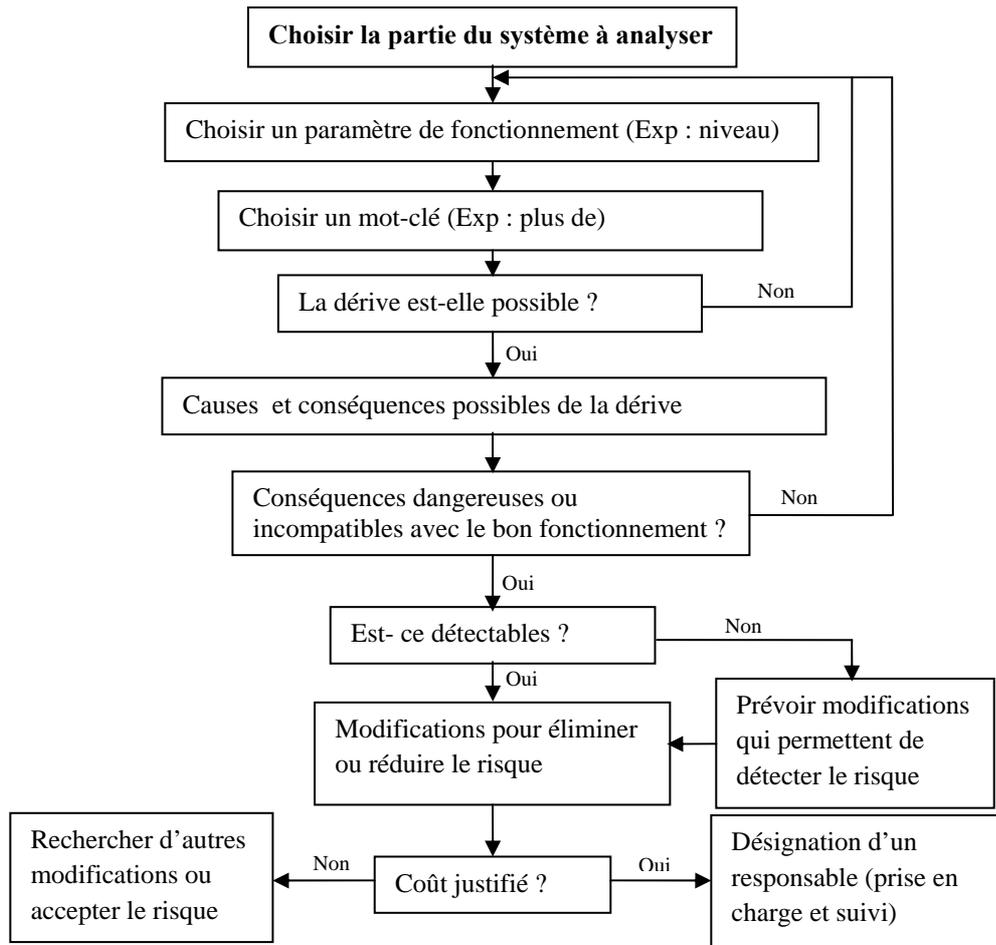


Figure 2.5 Déroulement de l' HAZOP

Dans les faits, il est intéressant de se doter de tableaux tant en qualité de support pour mener la réflexion que pour la présentation des résultats. Un exemple de tableau est fourni ci-dessous.

<b>Date :</b>								
<b>Ligne ou équipement :</b>								
N°	Paramètre	Mot clé	Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Observations

Tableau 2.2 Exemple de tableau pour l'HAZOP [Debray, Chaumette, Descouriere, Trommeter, 06].

Dans le domaine des risques accidentels majeurs, une estimation a priori de la probabilité et de la gravité des conséquences des dérives identifiées s'avère souvent nécessaire. Dans ce contexte, l'HAZOP doit donc être complétée par une analyse de la criticité

des risques sur les bases d'une technique quantitative simplifiée, parmi ces techniques l'arbre de défaillance.

#### 2.5.4.2 Arbre de Défaillances (AdD)

L'analyse par Arbre de Défaillances a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine « Bell Téléphone ». Elle fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles. Elle est employée pour identifier les causes relatives aux événements redoutés. En partant d'un événement unique, il s'agit de rechercher les combinaisons d'événements conduisant à la réalisation de ce dernier [B.Debray, S.Chaumette, S.Descouriere, V.Trommeter, 06].

##### *a- Principe de la méthode*

L'analyse par arbre de défaillances est une méthode de type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'événements ou combinaisons d'événements pouvant finalement conduire à cet événement redouté. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté.

L'analyse par arbre des défaillances d'un événement redouté peut se décomposer en trois étapes successives :

- définition de l'événement redouté étudié,
- élaboration de l'arbre,
- exploitation de l'arbre.

Quelle que soit la nature des éléments de base identifiés, l'analyse par arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- Ces évènements sont indépendants ;
- Ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible ;
- Leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être estimée.

Les liens entre les différents évènements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type « ET » et « OU » par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.

A l'aide de règles mathématiques et statistiques, il est alors théoriquement possible d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'événement final à partir des probabilités des évènements de base identifiés.

**b- Conception graphique**

Les liens entre les différents événements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques standards telles que ET, OU, les événements sont représentés par un rectangle, un cercle ou un losange. Les rectangles représentent des événements (événement sommet ou événements intermédiaires) résultant de la combinaison d'autres événements par l'intermédiaire des portes. Les cercles représentent des événements de base élémentaires ne pas de futur développement. Les losanges représentent des événements de base qui ne peuvent pas être considérés comme élémentaires, mais dont les causes ne sont pas et ne seront pas développées.

Le Tableau .1.4 montre le symbole de quelques éléments de l'AdD que l'on vient d'évoquer et que nous utiliserons par la suite [Mazouni, 08].

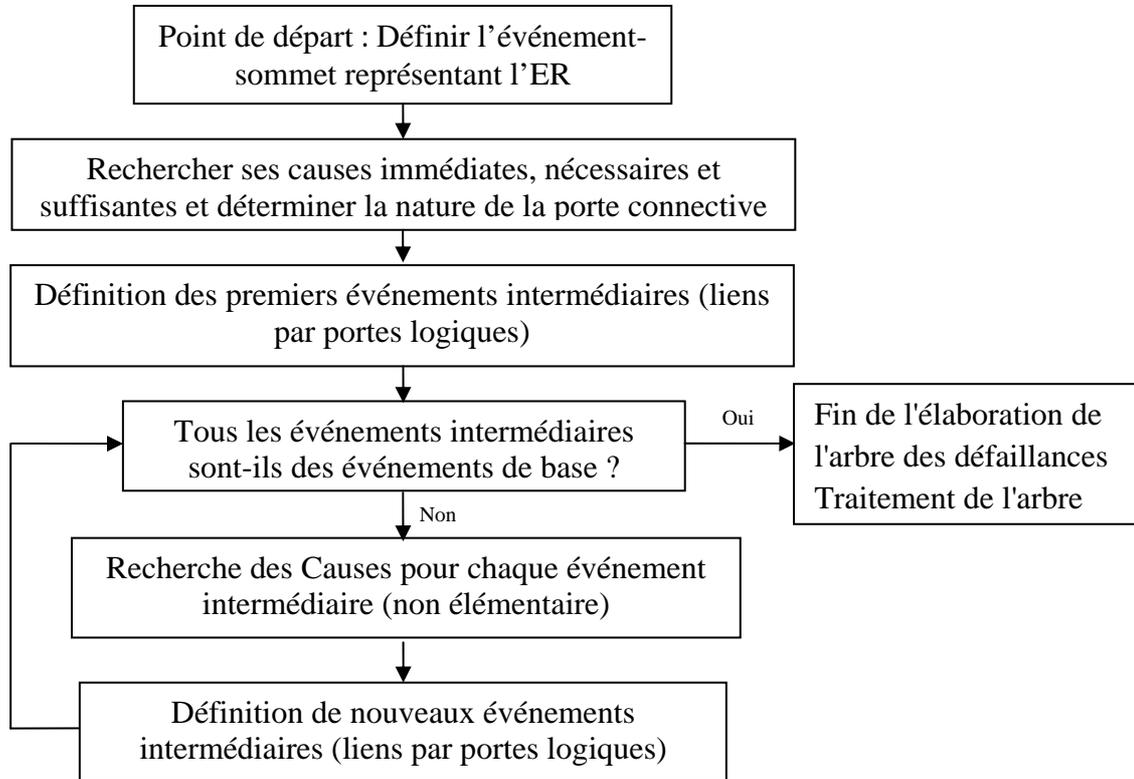
Symbole	Signification
	<b>Événement de base</b> Événement initial ne nécessitant pas de développement. Il s'agit essentiellement d'une défaillance première d'une entité à la limite de l'analyse.
	<b>Événement non développé</b> Événement qui ne constitue pas un événement de base mais qui ne sera pas développé en d'un manque d'information ou d'autres considérations
	<b>Événement intermédiaire</b> Représentation d'un événement qui est le résultat de la combinaison d'autres événements.
	<b>Porte « ET »</b> Nécessite l'addition des événements causes pour engendrer l'événement effet.
	<b>Porte OU</b> Ne requiert qu'un seul des événements causes pour engendrer l'événement effet.
	<b>Transfert vers...</b> Indique que l'arbre se poursuit à la section indiquée par le numéro dans le triangle.
	<b>Transfert de...</b> Indique que cette portion de l'arbre est la suite détaillée de la section indiquée par le numéro dans le triangle
	<b>Maison</b> Représente un événement qui correspond à une utilisation normale du système.
	Représente un événement dont les causes ne sont pas encore développées, mais le seront ultérieurement.

**Tableau 2.3** Symboles de certains éléments de l'AdD [Mazouni, 08].

**c- Déroulement de la méthode**

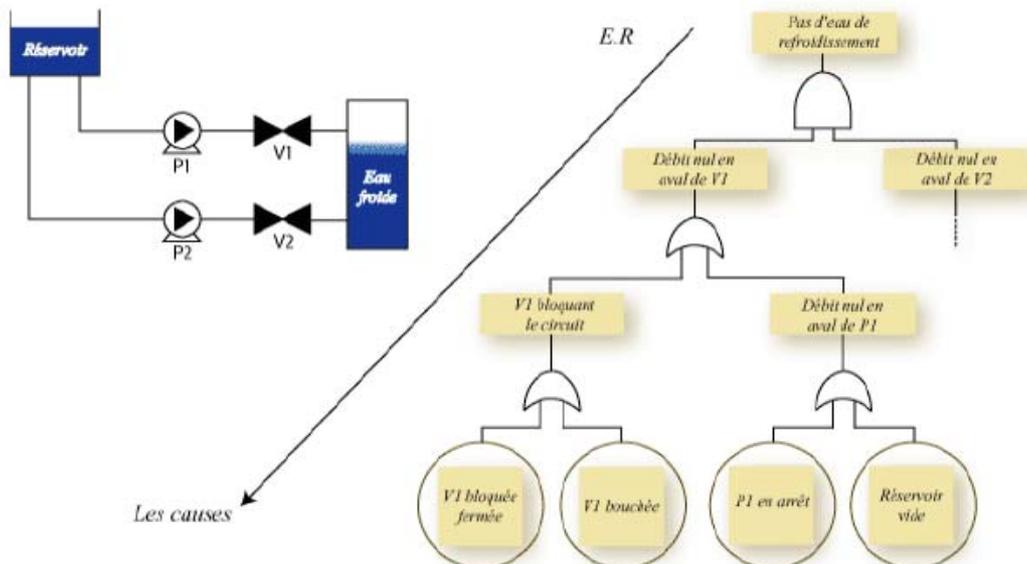
La construction de l'arbre des défaillances vise à déterminer les enchaînements d'évènements pouvant conduire à l'évènement final retenu. Cette analyse se termine lorsque toutes les causes potentielles correspondent à des évènements élémentaires.

L'élaboration de l'arbre des défaillances suit le déroulement présenté en Figure .2.6



**Figure 2.6** Déroulement de l'AdD [Debray, Chaumette, Descouriere, Trommeter, 06].

Un exemple de l'AdD est fourni ci-dessous



**Figure 2.7** Exemple de l'AdD

## 2.6 Méthode d'évaluation des risques

### a- Matrice de criticité

Généralement, les niveaux de gravité et de probabilité d'occurrence sont croisés dans une matrice de criticité afin de positionner les zones de risque. La matrice Gravité/Occurrence ci-dessous est proposée par la norme NF EN 50126 [AFNOR, 00].

O \ G	Insignifiant	Marginal	Critique	Catastrophique
Invraisemblable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Improbable	Négligeable	Négligeable	Acceptable	Acceptable
Rare	Négligeable	Acceptable	Indésirable	Indésirable
Occasionnel	Acceptable	Indésirable	Indésirable	Inacceptable
Probable	Acceptable	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable
Fréquent	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable

Tableau 2.4 Matrice de criticité [AFNOR, 00]

Mazouni [Mazouni, 08] propose de garder les qualificatifs de la norme NF EN 50126, tout en les répartissant sur 3 classes distinctes : « risque maîtrisé » regroupant le risque négligeable et le risque acceptable, « risque maîtrisable » regroupant le risque indésirable non résiduel et enfin « risque non maîtrisable » regroupant le risque résiduel et le risque inacceptable (voir Figure .1.3).

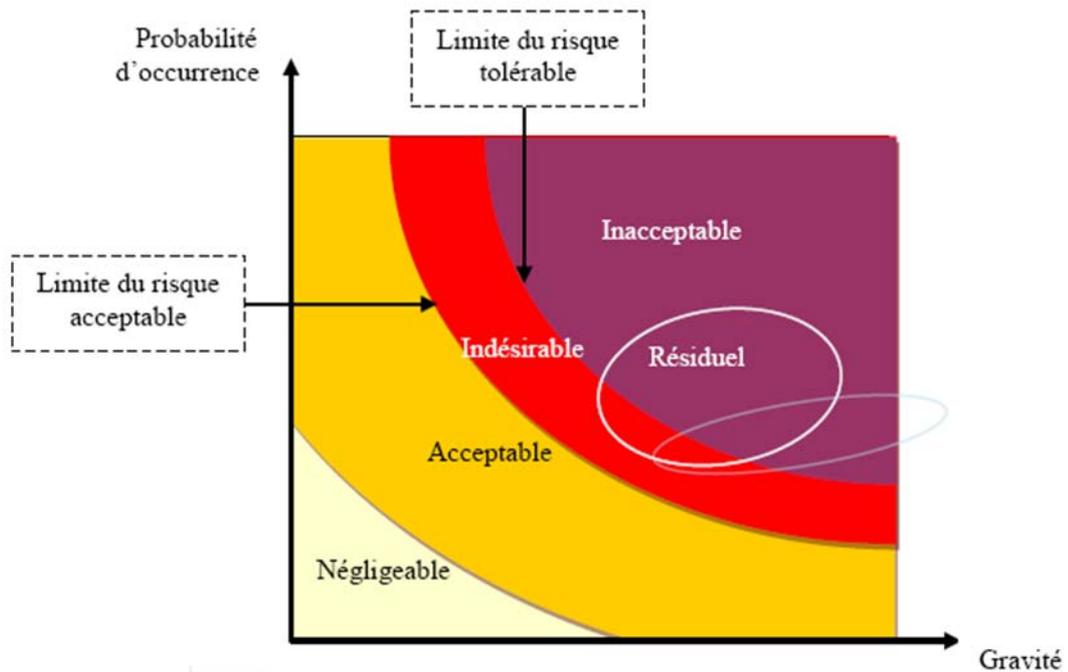


Figure 2.8 Classification des risques [Mazouni, 08]

## 2.7 Conclusion

Nous avons essayé tout au long de ce chapitre de mieux situer la notion d'analyse de risque par rapport aux autres activités de la gestion des risques. Ensuite, nous avons présenté rapidement les principales méthodes d'analyse de risque sachant qu'il existe d'autres méthodes moins utilisées dans un contexte industriel.

Pour une analyse de plus en plus fine du risque, il s'avère intéressant d'utiliser deux ou plusieurs méthodes d'analyse et compte tenu de la nature de notre problème qui trouve son terrain d'application à l'unité de GNL SKIKDA ce choix est dicté par le risque que présente le produit GNL (liquide inflammable) est l'utilisation de deux méthodes d'analyse est largement justifié pour traiter ce problème.

Après une étude détaillée des méthodes d'analyse des risques dans différents domaines, nous avons conclu que la méthode HAZOP est la plus employée dans le cas fluides. Et vu la nature de notre produit (fluide) Nous avons opté pour le choix de cette dernière, comme méthode d'analyse qualitative. Pour l'étude quantitative nous avons opté pour l'AdD et ceci vu sa large utilisation dans les industries à haut risque et sa mécanisation (logiciel).

## **CHAPITRE III.**

### **PLANIFICATIONS DES TÂCHES DE MAINTENANCE DANS UN SYSTÈME DE PRODUCTION**

### 3.1 Introduction

La fonction maintenance, dont la vocation est d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est désormais une des fonctions stratégiques dans les entreprises.

Les politiques de maintenance appliquées dans divers entreprises gagnent de plus en plus d'intérêt en situation d'indisponibilité d'une installation. La rapidité avec laquelle cette installation est remise en service dépend de l'efficacité de ces méthodes, et conditionne de manière significative la disponibilité et par voie de conséquence la productivité, la sécurité et le coût de maintenance engendré.

Dans les problèmes d'ordonnement des tâches de maintenance deux notions fondamentales sont utilisées: les tâches et les ressources. Le but est de programmer l'exécution des tâches en leur allouant les ressources requises.

### 3.2 Maintenance : définitions et concepts de base

Le terme « maintenance » est apparu dans les années 1950 aux États-Unis. En France, on parlait encore à cette époque d'entretien. Progressivement, une attitude plus positive vis-à-vis de la défaillance voit le jour. Il faut tirer une leçon de l'apparition d'une panne pour mieux réagir face aux aléas de fonctionnement [Héng, 00].

#### 3.2.1 Définition de la maintenance

1. 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 [AFNOR, 01].
2. L'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administrative et de management [RICHET, 96].

#### 3.2.2 Pronostic

Après détection de la dégradation d'un composant ou d'une fonction, le rôle du processus de pronostic est de prédire l'évolution future des performances du système en tenant compte d'interventions de maintenance planifiées et éventuellement, de conditions opérationnelles ou environnementales changeantes [Muller et al, 2005].

#### 3.2.3 Dégradation

Évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe [AFNOR, 2001].

### 3.2.4 Défaillance

La cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise [AFNOR, 2001].

### 3.2.5 Panne

État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures [AFNOR, 2001].

### 3.2.6 Diagnostic

Actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause [AFNOR, 01].

## 3.3 Organisation et gestion des activités de maintenance dans un système de production

### 3.3.1 La maintenance dans l'entreprise

La maintenance constitue actuellement une partie toute entière de l'entreprise avec des besoins (pour sa réalisation) et des retombées (résultats attendus). Ainsi, la maintenance au sein de l'entreprise se retrouve comme sur la figure 3.1

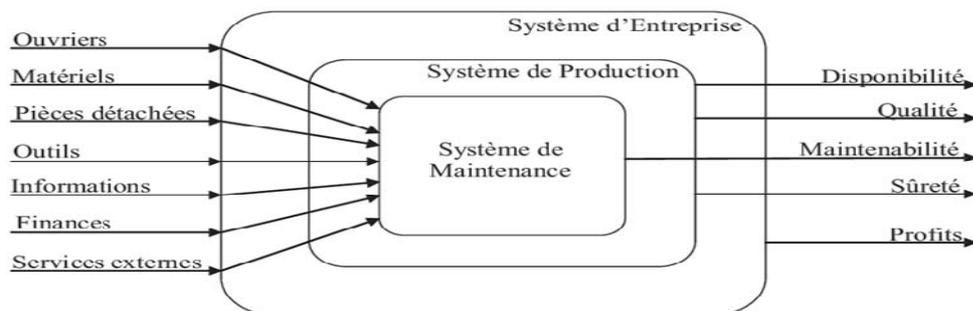


Figure 3.1 Modèle entrée-sortie de la maintenance dans l'entreprise [Tsang, 02]

La fonction maintenance présentée comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion (voir figure 3.2) [Retour, 90].

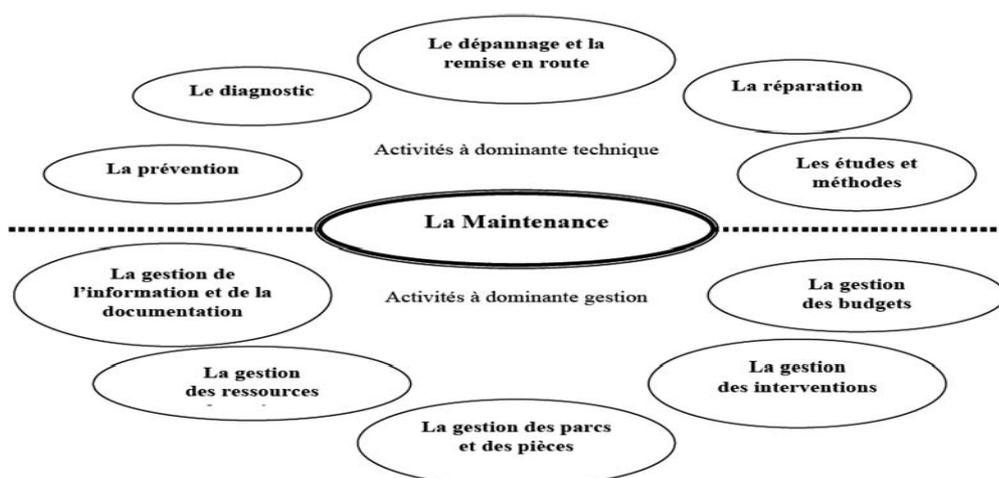


Figure 3.2 Le contenu de la fonction maintenance [Retour, 90]

### 3.3.2 Politiques de maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF EN 13306 les formes de maintenance [AFNOR, 01].

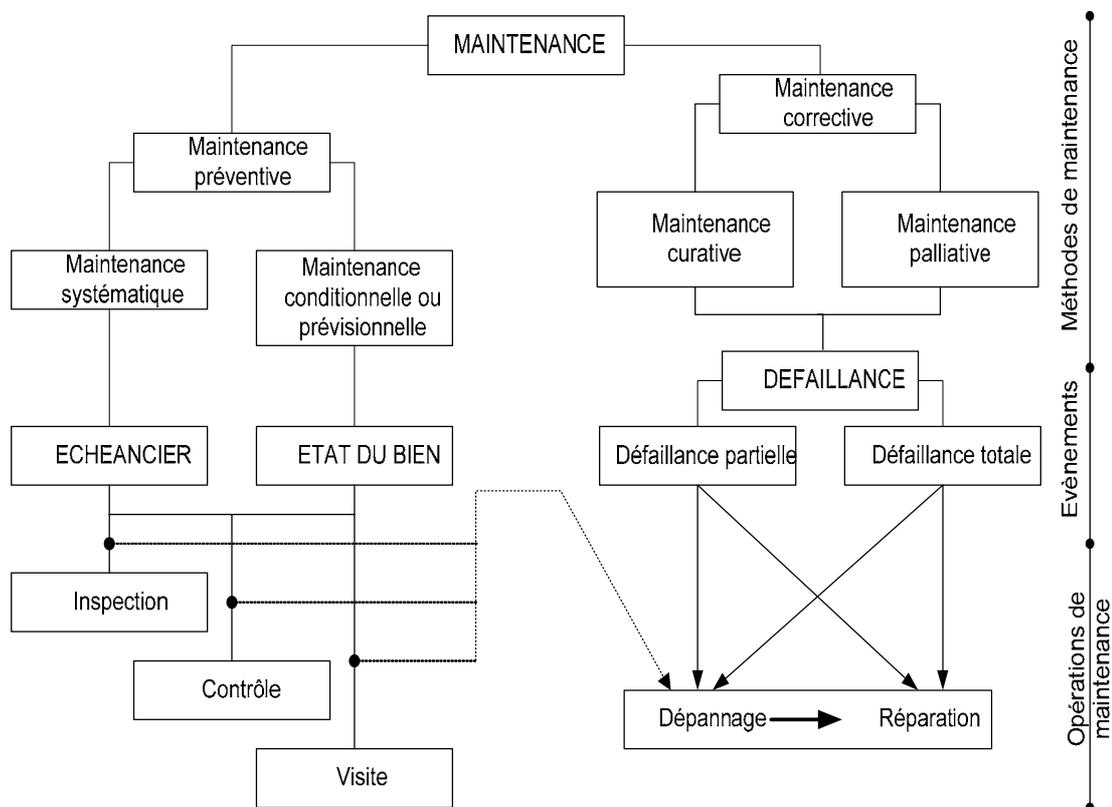


Figure 3.3 Les différentes formes de maintenance [AFNOR, 01].

#### 3.3.2.1 La maintenance corrective

La Maintenance Corrective (MC) est «l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement. Ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance partielle ou complète et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, et enfin le contrôle du bon fonctionnement» [AFNOR, 01].

Il faut distinguer là, deux aspects : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- **Maintenance palliative (dépannage)**: Elle regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un équipement d'accomplir provisoirement une fonction requise. Appelée couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.
- **Maintenance curative (réparation)** : Elle regroupe les actions de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un équipement dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou des aménagements ayant pour objet de supprimer les défaillances.

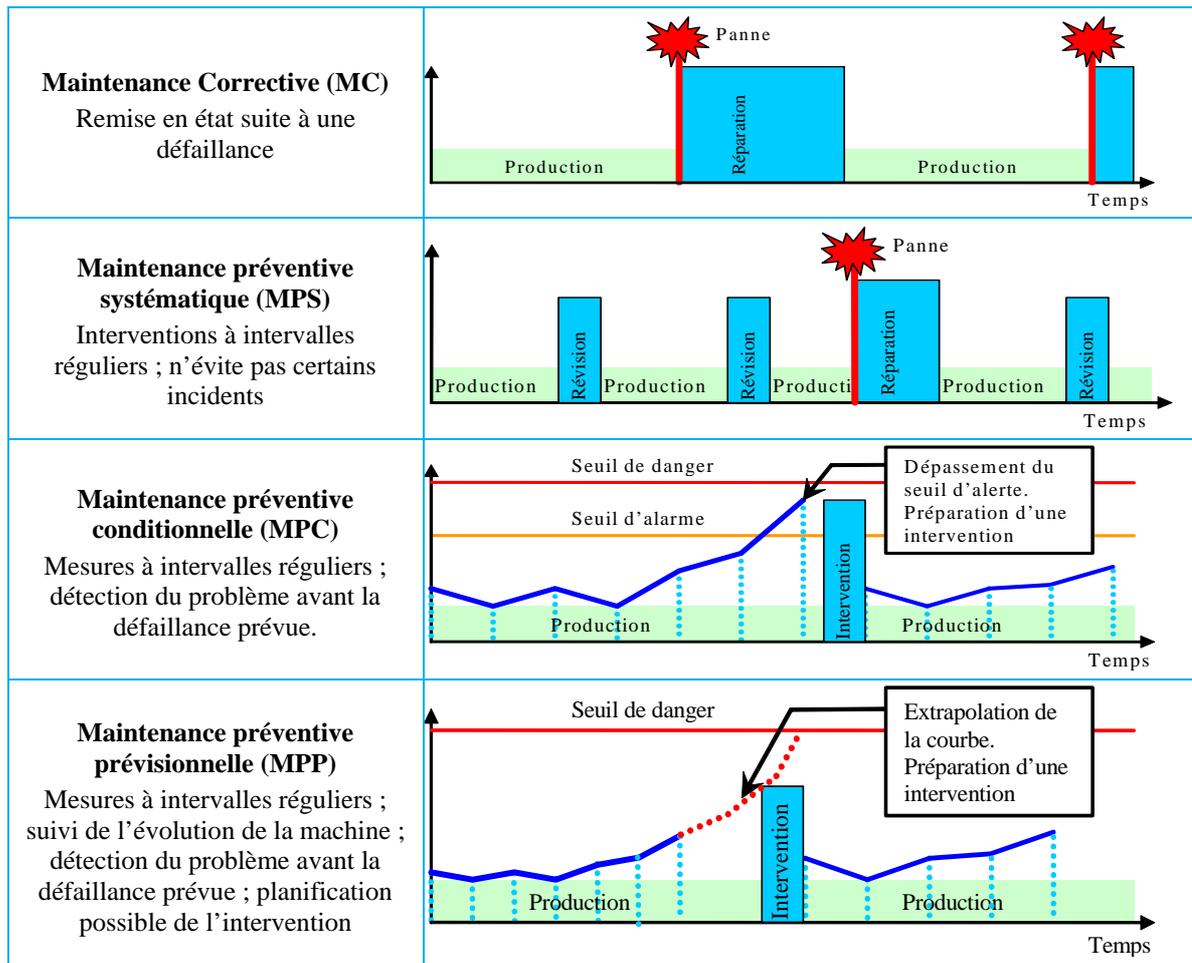
### 3.3.2.2 La maintenance préventive

La Maintenance Préventive (MP) est définie comme une «maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu.» [AFNOR, 01].

On peut distinguer trois types de maintenance préventive :

- **Maintenance préventive systématique** : « La maintenance préventive systématique comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants, lorsque ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant» [AFNOR, 01].
- **Maintenance préventive conditionnelle** : c'est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événements prédéterminé (autodiagnostic, information donnée par un capteur, mesure d'une usure, etc.) et révélateur de l'état de dégradation d'un bien [Boulenger, 88].
- **Maintenance prévisionnelle (Nouvelles formes de la maintenance préventive)** : la maintenance préventive conditionnelle a évolué vers la (prédictive) définie par la norme NFX 60-010 comme étant une «maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation d'un bien, permettant de retarder et de planifier les interventions».

### 3.3.3 Comparaison entre les différentes formes de maintenance



**Figure 3.4** Comparaison entre les différentes formes de maintenance

### 3.3.4 Critères de choix d'une politique de maintenance

Au moment de la détermination de la politique de maintenance qui va être mise en œuvre sur un équipement ou une installation, les entreprises se trouvent devant une alternative classique, quel type de maintenance doit-il adapter ?

Il peut paraître simple de répondre à cette question et une première analyse sommaire conduirait à privilégier la maintenance préventive en croyant, à tort, que cette maintenance préventive va supprimer totalement le risque de panne. En fait la maintenance préventive ne fait que « réduire la probabilité d'apparition d'une défaillance » (NF EN 13306). Une analyse plus approfondie montre que le choix entre maintenance corrective et maintenance préventive demande la connaissance et l'examen d'un certain nombre de critères et de paramètres qui, selon le contexte, auront plus ou moins d'importance et qui induisent ces formes distinctes en fonction des matériels à maintenir dans un état permettant d'assurer un service déterminé. La démarche utilisée est celle du diagramme ci-dessous :

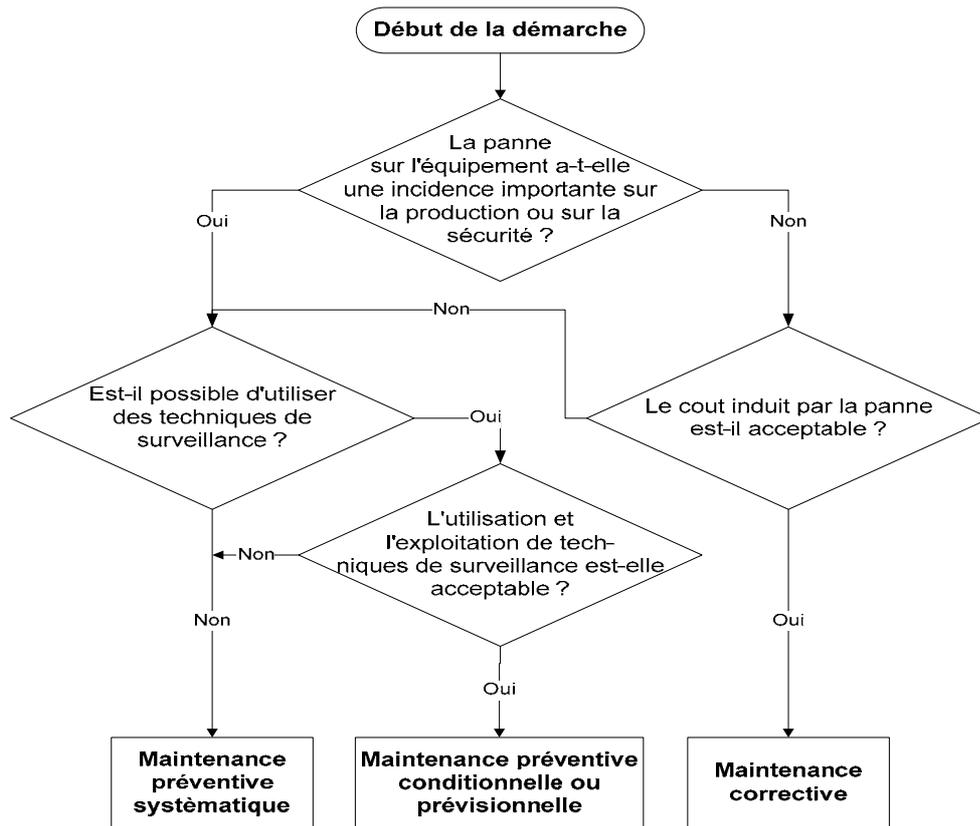


Figure 3.5 Diagramme de choix d’une forme de maintenance

Donc la mise en place d'une politique de maintenance nécessite une analyse rigoureuse du système de production, des modes de dégradation, des paramètres physiques pertinents, des moyens à mettre en œuvre, des coûts induits, des objectifs en disponibilité et en gain économique, des qualifications du personnel, des réticences des personnels et des conséquences sur l'organisation générale du service.

### 3.3.5 Optimisation d’une politique de maintenance

L’optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance optimale entre maintenance préventive et corrective tout en respectant les objectifs fixés. Il faut alors déterminer les instants de maintenance et les actions à effectuer de manière à optimiser un critère de décision fixé. Ce critère de décision peut aussi bien reposer sur le coût, par exemple un coût moyen de maintenance à long terme ou le coût d’opération par unité de temps, que sur la disponibilité du système ou encore la sécurité [Castanier, 02].

La figure 3.6 illustre les coûts de maintenance préventive et corrective en fonction du niveau de planification. Une faible planification conduit à des interventions d'urgence plus nombreuses et par conséquent, plus coûteuses. A l'opposé, une planification intensive coûte plus cher et conduit à des pertes liées à la sur-maintenance. L'optimisation du coût total permet de trouver le meilleur équilibre en fonction des risques mis en jeu.

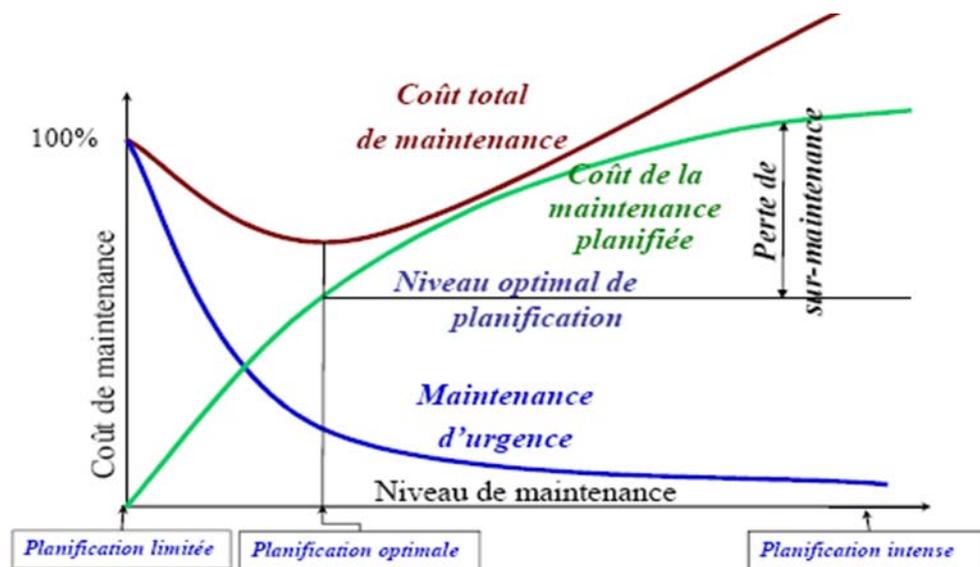


Figure 3.6 Optimisation d'une politique de maintenance [Castanier, 02]

### 3.3.6 Maintenance préventive

#### 3.3.6.1 Mise en place d'une maintenance préventive

La démarche de mise en place de la maintenance préventive est tout d'abord de faire participer les différents services aux travaux préliminaires pour pouvoir élaborer le plan de maintenance. C'est la constitution d'une structure de nomenclature du matériel de l'entreprise. Pour cette étape, les méthodes ont besoin de la participation de la production, l'étude, la qualité, la comptabilité et la réalisation maintenance. Cette démarche participative a comme objectif d'adopter les vocabulaires et la forme de la structure qui sont convenables pour tous [Héng, 02].

Il sera souhaitable d'avoir la collaboration de la production et de la réalisation maintenance pour les trois dernières étapes :

- le choix des machines à mettre sous préventif,
- l'élaboration du plan de maintenance,
- la planification des arrêts.

À chaque étape d'avancement, une réunion d'information sera nécessaire. Il faut que les intervenants de maintenance soient convaincus par la démarche et les objectifs.

#### 3.3.6.2 Ordonnancement des tâches de maintenance

##### a- Problème d'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches » [Lopez & Roubellat , 01].

***b- Les tâches ordonnancées***

Une tâche est une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début  $t_i$  ou de fin  $c_i$ , dont la réalisation est caractérisée par une durée  $p_i$  (on a  $c_i = t_i + p_i$ ) et par l'intensité  $a_i^k$  avec laquelle elle consomme certains moyens  $k$ , ou ressources. Pour simplifier, on supposera que pour chaque ressource requise, cette intensité est constante durant l'exécution de la tâche [Esquirol et al, 01].

***c- Les ressources d'un ordonnancement***

Une ressource  $k$  est un moyen technique ou humain requis pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée, sa capacité  $c_k$  (supposé constante) [Esquirol et al, 2001].

***c- Les contraintes***

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre certaines variables. On distingue deux types de contraintes : les contraintes temporelles et les contraintes de ressources [Esquirol et al, 01].

***d- Modélisation de l'ordonnancement de la maintenance***

L'ordonnancement de la maintenance a pour rôle de planifier la réalisation des tâches de maintenance sur les machines et équipement de la production, c'est à dire de fixer leurs dates de début et leurs dates de fin et de réunir tous les moyens prévus pour leur réalisation (machines, personnel, outils, pièces de rechanges, etc.) [Coudert, 00]. Il intervient chronologiquement entre la fonction « Méthodes » chargée d'initier les tâches en affectant une durée à un travail (temps alloué) et la fonction « Réalisation » (ou Lancement) chargée de mettre en œuvre l'intervention au moment choisi par l'ordonnancement. Les activités principales en ordonnancement de la maintenance sont la Programmation, le Lancement et l'Approvisionnement [Monchy, 00].

La programmation est l'action d'intégrer une tâche en attente sur un planning en lui choisissant des dates de début et de fin. L'activité de lancement a pour mission de rassembler tous les moyens nécessaires, à la réalisation d'une tâche de maintenance, pour assurer leur disponibilité au moment choisi. L'ordonnancement de la maintenance est également responsable de la disponibilité des «consommables» et des pièces de rechange, donc d'assurer les approvisionnements nécessaires.

La notion d'ordre de travail de maintenance peut être rapprochée de celle d'opération de production et la notion de ressource de maintenance peut être rapprochée de celle de ressource de production. Le problème d'ordonnancement de la maintenance revient donc à un problème d'affectation de ressources de maintenance à la réalisation d'ordres de travail de

maintenance sur des machines du système de production, les ressources de maintenances étant constituées des opérateurs de maintenance [Paz & Leigh, 94].

Parmi les méthodes utilisées pour modéliser l'ordonnancement de la maintenance, nous citons la méthode GHANT.

Le diagramme de GANTT est un planning présentant une liste de tâches en colonne et en abscisse l'échelle de temps retenue. La mise en œuvre de technique de planification nécessite que les tâches soient identifiées, quantifiées en terme de délais, de charges ou de ressources et que la logique de l'ensemble des tâches ait été analysée.

Afin de mener à bien la réalisation de cet outil, il faut donc procéder comme suit :

- Déterminer et structurer la liste des tâches à réaliser.
- Estimer les durées et les ressources.
- Réaliser le réseau logique.
- Tracer le diagramme de GANTT.

La forme graphique de GANTT visualise la succession des tâches, chaque durée de tâche étant représentée par une barre dont la longueur est à l'échelle des temps, voir figure 3.7

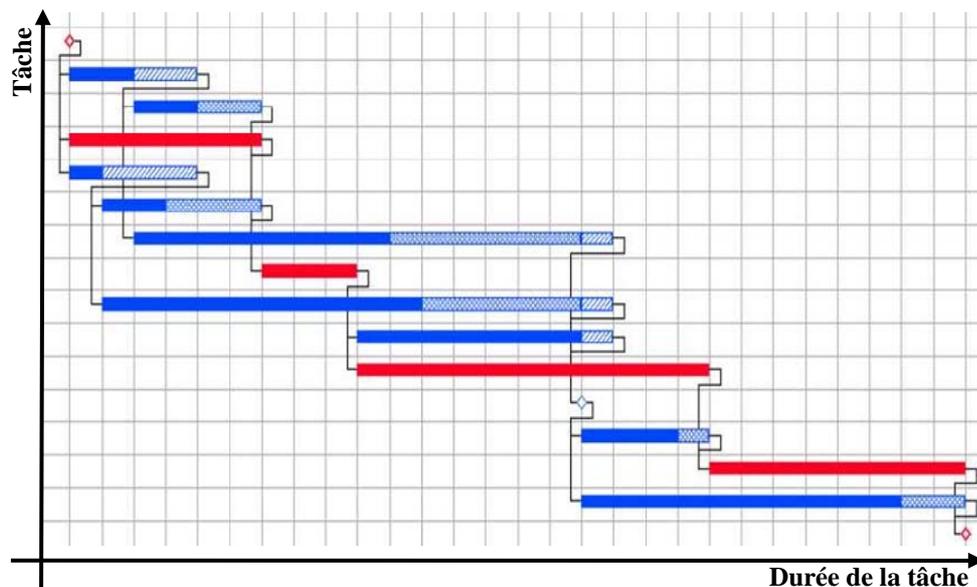
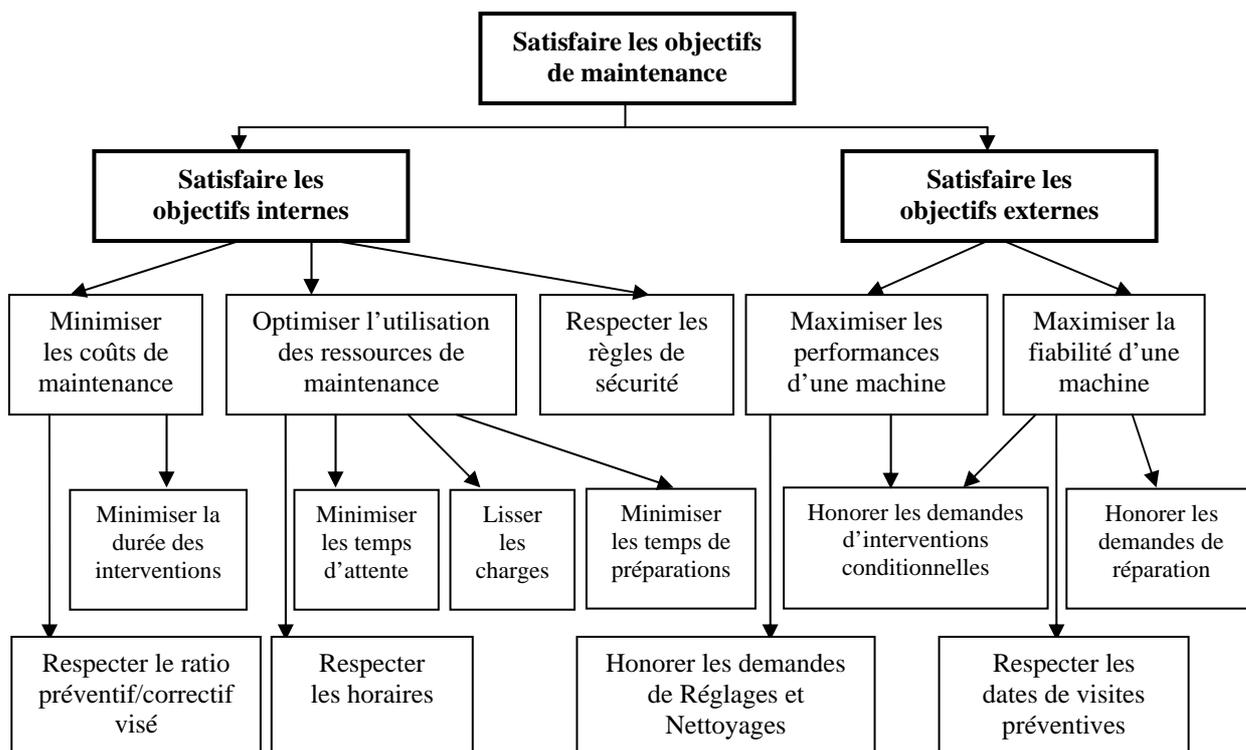


Figure 3.7 Exemple d'un diagramme de GANTT

### *e- Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance*

Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance peuvent être décomposés de manière hiérarchique en distinguant les objectifs internes et les objectifs externes (Figure 3.8) [Coudert, 00]. Les objectifs internes concernent le fonctionnement propre du service de maintenance et les objectifs externes sont imposés par d'autres services (principalement la production).



**Figure 3.8** Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance. [Coudert, 00].

***Les objectifs internes sont relatifs***

- aux coûts de maintenance (respect du ratio préventif/correctif déterminé lors de la définition de la stratégie de maintenance ou encore la minimisation de la durée des interventions),
- à l'optimisation de l'utilisation des ressources de maintenance (tels que le respect des horaires des équipes, la minimisation des temps d'attente, le lissage des charges ou le regroupement des tâches de préparation afin d'en optimiser la durée),
- aux règles de sécurité (protection des intervenants pour les travaux dangereux).

***Les objectifs externes, ils sont relatifs***

- aux performances des machines (honorer les demandes de réglages et de nettoyage et respecter les demandes d'interventions conditionnelles),
- à la fiabilité d'une machine (honorer les demandes de réparation et d'interventions conditionnelles, respecter les dates d'interventions préventives).

**3.3.7 Orientations des politiques de maintenance**

Les décisions de la fonction maintenance reposent sur trois notions qui définissent six grandes orientations des politiques de maintenance [Charles, 00]. Les trois notions sont : coût, disponibilité, fiabilité et maintenabilité.

Compte tenu de leurs objectifs, il est à noter que ces orientations des politiques ne sont pas contradictoires dans leur principe, mais peuvent le devenir dans leur application. Nous introduisons brièvement dans ce qui suit quelques caractéristiques des stratégies existantes.

### **3.3.7.1 Stratégie de type Life Cycle Cost (LCC)**

La stratégie du Life Cycle Cost est basée sur la détermination du coût de maintenance d'un équipement sur la durée de son cycle de vie. La grandeur *Life Cycle Cost* désigne la somme des coûts d'investissement de l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation et des coûts de maintenance, sur la durée de vie de l'équipement. Cette démarche permet l'optimisation du coût global d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie. Ce concept est principalement utilisé dans une démarche décisionnelle pour choisir une politique de maintenance à appliquer et l'âge adéquat de remplacement de l'équipement. Cependant, la difficulté majeure de cette approche est l'estimation des différents coûts intervenant durant le cycle de vie d'un équipement [ABBOU, 03].

### **3.3.7.2 Stratégie de type Total Productive Maintenance (TPM)**

La stratégie Total Productive Maintenance a été initiée au Japon dans les années 1970 et s'inscrit dans une stratégie du zéro défaut, zéro délai, zéro stock et zéro panne. Elle met l'accent sur l'organisation des ressources productives pour améliorer la disponibilité des équipements : l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donnée ou durant un intervalle de temps donnée, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée » [Monchy, 00].

### **3.3.7.3 Stratégie de télémaintenance**

La télémaintenance est une forme évoluée de maintenance [Kolski & Millot, 93]. Elle est basée sur le principe suivant : les capteurs, mesurant des grandeurs intimement liées à l'état de la machine, sont reliés à une centrale de surveillance qui enregistre toutes les alarmes et les mesures. Des tableaux synoptiques visualisent la localisation de l'information. Cette technique permet d'une part, le suivi et l'enregistrement des données sur chaque machine pour des fins de comparaison et d'autre part, la détection d'aléas de fonctionnement. L'agent de surveillance qui constate une évolution d'une dégradation ou l'apparition d'un défaut, a la responsabilité de mettre hors service, de consigner la partie lésée de l'installation et d'alerter les agents d'intervention. Cette technique est applicable dans les chaînes de production automatisées ou auto-programmables. Avec l'évolution fulgurante de la technologie lors de la dernière décennie, la télémaintenance prend une place de plus en plus grande dans les entreprises manufacturières. Cette technologie permet de faire le contrôle et le suivi de

l'évolution interne ou/et externe de l'état des machines de production. Lorsque les systèmes de télémaintenance utilisent des outils intelligents, on parle alors de e-maintenance.

#### **3.3.7.4 Stratégie de e-maintenance**

La e-maintenance est donc une forme intelligente de télémaintenance. Chatelet et Jouga ont présenté deux solutions de e-maintenance qui résument les travaux dans ce domaine [Chatelet, 99]. La première est composée généralement d'un ordinateur doté d'un serveur web ou d'un automate programmable possédant un coupleur web, appelé communicateur Internet. C'est le seul équipement qui peut dialoguer avec l'équipement distant. Il concentre toutes les informations provenant des capteurs contrôlant le processus. La deuxième solution consiste à donner l'accès direct à des équipements, ils deviennent alors des serveurs web enfouis. Une connexion internet est alors nécessaire sur les équipements.

#### **3.3.7.5 Stratégie de type Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)**

La stratégie de type MBF s'établit sur l'amélioration de la fiabilité et la maintenabilité. Cette approche cherchait à développer des programmes d'entretien préventifs techniquement consolidés. Sa caractéristique est son orientation sur la compréhension des fonctions de chaque pièce d'un équipement et de l'impact de la défaillance sur ces fonctions. Le noyau de cette approche est basé sur une analyse de type AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) [Richet et al. 1996], où une phase de collecte et documentation de données sur le matériel est nécessaire pour identifier et décomposer l'équipement en systèmes fonctionnels. L'objectif est de déterminer le remplacement préventif à mettre en œuvre en fonction des priorités, des facteurs économiques et impératifs de sécurité [Zwingelstein, 96].

### **3.4 Conclusion**

La maintenance industrielle joue actuellement un rôle déterminant dans la conduite de la production. En effet, la recherche de l'accroissement des performances des ateliers de production, de plus en plus variés et complexes, conduit à transférer sur la fonction maintenance la responsabilité de garantir la disponibilité de ces systèmes. L'objectif de la maintenance devient alors l'identification réactive de l'élément défaillant (maintenance corrective) mais aussi la prévision des pannes afin de réduire la durée moyenne d'indisponibilité du système (maintenance préventive).

Les arrêts accidentels du système de production sont considérés comme une source de perturbation et de perte de productivité et de sécurité. La disponibilité des équipements, au moment voulu, est une condition nécessaire au bon déroulement de la production. La maintenance préventive est un moyen efficace pour maintenir un niveau de disponibilité

acceptable. Cependant, le déploiement des activités de maintenance nécessite l'arrêt total des équipements de production, et par voie de fait la perturbation de l'ordonnancement en cours.

## **CHAPITRE IV.**

### **MAINTENANCE BASÉE SUR LE RISQUE (MBR)**

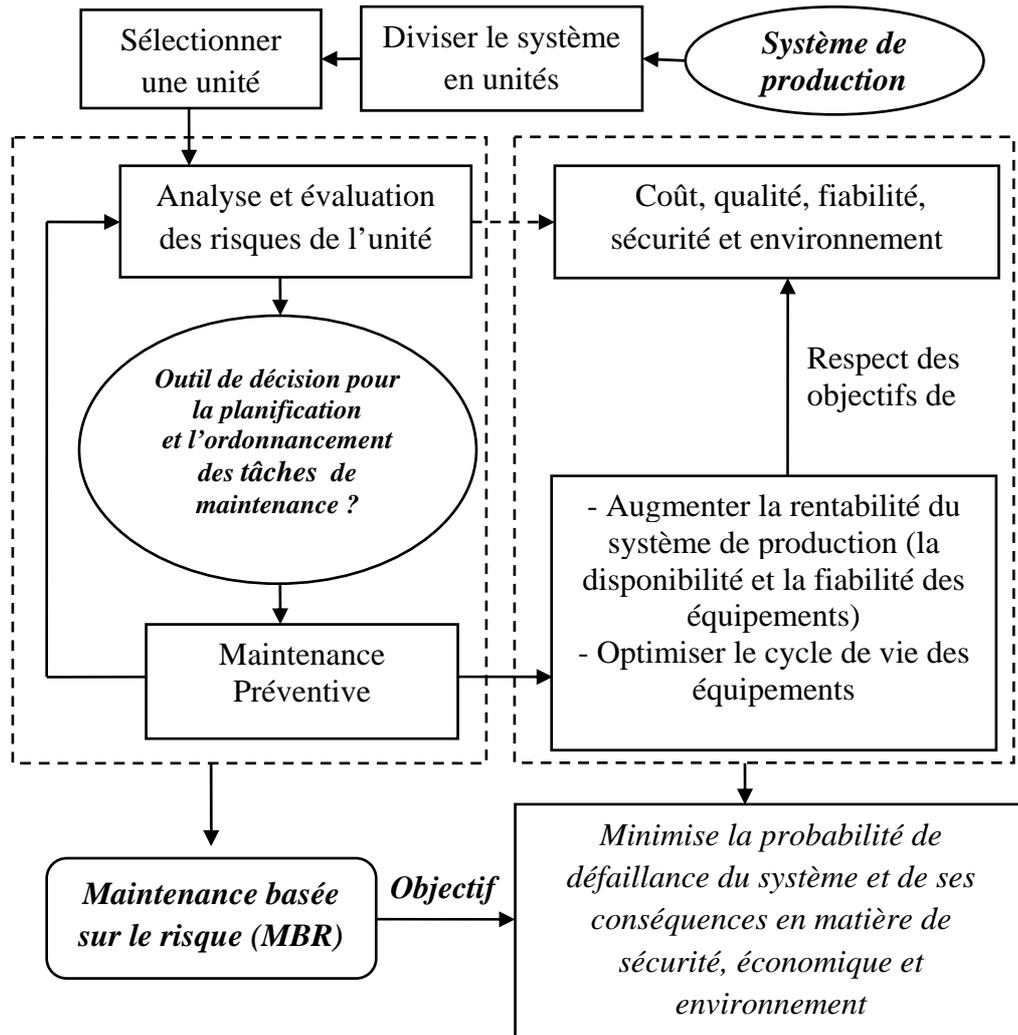
## 4.1 Introduction

Actuellement, la maintenance s'impose comme la meilleure solution permettant d'accroître les performances des entreprises et d'améliorer le niveau de sûreté de fonctionnement par la réduction des risques.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des travaux de recherche et des applications industrielles autour de la problématique de notre mémoire (l'approche MBR). Il vise à situer le présent travail au regard des travaux antérieurs et montrer les axes potentiels d'apports scientifiques et industriels.

## 4.2 Problématique de MBR

Les revues de littérature montrent qu'il existe une nouvelle tendance d'utiliser le niveau de risque comme un critère pour planifier les tâches de maintenance dans un système de production. Toutefois, la plupart des études centrées sur un type d'équipement particulier. Il semble qu'il ya un besoin pour une méthode plus généralisée qui peut être appliquée à tous les types d'équipement, indépendamment de leurs caractéristiques. Cette méthode minimise la probabilité de défaillance du système de production et de ses conséquences en matière de sécurité, économique et environnement. Elle aide la direction à prendre des décisions correctes concernant l'élaboration d'une stratégie de maintenance optimale avec le respect des objectifs de sûreté de fonctionnement.



**Figure 4.1** Résumé de la problématique de recherche

Ceci nous amène donc à rechercher : « *Comment réduire les risques industriels à partir d'une meilleure planification des tâches de maintenance afin de garantir la sécurité industrielle dans les systèmes de production* » ?

### 4.3 Les analyses des risques dans un processus de maintenance

Cette section du chapitre développe l'aspect intégration des risques dans le système de gestion des actions de maintenance.

Des travaux ont eu comme sujet l'optimisation des stratégies de maintenance par la minimisation du niveau du risque [Tomic, 93] [Khan et al, 03] [Duarte et al, 06]. Ces travaux relèvent l'importance de la maîtrise préventive du niveau de risque en raison de leur impact sur les coûts de maintenance, les pertes de productivité, la qualité et les rendements. Cette approche désigne le risque comme point essentiel pour définir l'ensemble des actions préventives. L'analyse du hasard pour chaque unité de l'équipement permet d'identifier les

risques qui peuvent impacter le bon fonctionnement et ainsi les prévenir par les actions adéquates.

#### **4.3.1 Bref aperçu sur l'évolution de la politique de maintenance vers MBR**

Les études dans le domaine de gestion des équipements et leur fiabilité sont nombreuses et variées [Duarte et al. 2006]. Diverses politiques ont été développées pour minimiser le taux de panne, baisser le niveau de risque et améliorer la disponibilité des machines.

La fonction maintenance connue dans ses débuts par le caractère correctif, a évolué depuis vers des systèmes de contrôle, de prévention et de supervision. Dans ce cadre, les politiques de maintenance, généralement connues par des aspects de fiabilité et de disponibilité, visent à optimiser le fonctionnement des machines de production en minimisant le risque de panne.

Des approches diverses ont été proposées pour améliorer le fonctionnement des systèmes de maintenance. Les principales fonctions objectives étudiées sont : la minimisation des coûts, l'amélioration de la disponibilité, la réduction des risques. Les coûts indirects de maintenance sont équivalents, en Europe, de 4% à 8% du chiffre d'affaires; c'est sensiblement la même chose pour les coûts directs [Jung et al, 06].

Avec l'évolution des technologies, le développement des moyens de communication avec et sans fil, la maintenance à distance ou « e-maintenance » [Levrat et al, 08] est parmi les avancées technologiques récentes en terme de contrôle et de maîtrise des risques à distance. [Jung et al, 06] montrent que ce type de maintenance permet au moins d'identifier la cause racine ou des pannes, réduire les pannes des systèmes de production, réduction des risques, éliminer les coûts élevés des maintenances et améliorer la qualité et la productivité.

#### **4.3.2 Le risque et sa pertinence dans la maintenance (MBR)**

Risque et maintenance : deux termes qui se croisent sur l'objectif et dont l'existence de l'un est déclencheur de l'autre. L'objectif de la maintenance préventive est d'éliminer le risque mais s'il n'y a pas de risque la maintenance n'a pas lieu d'être.

Les théories de fiabilité, les politiques de maintenance préventive, sont présentées dans un cadre d'optimisation des coûts des actions correctives et préventives. La majorité de ces approches sont focalisées sur la performance des équipements par une réduction de l'occurrence des pannes et l'optimisation des fréquences de maintenance. Le risque de panne n'est pas une notion courante dans la définition des plannings.

La notion de maîtrise des risques est apparue dans un cadre de performance industrielle, de gain de confiance vis-à-vis du client et de contrôle des capacités de

production. Dans le domaine de la maintenance, la méthodologie RFM (Risk Focused Maintenance) a été proposée pour définir les priorités des actions en accord avec le niveau de risque [Tomic, 93].

[Cassanelli et al, 06] ont appliqués les analyses des risques lors de l'étape de conception d'un moteur électrique proposant un processus de gestion des actions correctives (au niveau design) basé sur les analyses des événements par les FMECA. Ils considèrent la précision dans la définition des risques comme le facteur majeur de réussite des FMECA. Une méthode de maintien et de mise à jour de la base des risques est proposée. Il est pointé que les analyses des risques doivent suivre l'évolution du produit et de l'équipement.

[Herrou et al, 05] ont présentés un cas d'étude d'un système compresseur pour lequel on applique la méthode FMECA pour minimiser les coûts indirects de maintenance, en focalisant sur l'identification des facteurs mineurs qui ont un impact majeur sur le système (principe du Pareto). Ils procèdent par cascade pour identifier les causes potentielles au plus bas niveau du système (décomposition fonctionnelle). Un cas d'application dans une PME est présenté en montrant l'apport d'une telle approche pour définir les besoins en termes de disponibilité des équipements et, ainsi, aiguiller vers une amélioration de la politique de maintenance.

Les approches RFM considèrent les risques comme une des parties du processus de décision pour la maintenance [Darling, 96]. D'autres approches comme RBM (Risk Based Maintenance) considèrent le risque comme critère central dans le processus de décision.

### **4.3.3 Le rôle des analyses des risques dans l'optimisation des priorités de maintenance**

Le rôle des politiques de maintenance est de définir des moyens de détection et de mise en place d'actions correctives ou préventive pour assurer le bon fonctionnement d'un système.

Le rôle de ces politiques a été largement démontré et mesuré en termes de productivité et bénéfice de l'entreprise. Mais plus les systèmes de production sont complexes, plus l'identification et le choix de ces stratégies devient difficile. Des diverses stratégies ont été adoptées en fonction du domaine industriel. Les pannes et les arrêts non contrôlés affectent le temps de cycle de production, la qualité du produit et, évidemment, le coût de production. Les politiques de maintenance citées dans la section précédente montrent l'intérêt de planifier à l'avance les actions en optimisant des intervalles qui les séparent.

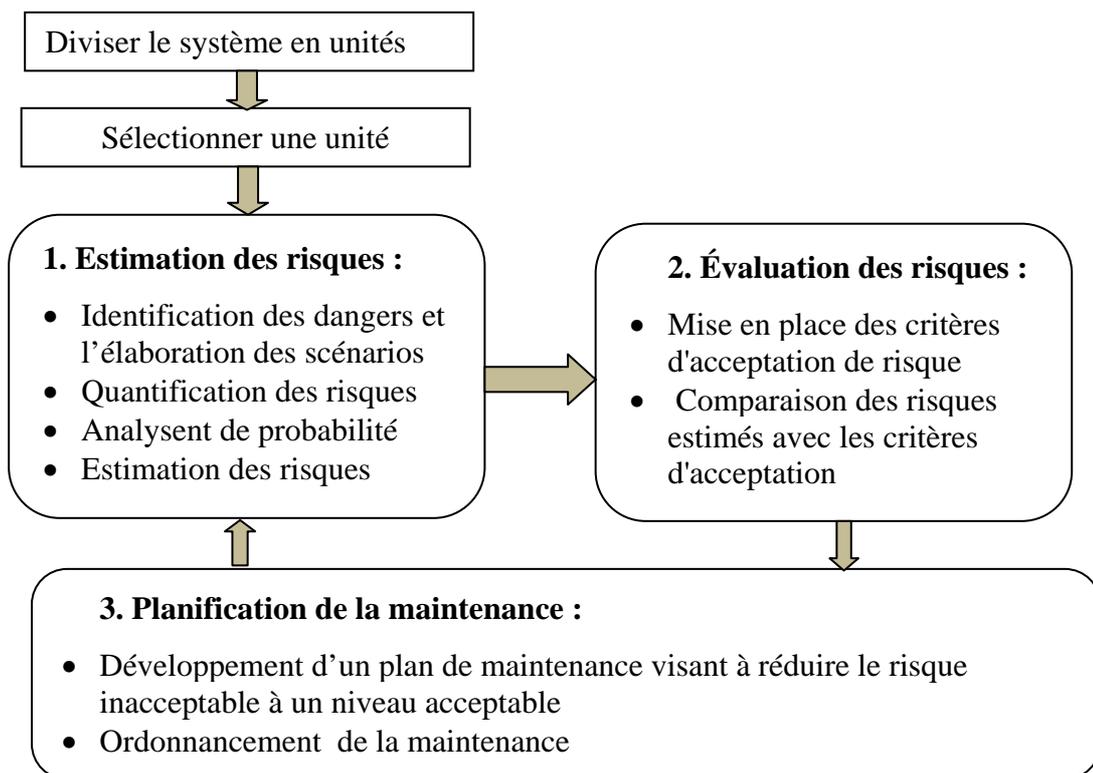
L'idée d'intégrer la notion de risque dans la maintenance des équipements a été utilisée par les militaires [DOD, 80] pour fiabiliser leurs systèmes et éviter les défaillances qui coûtent très cher en pertes matérielles et humaines dans ce domaine. La complexité des

équipements et la technologie avancée utilisée pour les piloter rend la tâche des services maintenance difficile et la recherche de la cause de panne plus délicate. C'est pourquoi une analyse préliminaire des risques associés au fonctionnement de l'équipement et ses composants présente un des supports de prévention et de minimisation du taux de panne.

L'approche MBR est au cœur de cette idée, elle montre comment à partir d'une estimation de risque, passant par une analyse des impacts vers une amélioration des plans préventifs de maintenance.

#### 4.4 Méthodologie de la maintenance basée sur le risque (MBR)

Khan, F.I & Haddara, M.M [Khan & Haddara, 03] décrivent une méthode pour l'amélioration des plannings de maintenance et leur mise à jour en se basant sur le niveau de risque est décrite par [Khan et al, 03]. Ils développent trois modules: estimation du risque, évaluation du risque et modification des plans de maintenance.

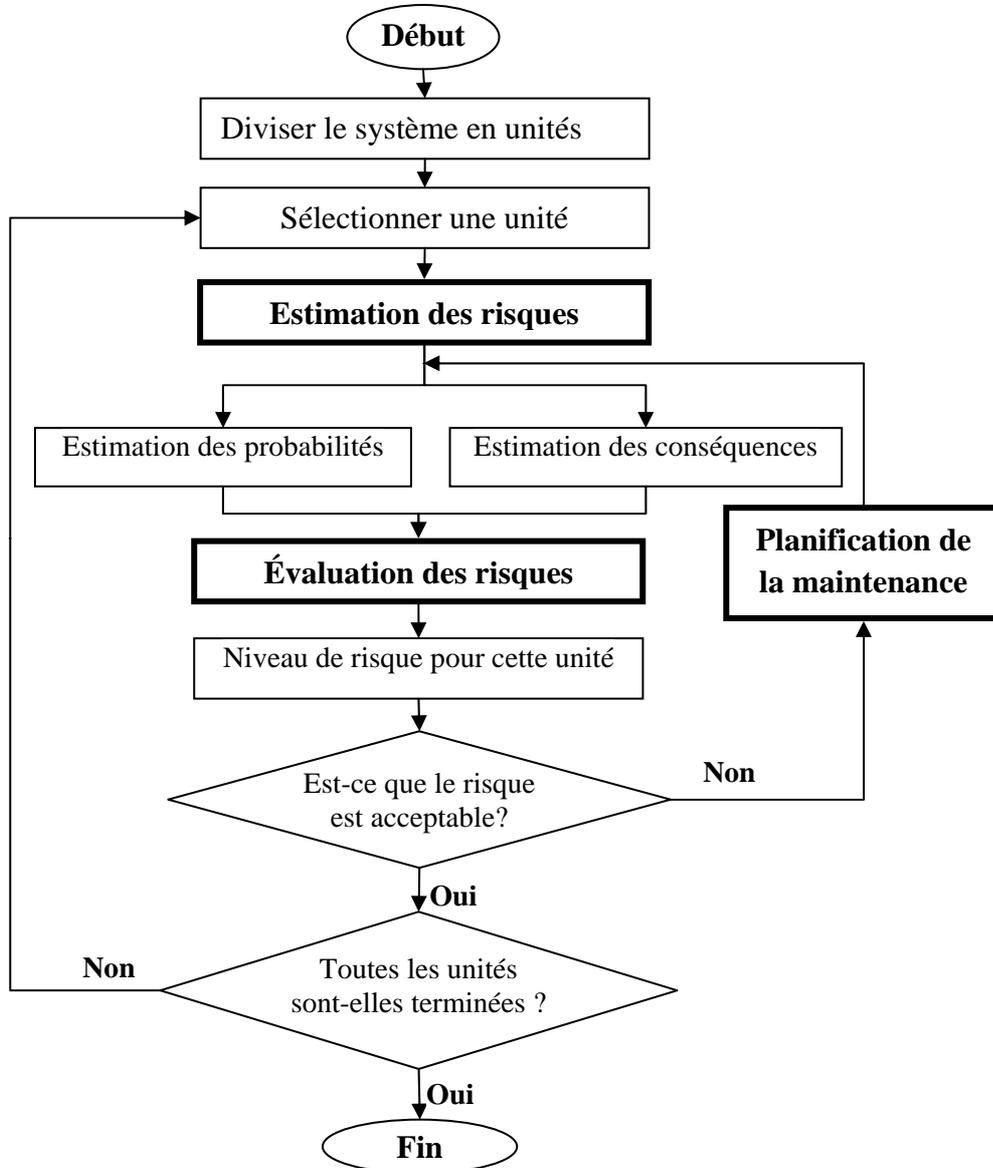


**Figure 4.2** Architecture de la méthodologie MBR [Khan & Haddara, 03]

[Arunraj et al, 07] ont réalisé une synthèse de la méthode MBR. Ils présentent les différentes étapes de la méthode et expliquent les inconvénients. Tous les modules de cette approche sont développés en montrant les facteurs pouvant impacter la qualité des analyses de risques.

L'unité est divisée en systèmes majeurs, chaque système est divisé en sous-systèmes et les composants de chaque sous-système sont identifiés. Chaque système est analysé un à la

fois jusqu'à ce que toute l'unité soit analysée. Les données requises pour analyser les scénarios potentiels de défaillance pour chaque système sont collectées. Les relations physiques, opérationnelles et logiques entre les composants sont étudiées, à partir des trois étapes décrites ci-dessous.



**Figure 4.3** Diagramme de la méthodologie MBR [Arunraj & Maiti, 07]

*a- L'estimation du risque.* Elle commence avec l'identification des événements majeurs conduisant à un scénario de défaillance. Un arbre de défaillance est utilisé pour identifier les événements de base et les trajectoires intermédiaires qui conduisent à l'événement majeur. Les données de défaillance des événements de base des sous systèmes sont utilisées pour estimer la probabilité de défaillance du sous système. Une analyse de conséquence quantifie les effets d'occurrence de chaque scénario de défaillance. Ceci est basé sur l'étude des coûts de maintenance incluant les coûts encourus à la suite d'une défaillance. À la fin, une mesure quantitative du risque est obtenue.

**b- L'évaluation du risque.** Un critère de « risque acceptable » est déterminé et utilisé pour décider si le risque estimé pour chaque scénario de défaillance est acceptable ou pas. Les scénarios de défaillance qui produisent un risque inacceptable sont utilisés pour déterminer les stratégies de maintenance pour les composants impliqués.

**c- Planification de la maintenance.** Les sous-systèmes qui ne rencontrent pas le critère de risque acceptable sont étudiés dans le but de concevoir un plan de maintenance qui va réduire le risque. Le type ainsi que l'intervalle de maintenance sont décidés à ce niveau. En modifiant l'intervalle de maintenance, les probabilités de défaillance changent. L'analyse inversée de l'arbre de défaillance permet de déterminer, les probabilités pour chaque événement de base. Les intervalles de maintenance, qui produisent ces probabilités, sont ensuite calculés.

#### 4.5 Historique d'application de la MBR

Un exemple d'optimisation de plans de maintenance d'un système HAVAC (Heating, ventilation and air-conditioning) a été présenté par [Khan, 03] montrant l'intérêt de cette approche. Mais dans cette étude l'aspect événements indésirables (pannes) n'a pas été pris en compte. Seuls les plans de maintenance sont mis à jour,

[Fujiyama et al, 04] développent une étude quantitative de MBR pour les systèmes de turbines à vapeur. Ils proposent une formulation statistique des probabilités de défaillance et une estimation des risques basée sur les arbres de défaillances. Ils intègrent l'inspection pour améliorer les fonctions de fiabilité. Deux exemples d'optimisation des plannings de maintenance sont présentés montrant l'apport de l'approche en termes de minimisation des occurrences des événements indésirables et d'optimisation des coûts de maintenance.

Dans le domaine de l'énergie, Krishnasamy, L, Khan, F. & Haddara, M [Krishnasamy et al, 05] développent une application industrielle dans l'entreprise canadienne « Hollywood power génération ». Les auteurs montrent l'intérêt de la MBR dans la minimisation des risques liés aux défaillances équipements. Ils soulignent dans leur étude l'impact positif de telles approches sur les coûts et sur les politiques de maintenance.

Dans l'industrie de la pétrochimie, [Hu et al, 09] développent une approche améliorée MBR par l'utilisation du modèle PAR. Ils montrent que dans la majorité des études utilisant la MBR, l'imperfection des actions dans les plans de maintenance n'est pas prise en compte. Ils proposent par la suite une planification de la maintenance « imparfaite » plus fréquente que les autres maintenances.

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre est dédié à une revue des travaux de recherche et des applications industrielles dans le domaine de la maintenance basée sur les risques.

Le point central de ce chapitre est l'intégration du risque dans le processus de décision de la maintenance. Notre constat était qu'une intégration du risque peut apporter des améliorations à des processus de maintenance d'un côté et la réduction des risques d'autre côté.

Après cette présentation de l'approche MBR. Nous présentons dans le chapitre qui suit l'application de cette approche dans l'industrie gazière.

# **CHAPITRE V.**

**ETUDE DE CAS :**

**APPLICATION À L'UNITÉ DE GNL (5P) DU COMPLEXE GL1K,  
SONATRACH AVAL, SKIKDA**

## 5.1 Introduction

D'après l'historique des accidents majeures, l'industrie du pétrole et du gaz reste toujours une source de danger permanente (Incendie et Explosion), et elle est l'origine de plusieurs accidents majeures catastrophiques vue la nature physico-chimique des produits traités, stockés ou transporté.

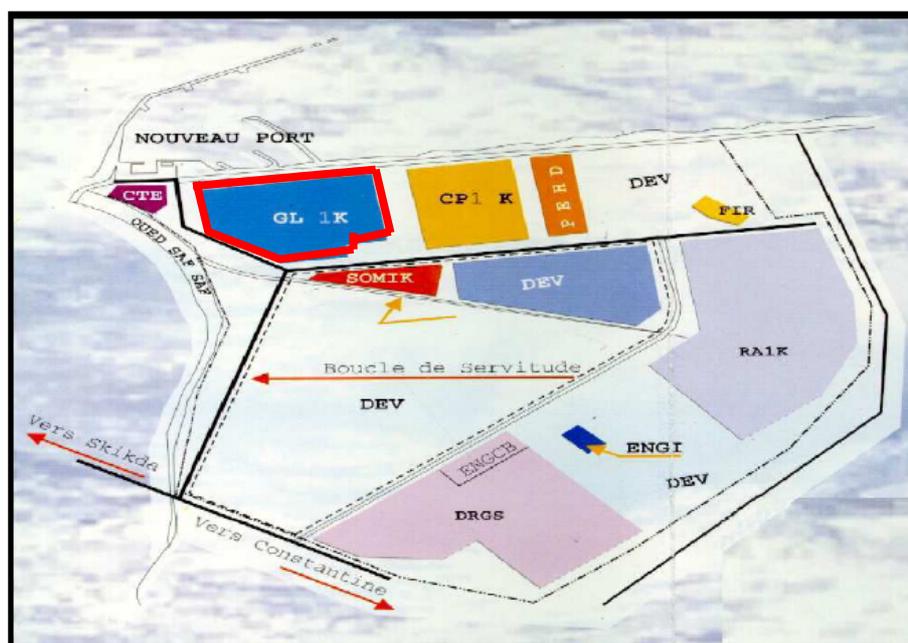
Pour cette raison et afin d'une meilleure maîtrise des accidents majeures, l'Etat impose à l'exploitant la mise en place d'un système de maîtrise et de gestion des risques et d'une organisation proportionnée aux risques inhérent aux installations industrielles, cette obligation repose sur deux principes fondamentaux : La surveillance des installations dangereuses tant que par l'exploitant ou par l'autorité publique locale et le principe de prévention par la mise en œuvre des mesures d'urgences.

Dans notre étude, nous avons choisi l'approche MBR comme outil pour l'optimisation d'un planning de maintenance et la réduction des risques du Compresseur multi composant réfrigérant MCR du Complexe GL1K.

## 5.2 Présentation du complexe GL1K

### 5.2.1 Localisation

Le complexe GL1K de liquéfaction de gaz naturel, l'un des principaux pôles d'hydrocarbures de l'Algérie, est situé à environ quatre kilomètres à l'Est de la ville de Skikda, wilaya de Skikda située au Nord-Est de l'Algérie. Il est implanté dans la zone Industrielle de Skikda située dans le Golfe de Stora. Il relève de la branche LTH (Liquéfaction et Transformation des Hydrocarbures) de l'entreprise SONATRACH.



**Figure 5.1** Situation du complexe GL1K dans la Zone Industrielle de Skikda (ZIK)

Ce complexe s'étend sur une superficie de près de 90 hectares et reçoit par le pipe GK1 HRM/Skikda de 40 pouces et d'une longueur de 580 km du gaz naturel du gisement de HASSI R'MEL.



**Figure 5.2** Vue panoramique du complexe GL1K

Le complexe comprend principalement :

- Trois (03) trains de liquéfaction de GNL (U10, U5P et L'U6P)
- Une unité GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) pour le traitement et le stockage du propane et du butane.
- Un parc de stockage (U80) : trois bacs de stockage de GNL, deux bacs de stockage de propane, un bac de stockage de butane, un bacs de gazoline.
- Une unité centrale pour la production des utilités (U50) : Vapeur, air instrument, Azote, Eau déminéralisée et distillée, Hypochlorite de soude (Eau de Javel).
- Deux centres de chargement des méthaniers (GNL, GPL)

### 5.2.2 Historique

Dans le cadre de la valorisation des ressources en gaz naturel principalement du gisement de HASSI R'MEL, des usines de GNL ont été construites dans le Nord du pays (Skikda et Arzew), dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par Méthaniers.

Les trois premières unités (10, 20 et 30) ont été construites par la société française TECHNIP selon le procédé TEAL. Ces unités dont la capacité totale est de 19 500 m<sup>3</sup>/j de GNL ont commencé à produire à partir de novembre 1972.

L'unité 40 a été construite à 85% par PRITCHARD RHODES et reprise par PULMAN KELLOGG (PK) en mars 1979. Sa capacité est de 6 000 m<sup>3</sup>/j de GNL.

Les unités 5P et 6P ont été également construites par PRITCHARD RHODES à 57% et reprises par PK en avril 1977. Ces unités dont la capacité totale est de 16 000 m<sup>3</sup>/j de GNL ont commencé à produire respectivement à partir de 1980 et 1981. L'unité GPL a été construite par la société japonaise IHI et livrée en septembre 1973.

*Remarque : Les unités 20, 30 et 40 ont été détruites lors de l'incident du 19/01/2004.*

### 5.2.3 Capacité de production

La capacité annuelle de production du complexe GL1K est de 6.94 millions de m<sup>3</sup> de Gaz Naturel Liquéfié. En plus du GNL, le complexe GL1K de Skikda produit : Ethane, Propane, Butane, Gazoline, Isobutane et Bupro.

Produits	Quantités	Clients
GNL	6.94 millions m <sup>3</sup> /an	Stockage et expéditions
Éthane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	170000 tonnes/an	Envoyé vers l'unité CP1K
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	108400 tonnes/an	Stockage et expéditions
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	92600 tonnes/an	Stockage et expéditions
Isobutane (IC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	2600 tonnes/an	Envoyé vers POLYMED
Bupro (C <sub>3+</sub> C <sub>4</sub> )	84500 tonnes/an	Envoyé vers l'unité GPL
Gazoline	60250 tonnes/an	Envoyé vers la Raffinerie de Skikda (RA1K)

**Tableau 5.1** Capacité de production du complexe GL1K

### 5.2.4 Description générale de l'activité de GL1K

Le complexe GL1K comprend les installations de réception du gaz naturel produit par les champs gaziers d'HASSI R'MEL qui se situent à 550 km au sud d'Alger.

A sa sortie du gisement de HASSI R'MEL, le gaz naturel (GN) est un mélange d'hydrocarbures dont la teneur en méthane est supérieure à 80%. Il contient également de l'éthane (C<sub>2</sub>), du propane (C<sub>3</sub>), du butane (C<sub>4</sub>), du pentane (C<sub>5</sub>) et des traces d'hydrocarbures lourds (C<sub>6+</sub>).

Le GN peut aussi contenir d'autres constituants tels que de l'hydrogène (H<sub>2</sub>), de l'azote (N<sub>2</sub>), du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), des vapeurs d'eau (H<sub>2</sub>O), ainsi que des impuretés sous forme de poussières.

Les objectifs principaux du complexe de Skikda sont de :

- traiter et liquéfier le gaz naturel, qui sera destiné à l'exportation ;
- d'extraire les sous-produits « nobles » présents dans le GN, à savoir l'éthane, le propane, le butane et le pentane.

Après traitement dans les trains de liquéfaction, le gaz liquéfié est stocké à la température d'environ  $-162^{\circ}\text{C}$  dans trois bacs cryogéniques d'une capacité totale de 196000 m<sup>3</sup> avant d'être exporté.

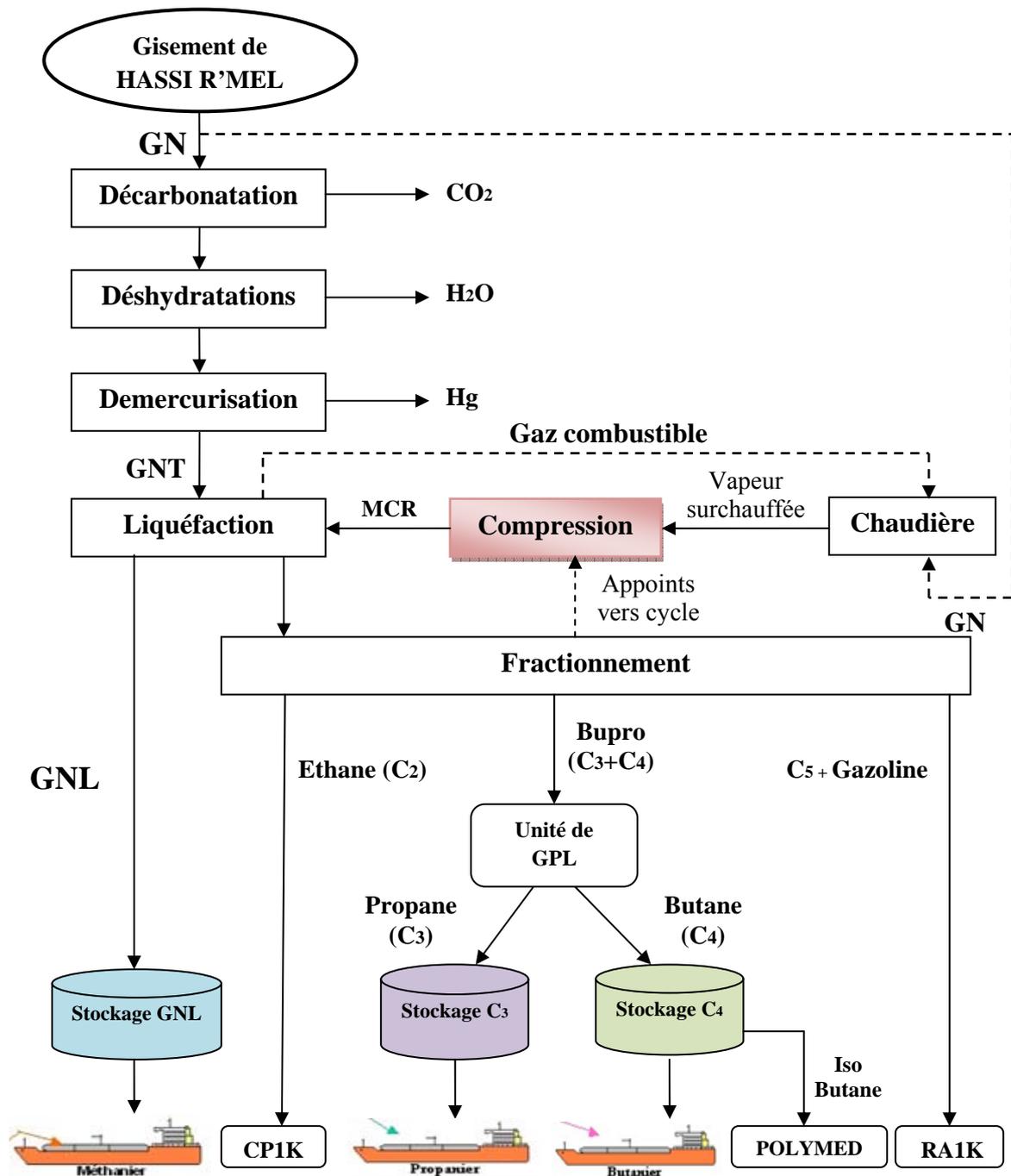


Figure 5.3 Schéma simplifié de liquéfaction

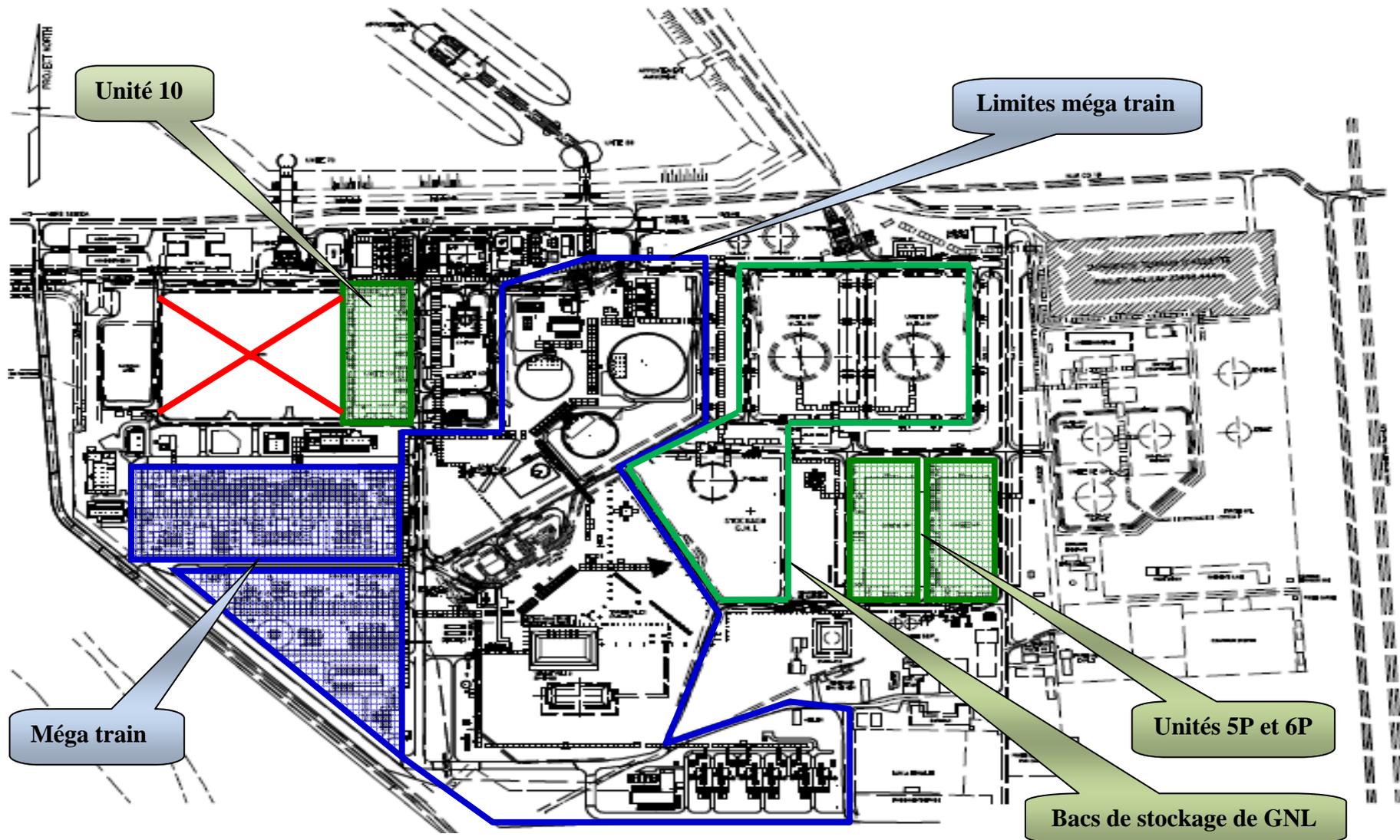


Figure 5.4 Localisation des unités de liquéfaction 10, 5P, 6P et le nouveau train (Méga train) dans le complexe GL1K

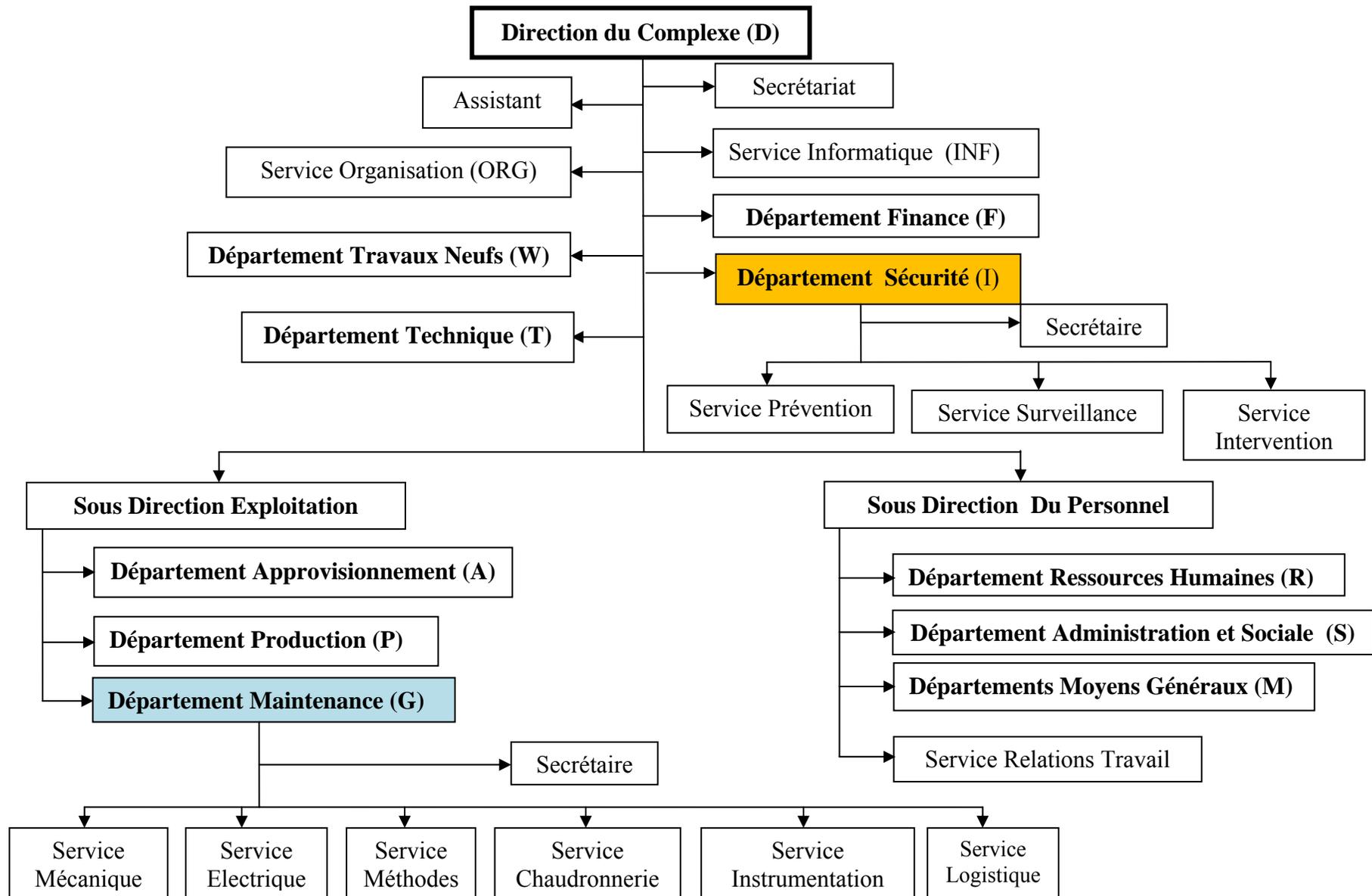


Figure 5.5 Organigramme du complexe GL1K

### 5.2.5 Localisation des risques sur le complexe GL1K

Dans le cadre de l'étude de risque et de dangers du complexe GL1K, les potentiels de risque identifiés sont des relâchements massifs à l'atmosphère de produits inflammables suite à une perte de confinement d'une unité ou d'une canalisation pouvant conduire à :

- une feu torche ;
- la formation d'un nuage de gaz inflammable ;
- un feu de nappe.

La localisation des risques est reportée sur le plan ci-après. Elle permet de visualiser les zones du complexe où, du fait des produits mis en œuvre, stockés ou des procédés exploités, des événements redoutés peuvent survenir dans certaines conditions.

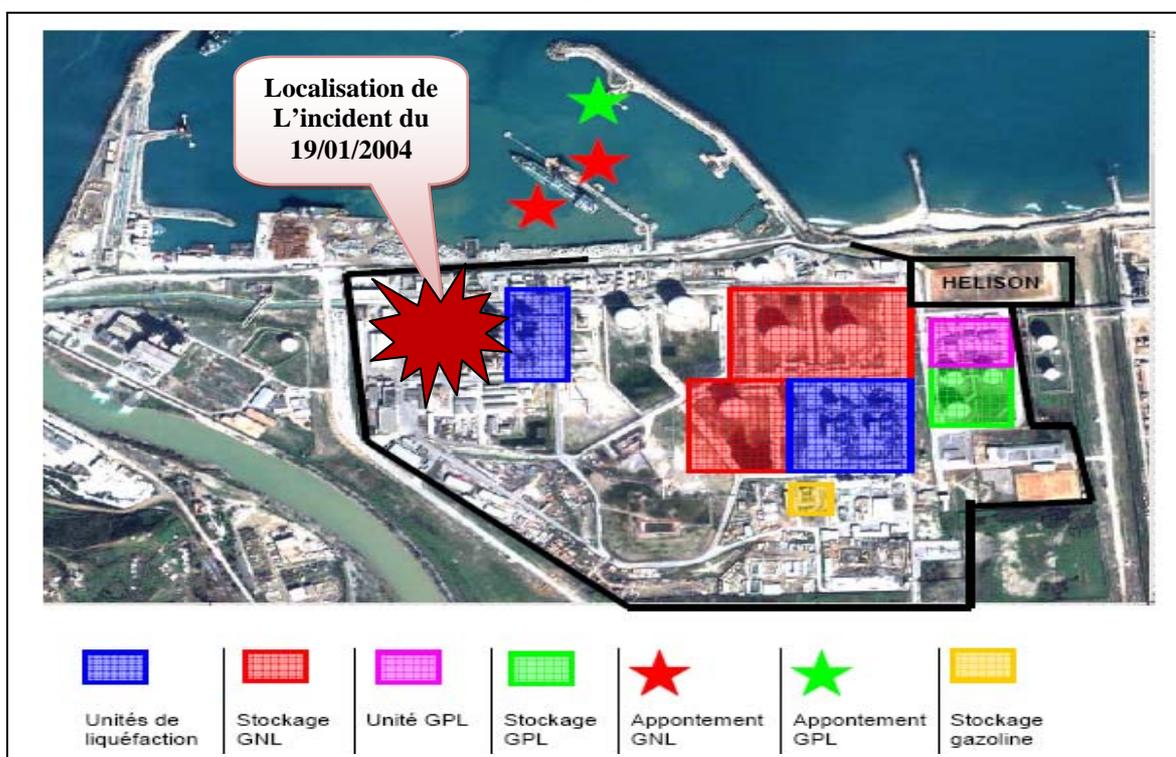


Figure 5.6 Localisation des risques sur le complexe GL1K

### 5.3 Méthodologie de travail

Les équipements de production dans l'industrie du GNL sont dotés d'innovation technologique avancée ce qui induit des coûts élevés en termes d'investissement et de maintenance.

On appliquant la méthodologie MBR sur le procédé de liquéfaction de l'unité 5P pour la réduction de risque de défaillance et de ses conséquences en matière de sécurité, économique et environnement. Notre méthodologie de travail est représentée par le diagramme suivant :

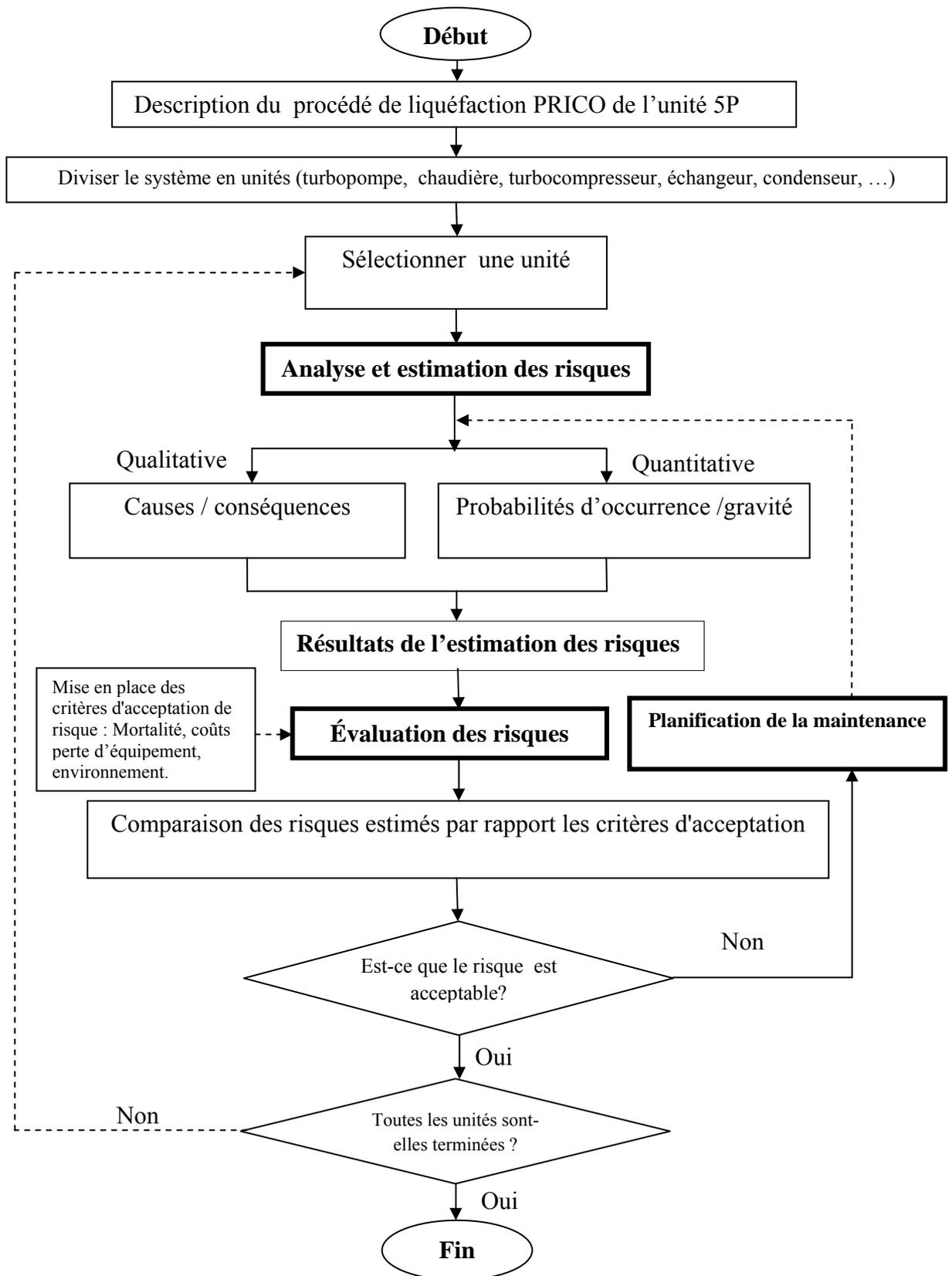


Figure 5.7 Diagramme de la méthodologie de travail

### 5.3.1 Description détaillée du procédé PRICO de l'unité 5P et 6P

Les unités 5P/6P comprennent les sections suivantes :

- Section traitement du gaz.
- Section liquéfaction.
- Section fractionnement.
- Section production de vapeur.

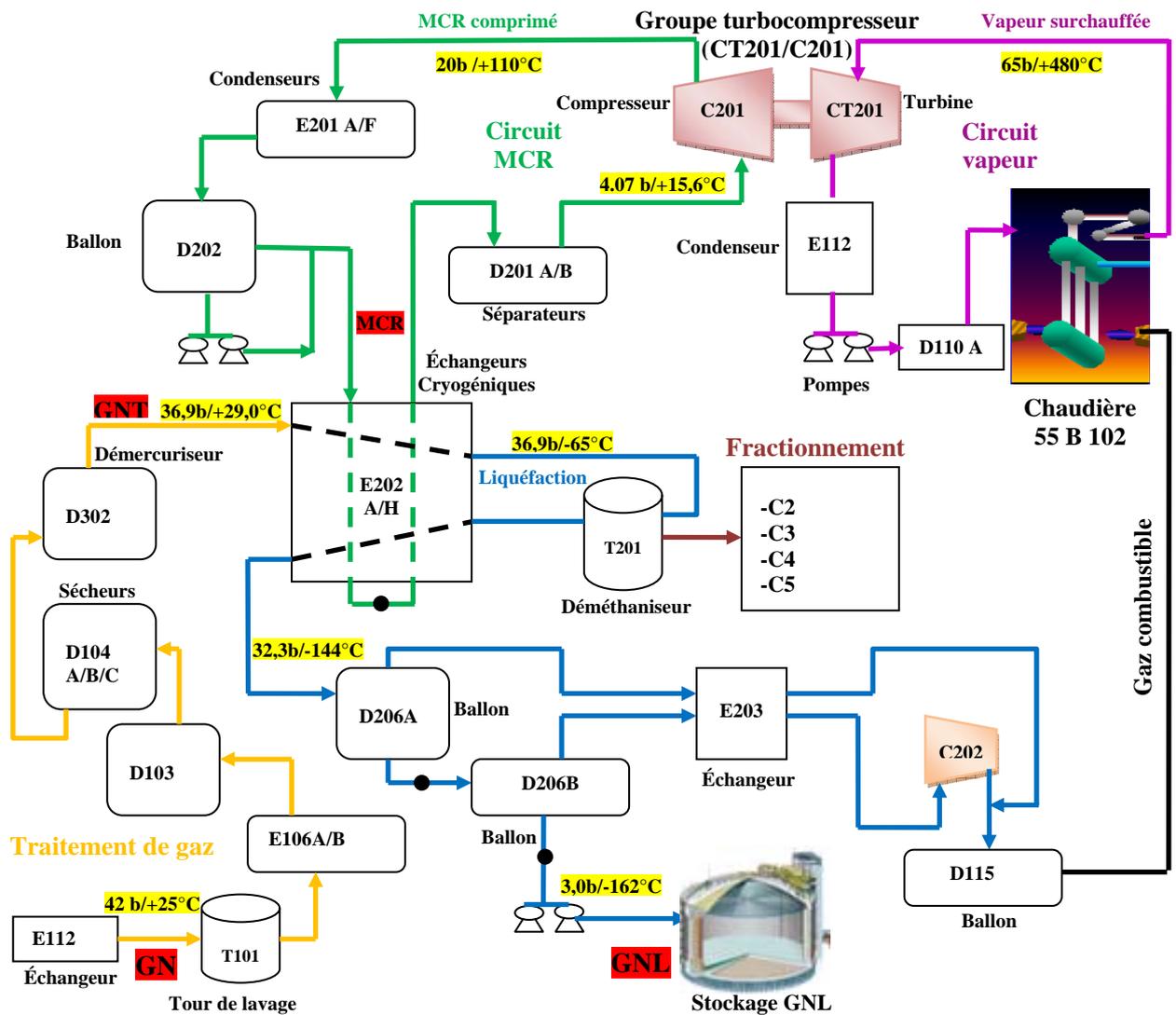


Figure 5.8 Schéma simplifié du procédé de liquéfaction PRICO des unités 5P/6P

#### 5.3.1.1 Section traitement du gaz

Le traitement du gaz naturel consiste à éliminer le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), les vapeurs d'eau (H<sub>2</sub>O) et le mercure (Hg) en 3 étapes :

**a- Décarbonatation** : cette étape est destinée à abaisser la teneur en CO<sub>2</sub> à une valeur inférieure à 100 ppm (Portion par million) par lavage (tour de lavage du GN T101) avec une solution de monoéthanolamine (MEA) selon un procédé classique

d'absorption/extraction réalisé à haute pression et à température ambiante. Les vapeurs de tête issues de la tour de lavage T101 sont ensuite dirigées vers le ballon séparateur liquide/gaz D103 après refroidissement au travers des échangeurs E106 A/B (par intégration thermique avec de l'eau de mer).  $2RNH_2 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons (RNH_3)_2CO_3 + \text{Chaleur}$

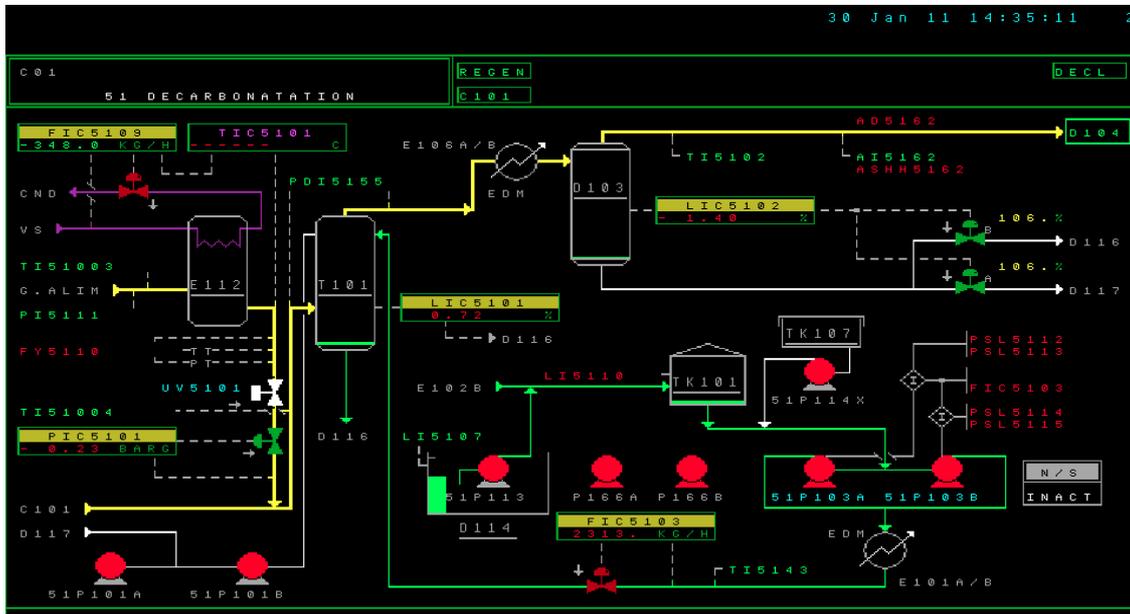


Figure 5.9 Décarbonation

**b- Déshydratation** : Après avoir été débarrassé du gaz carbonique, le gaz doit être séché (3 sècheurs D104 A/B/C) de façon à ramener la quantité d'eau qu'il contient, cette étape est destinée à abaisser la teneur en eau à une valeur inférieure à 1 ppm afin d'éviter le bouchage des équipements à basse température ;

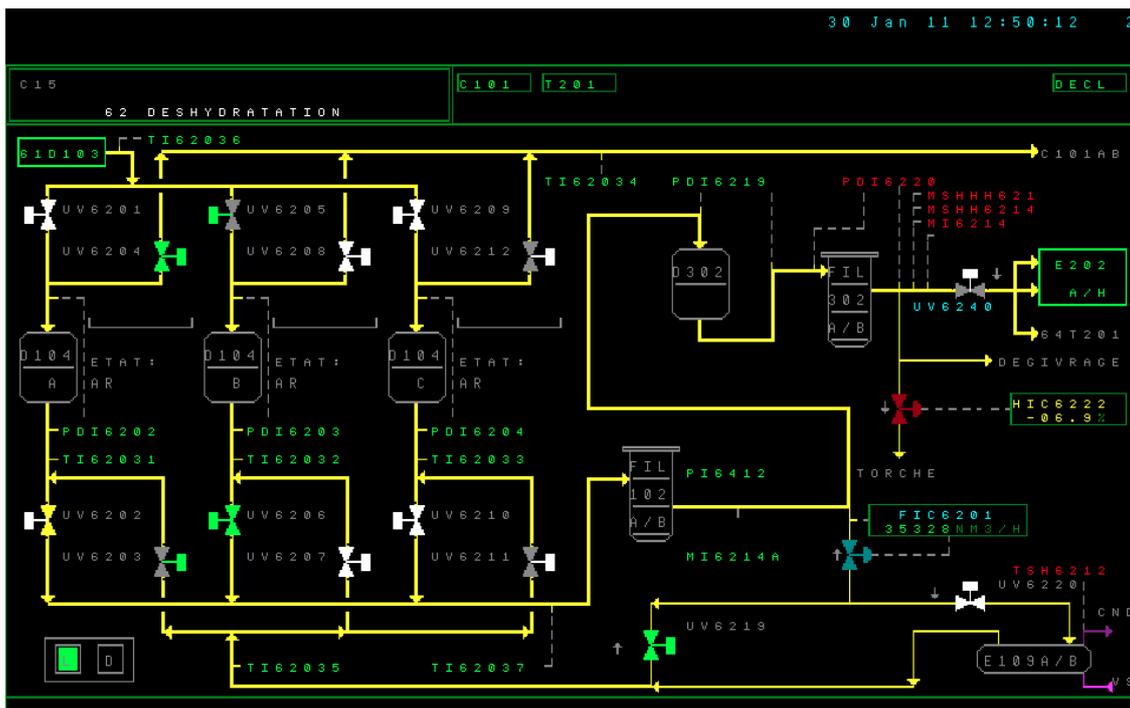


Figure 5.10 Déshydratation et Démercuration

**c- Démercurisation** : cette section est destinée à éliminer toute trace de mercure, dans le but d'éviter la formation d'amalgame mercure/aluminium dans les échangeurs à plaques (E202 A/H) de la section de liquéfaction. Cette opération de démercurisation du gaz naturel est effectuée par réaction chimique entre le mercure contenu dans le gaz et le soufre déposé sur le charbon actif présent dans le démercuriseur (D302).

### 5.3.1.2 Section liquéfaction

La section liquéfaction est constituée d'échangeurs cryogéniques à plaques (E202 A/H) regroupés dans des boîtes cryogéniques appelées « boîtes froides » et d'un compresseur à un seul corps qui assurant la compression du fluide frigorigène MCR (Mixed Component Refrigerant). Cette section assure la liquéfaction du gaz naturel traité suivant le procédé PRICO (Poly-Refrigerant-Integrant-Cycle-Operation); à son entrée, le gaz à 29°C et en sort liquide à environ -162°C pour être stocké.

**a- Circuit « GNT / GNL »** : Le Gaz Naturel Traité est d'abord refroidi à environ -65°C dans les boîtes froides E202 A-H pour être ensuite envoyé au déméthaniseur T201, qui permet la récupération des hydrocarbures lourds condensés. La phase liquide du T201 est ensuite dirigée vers la colonne de séparation d'éthane T202 de la section « Fractionnement » après passage dans le ballon tampon D228 ; La phase vapeur, en majorité du méthane, de l'éthane et des gaz inertes, retourne vers les boîtes froides E202 A/H pour un 2ème passage. Elle y est refroidie jusqu'à une température de -144°C. Le gaz naturel liquéfié (GNL) en provenance des boîtes froides subit une détente de 32 À 3,5 bar dans le ballon de flash HP D206 A.

Après avoir cédé ses frigories dans l'échangeur E203, le gaz de flash HP est envoyé, soit dans le réseau de gaz combustible pour alimenter les brûleurs de la chaudière après passage dans le ballon D115, soit vers la société HELISON, où est extrait l'hélium et l'azote, la coupe C<sub>1</sub> étant renvoyée vers le D115 ; le liquide passe dans le ballon de flash BP D206 B dans lequel le GNL subit une détente de 3.5 à 1.4 bar, provoquant une chute de la température jusqu'à -162°C. Dans le ballon de flash HP D206 B, le gaz de flash BP est repris par le compresseur C202 de gaz combustible à la pression du collecteur de gaz combustible vers le ballon D115 de la chaudière ; le GNL est repris par les pompes 208 A/B vers les bacs de stockage de l'unité 80P.

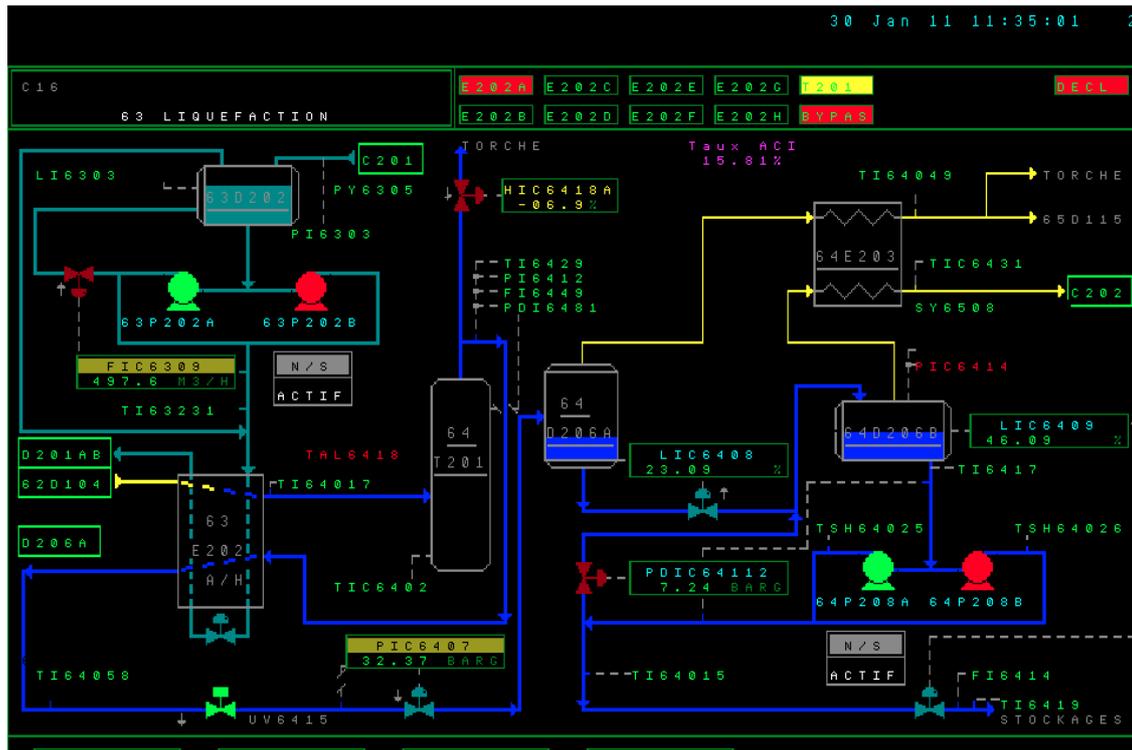


Figure 5.11 Liquéfaction

**b- Circuit « MCR » :** Le procédé PRICO utilise ainsi comme fluide frigorigène un mélange d'hydrocarbures et d'azote appelé MCR. Ce mélange est comprimé à 22 bar par le compresseur axial C201 entraîné par une turbine à vapeur (CT201). Une batterie de condenseurs utilisant l'eau de mer comme fluide de réfrigération (E201 AF) permet l'extraction d'une partie importante de la chaleur et la condensation partielle du MCR dans le ballon D202. Ce ballon joue le rôle de séparation des phases vapeur et liquide. La phase liquide est soutirée par les pompes P202 A/B tandis que la phase vapeur quitte le haut du ballon. Ces dernières sont ensuite acheminées séparément vers les boîtes froides E202 A/H, où elles sont ré-mélangées à l'entrée de chaque noyau. Le mélange obtenu, qui constitue le fluide frigorigène Haute Pression, traverse toute la longueur des échangeurs cryogéniques pour sortir en phase liquide à une température de  $-144^{\circ}\text{C}$ . Une détente à travers des vannes Joule-Thomson permet un refroidissement supplémentaire jusqu'à  $-150^{\circ}\text{C}$ .

Le produit obtenu constitue le fluide frigorigène Basse Pression. Après avoir cédé ses frigories aux circuits de gaz naturel et de fluide frigorigène Haute Pression circulant à contre courant, le fluide frigorigène Basse Pression sort des boîtes froides à une température positive (environ  $13^{\circ}\text{C}$ ). Il est ensuite aspiré par le compresseur C201 après passage au travers des séparateurs D201 A/B.

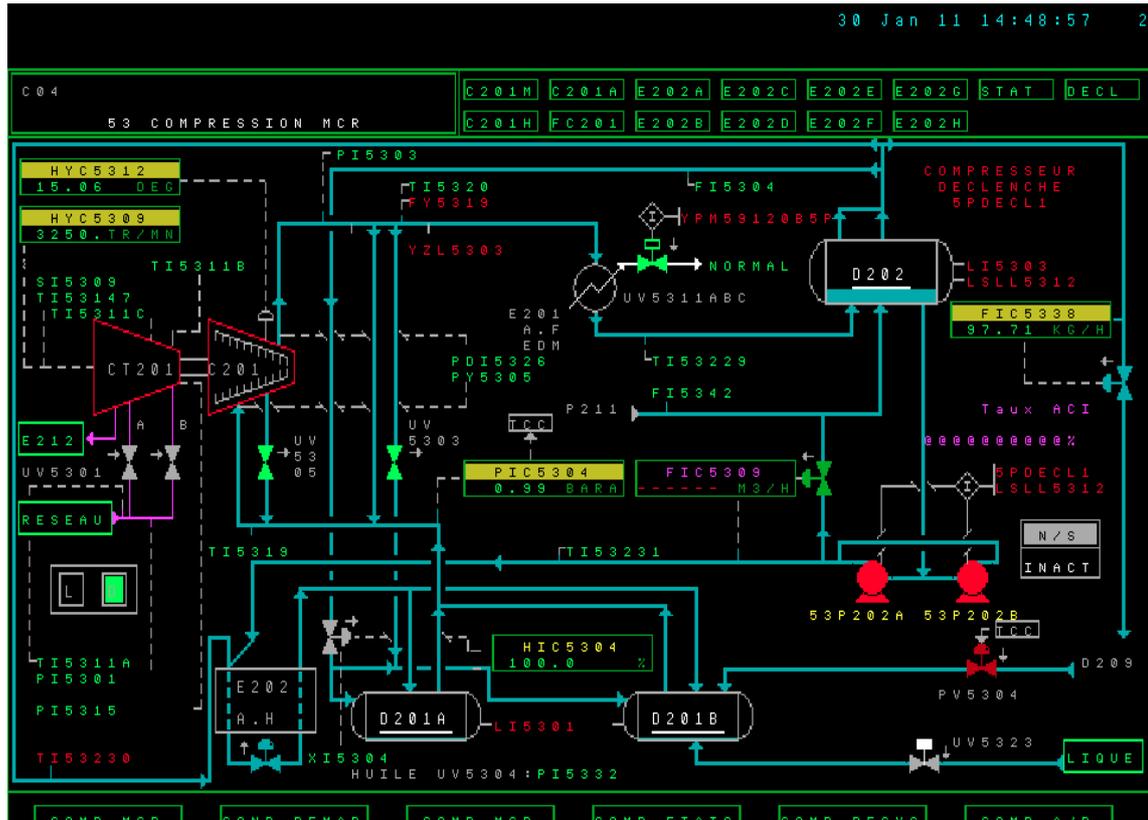


Figure 5.12 Compression MCR

### 5.3.1.3 Section fractionnement

Cette section a pour but d'extraire à partir des hydrocarbures lourds contenus dans le gaz naturel, les produits suivants :

- l'éthane à partir de la colonne de séparation T202 (dééthaniseur) ;
- le bupro (mélange de butane et de propane) et les C<sub>5</sub>+ (pentane et plus) à partir de la colonne de séparation T203 (débutaniseur). Le bupro est repris par la colonne de séparation T205 pour être séparé en propane et en butane, ces deux produits étant ensuite transférés à l'unité GPL;
- l'isopentane (iC<sub>5</sub>+) et le N-pentane (n-C<sub>5</sub>+) à partir de la colonne de séparation T104 (déisopentaniseur).

L'éthane, le propane, le butane et les C<sub>5</sub>+ sont commercialisés tandis que l'isopentane sert comme appoint dans la boucle MCR de l'unité 5P.

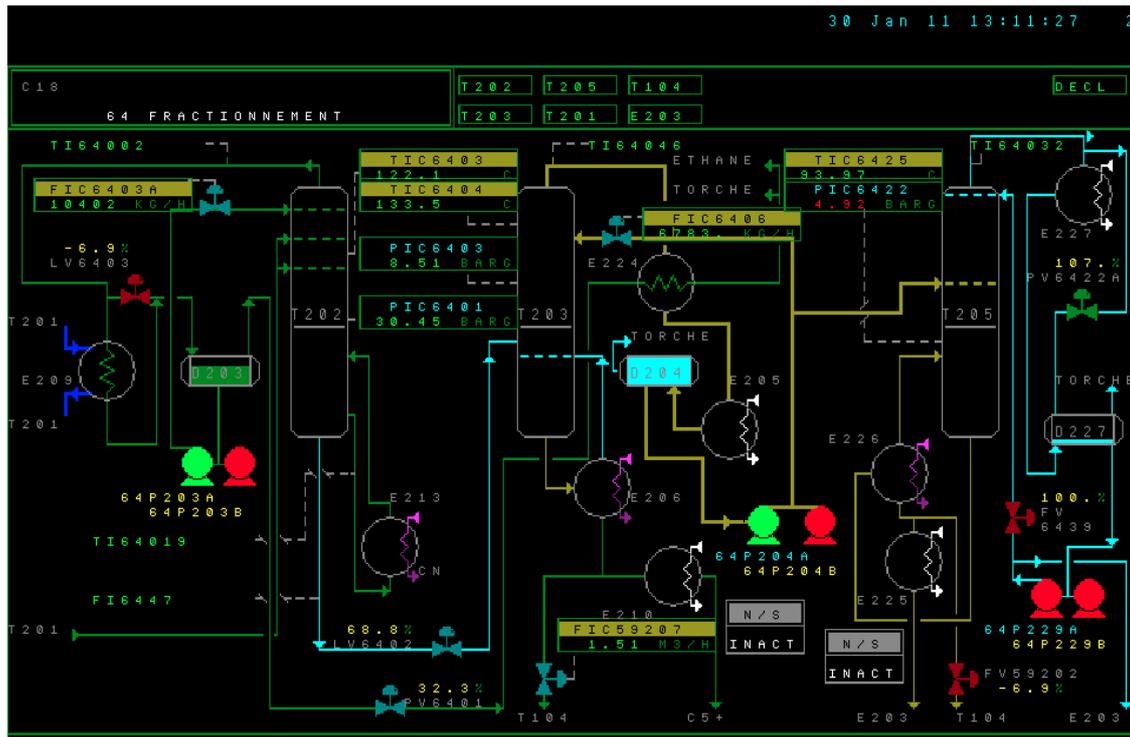


Figure 5.13 Fractionnement

#### 5.3.1.4 Section Production de vapeur

Cette section est constituée :

- d'un groupe générateur de vapeur (chaudière 55 B 102);
- d'un réseau de distribution de vapeur et de récupération des condensats ;
- d'une turbine à vapeur d'entraînement du compresseur de cycle et d'un condenseur de la turbine (E112).

La chaudière est équipée pour brûler soit du gaz combustible (fuel gas) avec un complément de gaz naturel en marche normale, soit du gaz naturel seul en cas de démarrage. Elle est chargée de vaporiser 375 tonnes/heure d'eau en marche maximum continue sous 65 bars et 490°C. Les brûleurs sont au nombre de six (trois par niveau sur deux niveaux). Chaque brûleur possède un allumeur et un détecteur de flamme.

Le turbo-ventilateur FD101 assure l'alimentation en air des brûleurs et les pompes alimentaires P110 A/B assurent l'alimentation en eau du ballon supérieur de la chaudière. L'eau d'alimentation de la chaudière provient du dégazeur D110 A à une température de 118°C. Elle passe au travers de l'économiseur E115 avant de pénétrer dans le ballon supérieur de la chaudière. La vapeur produite traverse deux surchauffeurs (basse température (SHT), haute température (SBT)) ainsi qu'au travers d'un désurchauffeur afin d'ajuster la température de sortie de la vapeur vive, situé entre les deux surchauffeurs.

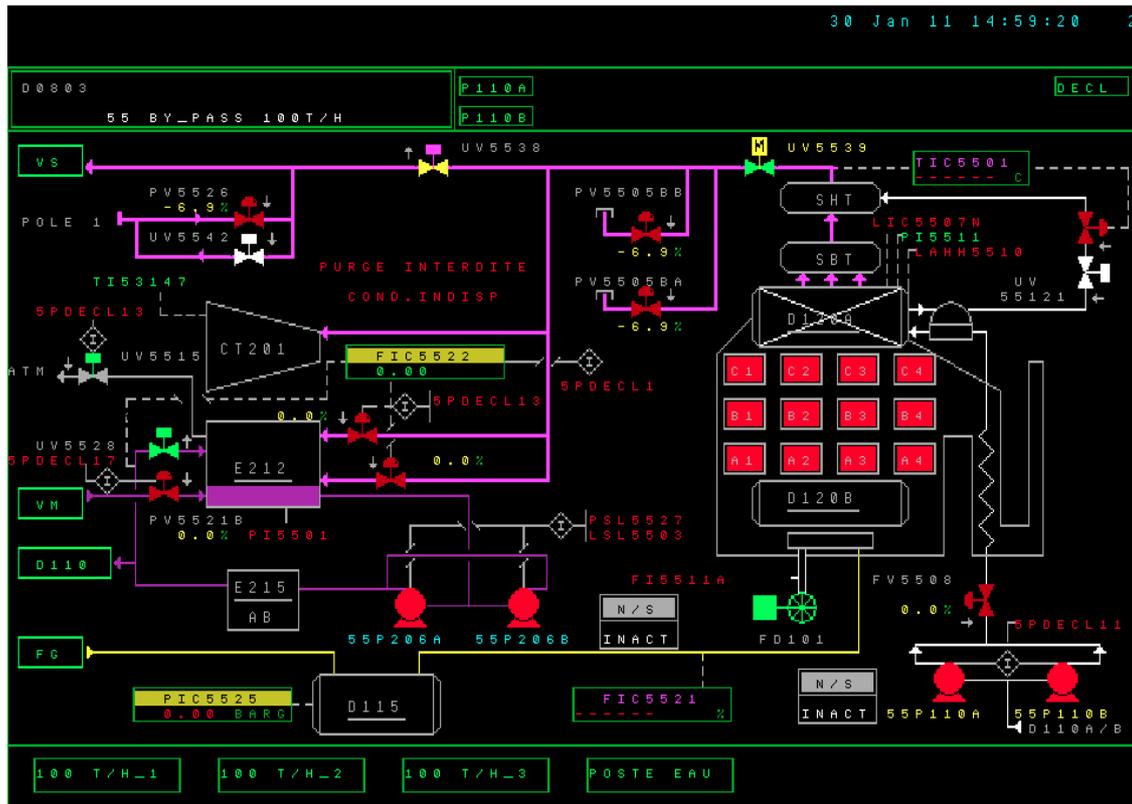


Figure 5.14 Production de vapeur

La composition chimique de GN, GNL et MCR ainsi que les paramètres de fonctionnement de l'unité 5P sont illustrés dans les tableaux ci-dessous (tableau 5.2 et tableau 5.3) respectivement.

Composition (volume en %)	GN (MP)	MCR	GNL (PF)
N2 (azote)	5,80	5.44	1,28
He (hélium)	0,19		
CO2 (anhydride carbonique)	0,21		
C1 (méthane)	<b>83,00</b>	25.53	<b>92,63</b>
C2 (éthane)	7,10	30.54	5,30
C3 (propane)	2,25	15.85	0,56
Ic4 (isobutane)	1,00	6.14	0,23
Ic5 (isopentane)		16.50	
nc4 (normal butane)			
C5+ (pentanes...)	0,45		
H2O (ppm)	38		
Mg (mercure)	Négligeable		

Tableau 5.2 La composition chimique de GN, GNL et MCR

La section	Paramètre	Entrée	Sortie
<b>Traitement de gaz Décarbonatation</b>	Pression (bars)	41,5	40,6
	Température (°C)	+38,0	+35,0
	Débit (kg/h)	170728	170163
<b>Traitement de gaz Déshydratation</b>	Pression (bars)	40,6	38,8
	Température (°C)	+35,0	+35,0
	Débit (kg/h)	170163	169897
<b>Traitement de gaz Démercurisation</b>	Pression (bars)	38,8	35,0
	Température (°C)	+35,0	+39,2
	Débit (kg/h)	169897	169897
<b>Liquéfaction</b>	<b>Pression (bars)</b>	<b>36,9</b>	<b>3,0</b>
	<b>Température (°C)</b>	<b>+29,0</b>	<b>-162</b>
	<b>Débit (kg/h)</b>	<b>169897</b>	<b>124417</b>
		<b>Fond</b>	<b>Tête</b>
<b>Fractionnement - Dééthanisation 14C01</b>	Pression (bars)	17,3	11,0
	Température (°C)	+63,0	12,0
	Débit (kg/h)	24665	17071
<b>Fractionnement - Dépentanisation 14C02</b>	Pression (bars)	8,1	39,0
	Température (°C)	+134,7	+30,0
	Débit (kg/h)	17071	13 566

**Tableau 5.3** Les paramètres de fonctionnement de l'unité 5P

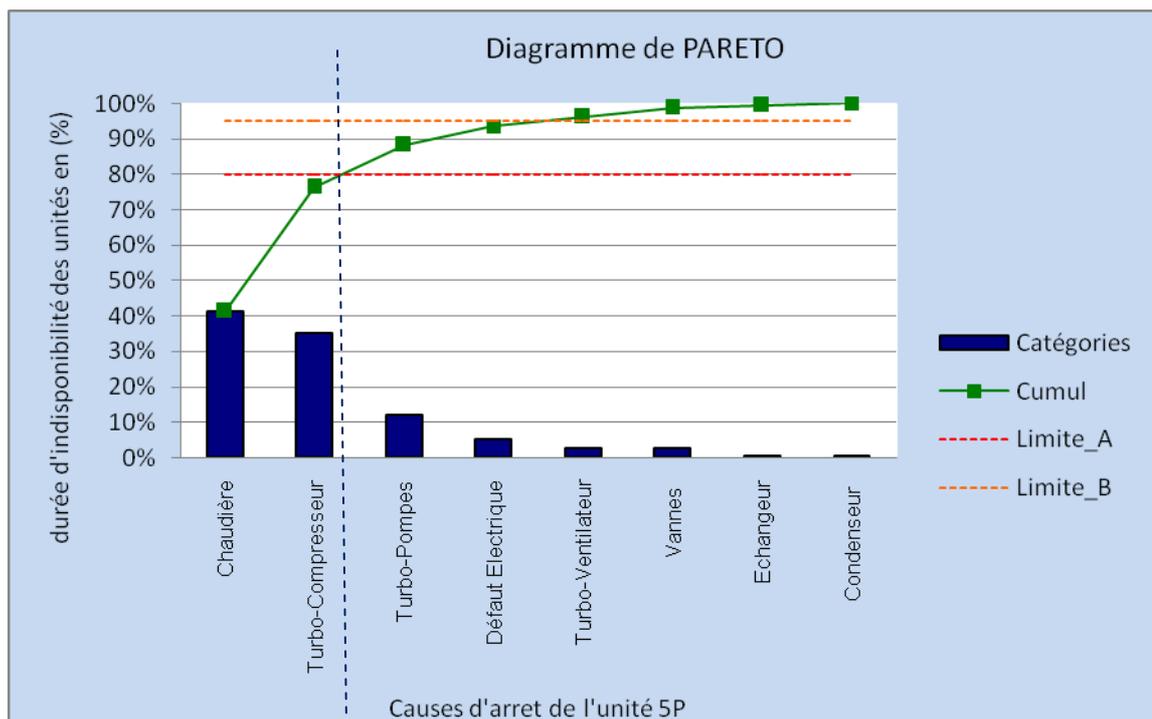
### 5.3.2 Choix de l'équipement de notre application

D'après l'historique de maintenance, la feuille 'Collecte' liste les causes d'arrêt pour l'unité de liquéfaction de gaz naturel 5P. Un nombre d'heures d'indisponibilité des équipements, mesuré sur trois ans (Du 01/01/2007 au 31/12/2009), est associé à chaque catégorie.

Collecte des donnés			Calculs			Limite (ABC) de Pareto	
N	Unité	DI de l'unité (H)	Pourcentage (%)	Cumul (H)	Cumul (%)	Limite A (%)	Limite B (%)
1	Chaudière	1517,21	41	1517,21	41	80	95
2	Turbocompresseur	1282,24	35	2799,45	76	80	95
3	Turbopompes	436,32	12	3235,77	88	80	95
4	Défaut Electrique	194,27	5	3430,04	94	80	95
5	Turboventilateur	96,39	3	3526,43	96	80	95
6	Vannes	93,32	3	3619,75	99	80	95
7	Echangeurs	25,05	1	3644,8	99	80	95
8	Condenseurs	19,12	1	3663,92	100	80	95

**Tableau 5.4** Calcul selon la méthode de Pareto

L'objectif final est d'identifier les causes principales d'arrêt de l'unité 5P par un diagramme de PARETO et de savoir sur quelles catégories agir en priorité (voir figure 5.15).



**Figure 5.15** Diagramme de Pareto pour les causes d'arrêt d'unité 5P

### Interprétation des résultats

En analysant les données fournies sur diagramme de Pareto pour l'unité 5P, l'histogramme représente les données classées par ordre d'importance décroissant. Il permet de se concentrer sur les équipements qui auront le plus grand effet (80% des effets) qui sont :

1. La chaudière
2. Le turbocompresseur

Néanmoins compte tenu des informations reçues par les responsables de l'unité à savoir l'élimination complète de la chaudière. Ce qui nous a amené au deuxième équipement qui est le turbocompresseur.

### **5.3.3 Analyse et estimation des risques du groupe turbocompresseur**

#### ***a- Description du groupe turbocompresseur***

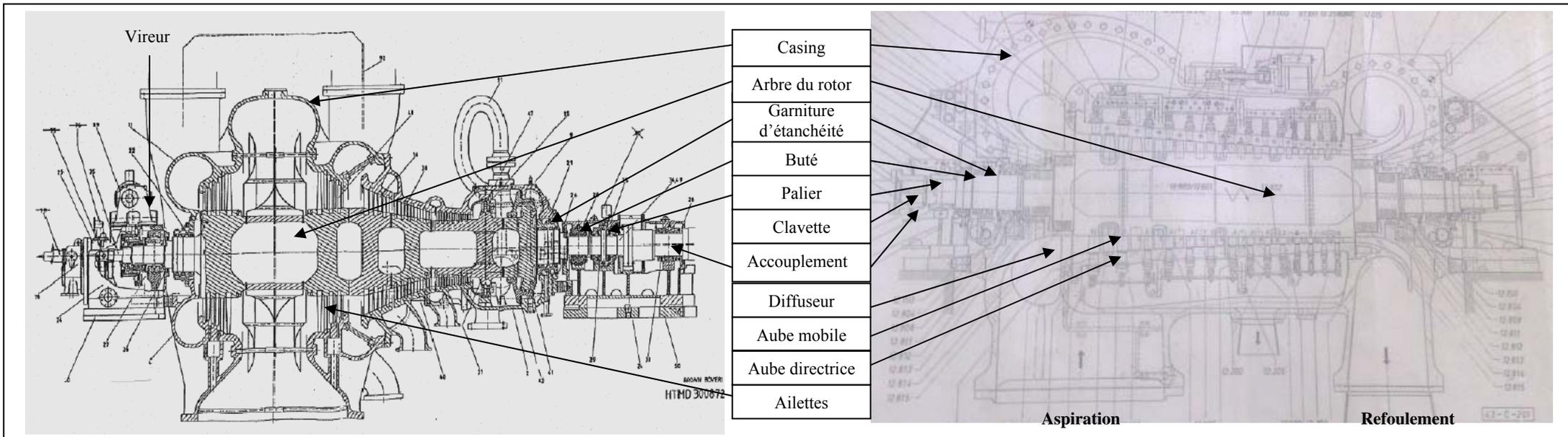
Dans la chaîne de liquéfaction le rôle du groupe turbocompresseur à cycle est de comprimer le fluide frigorigène MCR, qui est un mélange d'hydrocarbures qui sera refroidi et reliquéfié dans des échangeurs de chaleur.

L'ensemble du turbocompresseur à cycle est constitué :

***D'un compresseur axial (53C201)*** muni d'un aubage variable (ZT5312), d'une vanne de recyclage intermédiaire (UV5305), d'une vanne by-pass chaud (UV5303) et d'une vanne anti pompage régulée (UV5304) qui assure la protection du compresseur contre les retours de flux. L'étanchéité du compresseur est faite par le réglage d'une pression différentielle huile/gaz (barrage d'huile) (étanchéité dynamique) ou lorsque le groupe est à l'arrêt, par des pistons (étanchéité statique).

***D'une turbine à vapeur à condensation (53CT201)*** qui produit l'énergie nécessaire au compresseur. L'admission en vapeur est régulée par quatre soupapes hydrauliques (PCV5320A/B/C/D). L'étanchéité de la turbine est réalisée par un système de barrage de vapeur.

Le groupe turbocompresseur à cycle possède les auxiliaires suivantes : *Une centrale d'huile* pour le graissage et la régulation et une autre pour l'étanchéité du compresseur.



Repère	53/63 CT 201
Puissance	88 MW
Déclenchement de survitesse	3597 tr /mn
Consommation de vapeur nominale	294 500 kg/h
Vitesse de service	3430 tr/mn
Pression normale	66.7 bars
Température normale	480° C
Vide normal	0.150 bars abs

**Turbine CT 201**

Repère	53/63 C 201
Puissance	76000 kW
Conditions d'aspiration	4.07 bars et 15,6°C
Conditions de refolement	20.4 bars et 103°C
Vitesse de service	3430 tr/mn
Pression d'équilibre	25.1 bars
Débit garanti	31407 kg/mn
Nombre d'étage	13

**Compresseur C 201**

**Figure 5.16** Fiche technique du groupe turbocompresseur CT 201 / C 201

### 5.3.3.1 Analyse qualitative

L'application de la méthode d'analyse des risques HAZOP permet tout d'abord de mettre en évidence des dérives de fonctionnement pouvant conduire à des situations dangereuses pour le Groupe turbocompresseur et ces impacts sur toutes les installations de l'unité de liquéfaction de GN 5P.

Considérant de manière systématique les dérives des paramètres d'un GTC en vue d'en identifier les causes et les conséquences, cette méthode est particulièrement utile pour l'examen du GTC, pour lesquels des paramètres comme le débit, la température, la pression, le niveau,... sont particulièrement importants pour la sécurité du GTC.

L'intérêt de l'application de cette méthode et qu'elle fournit une étude de base permettant de recenser les différentes causes et conséquence des scénarios d'accidents. Elle permet aussi d'envisager les différentes barrières de sécurité peuvent empêcher ces accidents.

Les Tableaux présentés ci-après regroupent, pour chaque élément du système, les résultats obtenus à l'issue de la session de travail HAZOP.

<b>HAZOP : GL1K</b>	<b>Description : Circuit MCR, Circuit vapeur – Groupe turbocompresseur CT201/ C201</b>
<b>Unité : 5P</b>	<b>Groupe de travail : (SAKHRI + HSE + Production), SONATRACH Aval, SKIKDA</b>
<b>Section : 53-01a</b>	<b>Date :</b>

Déviation		Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Commentaire
Paramètre	Mot-clé						
<b>Débit</b>	<b>Plus de</b>	Plus de débit de GNT	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). -Surveillance vibratoire (SULZER)		-Risque de dégradation mécanique -Risque de fuite de garniture -Passage de gaz (MCR) vers la caisse à huile puis à l'atmosphère par évent -Formation d'un nuage de gaz inflammable
		Plus de débit vapeur sur la turbine	-Défaillance de la turbine 53-CT-201, survitesse, encrassement des ailettes -Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-La commande des soupapes d'admission vapeur (DIGIREC) -Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)	-Programme d'étalonnage périodique des capteurs de débit avec mise à jour	
		Ouverture intempestive de vannes Joule Thomson (en inadéquation avec le débit de production)	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
		Appoint excessif de MCR gazeux (méthane, éthane)	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
	<b>Moins de</b>	Moins de débit de GNT	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
		Moins de débit vapeur sur la turbine	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-La commande des soupapes d'admission vapeur (DIGIREC) -Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
	<b>Pas de</b>	Fermeture intempestive des vannes Joule Thomson	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
		Engorgement des vannes	-Perturbation de la production. -Risque de pompage du compresseur. -Vibrations	informations reçues du D.C.S	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
		Arrêt de la chaudière	-Arrêt de l'unité 5P	alarmes au D.C.S	-Automate programmable de sécurité de la chaudière BMS (Burner Management System)		

Déviation		Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Commentaire
Paramètre	Mot-clé						
Pression	Plus de (aspiration compresseur)	-Présence de produits légers dans la boucle MCR (méthane, azote, éthane)	-Perturbation de la production	-Alarme DCS de pression haute à l'aspiration du compresseur (PSL 5305)			
		-Moins de liquide sur les vannes Joule Thomson	-Perturbation de la production	informations reçues du D.C.S			
		-Défaillance du régulateur de pression du circuit d'appoint (vanne de régulation PV5312 restée bloquée ouverte)	-Perturbation de la production		-intervention maintenance conditionnelle	Surveillance permanente et fiabilisation des instruments et les contrôleurs	
	Plus de (Refoulement compresseur)	-Plus de pression aspiration	-Endommagement du compresseur -Eclatement du compresseur	-Alarme DCS de pression haute au refoulement du compresseur (PSH5303)	-l'ouverture automatique de la vanne UV5303 X (équilibre de la pression à l'aspiration et au refoulement du compresseur)		-Explosion -Effets thermiques, surpression sur l'homme et les installations
		-Fermeture ou engorgement des vannes Joule Thomson	-Endommagement du compresseur -Eclatement du compresseur	-Alarme DCS de pression haute au refoulement du compresseur (PSH5303)	- l'ouverture automatique de la vanne UV5303 X (équilibre de la pression à l'aspiration et au refoulement du compresseur)		
	Plus de (Ballon supérieur 55-D-120Ax)	-Excès de chauffe : défaillance de FIC-5521 ou problème PCI	-Risque d'éclatement de capacité Brûlure, effet missile	-Alarme DCS	PIC-5505 ouvre PV-5505A/B vers événement (soupapes électriques)		
	Moins de (Refoulement compresseur)	-Moins de pression aspiration	-Perturbation de la production -pompage du compresseur -Vibrations	-Alarme DCS	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		-Risque de dégradation mécanique -Risque de fuite de garniture -Passage de gaz (MCR) vers la caisse à huile puis à l'atmosphère par événement -Formation d'un nuage de gaz inflammable
	Moins de (aspiration compresseur)	-Moins de / pas de débit MCR	-Perturbation de la production -pompage du compresseur -Vibrations	-Alarme DCS	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique (ouverture de la vanne UV304). (DIGIREC) -surveillance vibratoire (SULZER)		
		-Défaillance de la régulation de pression d'aspiration du compresseur (vanne de régulation PV5304 bloquée fermée)	-Perturbation de la production -pompage du compresseur -Vibrations	-Alarme DCS	-intervention maintenance conditionnelle -surveillance vibratoire (SULZER)	Surveillance permanente et fiabilisation des instruments et les contrôleurs	
		-Mauvaise composition la boucle MCR	-Perturbation de la production -pompage du compresseur -Vibrations	-Alarme DCS	-Régulation anti-pompage par le Convertisseur Electro-Hydraulique		

Déviation		Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Commentaire
Paramètre	Mot-clé						
Température	Haute (aspiration)	Montée en pression à l'aspiration du compresseur	Surcharge de la chaudière B102	-alarmes au DCS.	-Automate programmable de sécurité de la chaudière BMS (Burner Management System)		Risque chaudière
	Haute (refoulement)	Montée en pression au refoulement du compresseur	Endommagement du compresseur, fuite sur garnitures du compresseur	-alarmes au DCS.	-TSH5308 (Température haute refoulement compresseur) qui entraîne l'arrêt automatique du compresseur		
	Basse (aspiration)	Refroidissement excessif du MCR au niveau des échangeurs cryogéniques E202 A-F	Montée en niveau dans les D201 A/B, envoi de liquide à l'aspiration du compresseur Endommagement du compresseur	-alarmes au DCS.	-Alarme de niveau très haut dans le D201 B (LAHH5302) + action opérateur -LSHH5340 entraînant l'arrêt automatique du compresseur -TSL5309 (Température basse aspiration compresseur) qui entraîne l'arrêt automatique du compresseur		
	Basse (refoulement)	Température haute aspiration		-alarmes au DCS.			
Opération	Démarrage	Vibrations lors du redémarrage du compresseur suite à un mauvais alignement de l'arbre après une opération de maintenance	Rupture de l'accouplement, éjection d'une pièce mécanique	-Détection à proximité -Rondes opérateur	-Armoire automate Télémécanique (TSX 67 425) -Maintenance -Essais avant démarrage	Formation en continu des opérateurs, recyclage	
		Erreur opératoire : Non respect de la procédure de démarrage du compresseur	Vibrations, endommagement de la turbine		Armoire automate Télémécanique (TSX 67 425) -Maintenance -Essais avant démarrage		
	Arrêt	Erreur opératoire : Non respect de la procédure d'arrêt du turbocompresseur	Endommagement de l'arbre (fléchissement)				
	Purge	Erreur opératoire : vanne de purge laissée ouverte	Fuite MCR	-Détection à proximité -Rondes opérateur		Présence fréquente de l'opérateur (agent d'intervention)	-Formation d'un nuage de gaz inflammable -Fuite d'huile (Risque d'épandage d'huile sur conduite vapeur chaude) Inflammation de l'huile (feu)

Déviation		Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Commentaire
Paramètre	Mot-clé						
Niveau	<b>Plus de (Ballon supérieur 55-D-120Ax (ballon de vapeur)</b>	-Défaillance du régulateur de niveau LIC-5507X, - Ouvre grand FV-5508	-Risque d'envoi d'eau liquide vers réseau vapeur et vers utilisateurs (turbine) -Vibrations et dégradation de la turbine	alarmes au DCS. LAHH-5510 Alarme (niveau très haut de ballon)	-LAHH-5510 Alarme (niveau très haut de ballon) + SD chaudière -Purgeur sur collecteur vapeur TC-5501X régule TV-5501A/BX (arrêt désurchauffe)		-Risque d'endommagement de la turbine
	<b>Plus de (Ballon d'aspiration MCR : 53-D-201A/B)</b>	Défaillance du régulateur de niveau LSH-5301 (défaillance pompe 53-P-211)	-Augmentation de niveau dans le ballon d'aspiration. -Aspiration de liquide dans le compresseur MCR. -Vibrations et dégradation du compresseur	alarmes au DCS.	-LAHH-5302 alarme (niveau très haut de ballon) + action opérateur LAHH-5340 alarme + SD compresseur -Mesures vibrations XAH-5312x/5313x/5314x/5315x/5317x entraînant déclenchement		-Risque d'endommagement du compresseur
	<b>Plus de (Ballon de MCR : 53-D-202)</b>	-Sortie bloquée -Défaillance de la pompe 53-P-202	Pas de débordement possible du HPR liquide car ballon dimensionné pour l'inventaire de la boucle Perte de l'alimentation HPR liquide du 53-E-202	alarmes au DCS.	LAH-5303 (niveau très haut de ballon) alarme + action opérateur		
	<b>Moins de (Ballon supérieur 55-D-120Ax (ballon de vapeur)</b>	-Perte d'alimentation -Défaillance du régulateur de niveau LIC-5507X, -ferme FV-5508	Perte de liquide dans les tubes Surchauffe des tubes vides Fusion des tubes au niveau de la chambre de combustion	alarmes au DCS.	LALL-5510 Alarme (niveau très haut de ballon) + SD chaudières TI-5500 (14 à 25) sur tubes + action opérateur		-Risque de brûlure de la chaudière -Explosion dans chambre de combustion lors du rallumage
	<b>Moins de (Ballon de MCR : 53-D-202)</b>	-Perte d'alimentation -Défaut de condensation HPR	Envoi de gaz dans le ballon 53-D-202 Perte de niveau risque de cavitation des pompes Fuite de gaz au niveau des garnitures	alarmes au DCS.	LAL-5303 alarme (niveau très haut de ballon) + action opérateur FIC-5309 ouvre FV-5309 (mini flow) LALL-5312 alarme + SD pompe		-Formation d'un nuage de gaz inflammable -Risque d'explosion

Tableau 5.5 Feuille présentation HAZOP

---

On représentant les résultats des risques obtenus par la déviation des paramètres de fonctionnement (l'analyse HAZOP) :

- Risque de fuite de garniture et formation d'un nuage de gaz inflammable (MCR) ;
- Fuite d'huile (Risque d'épandage d'huile sur conduite vapeur chaude, feu) ;
- Explosion dans chambre de combustion de la chaudière lors du rallumage;
- Risque d'explosion (chaudière, compresseur);
- Risque de dégradation mécanique ;
- Risque de brûlure de la chaudière;
- Risque d'endommagement du compresseur;
- Risque d'endommagement de la turbine;
- Effets thermiques, surpression sur l'homme et les Installations;
- Passage de gaz (MCR) vers la caisse à huile puis à l'atmosphère par événement.

La méthode HAZOP a permis de mettre en évidence un certain nombre de risques et d'améliorer certaines dispositions pour la conduite en sécurité du GTC en fonctionnement normal. Mais pour certaines situations, les conséquences n'ont pas été identifiées. Il est donc utile de passer par une phase de simulation pour tenter de trouver des conditions opératoires permettant une conduite sécurisée de la machine parmi les logiciels de simulation « *STEAMER* ».

### Simulation des paramètres niveau ballon, débit d'eau et débit vapeur

La régulation de niveau a pour but de maintenir le plan d'eau du ballon supérieur de la chaudière à une position prédéterminée quelle que soit la demande de vapeur en maîtrisant les phénomènes de gonflement et de tassement qui apparaissent avec les variations de la charge.

#### a- Concepts et caractéristiques du régulateur STEAMER

STEAMER est un programme destiné à introduire aux bases de ce qu'on appelle en français la régulation et en anglais (process control). Cette discipline tire ses racines historiques du développement de la marine à vapeur, d'où le choix de ce nom.

Le dessin de la fenêtre gauche s'appelle un Plan de Circulation des fluides (PCF). Il représente un générateur de vapeur alimentant une turbine ; la vapeur est ensuite condensée puis recyclée. Ce schéma de principe est commun aux moteurs de gros navires et aux centrales électriques, thermiques ou nucléaires, et toutes les installations qui utilisent la turbine à vapeur.

On se propose dans ce programme de réguler le niveau d'eau dans la cuve. La valeur désirée s'appelle la consigne, au début du programme elle est fixée à 50%,

Dire qu'on régule une grandeur suppose qu'elle soit susceptible de varier avec des perturbations. Ici la perturbation principale sera le débit de vapeur envoyé à la turbine : si ce débit varie le niveau de liquide varie.

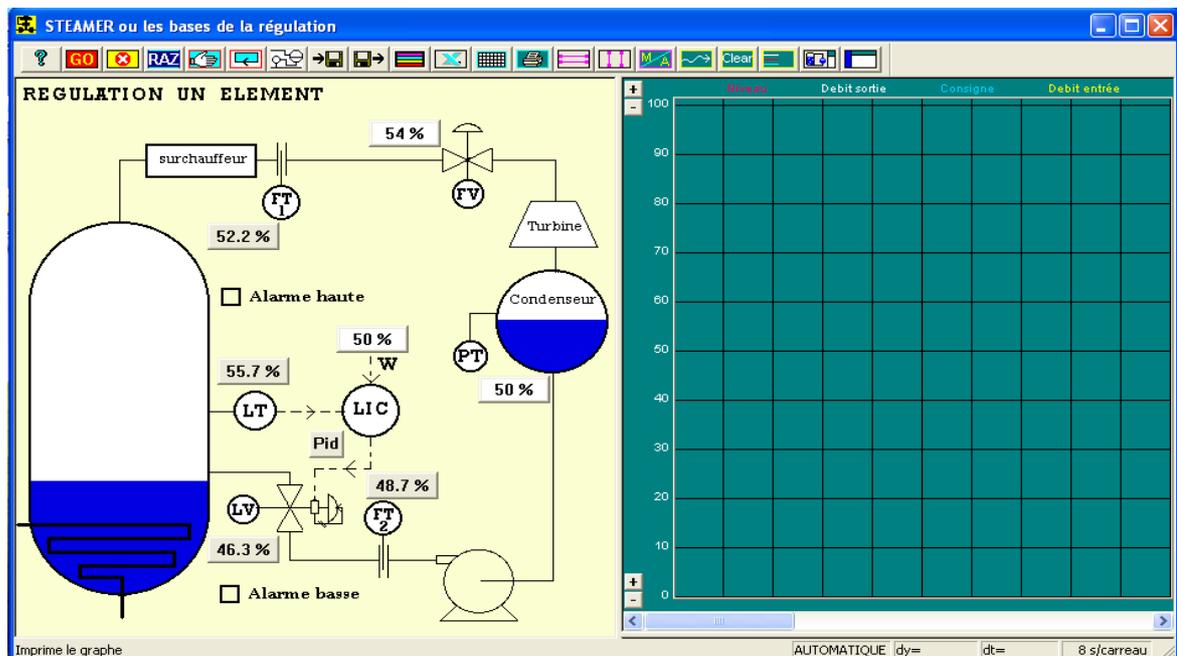


Figure 5.17 Interface STEAMER

Les symboles usuels employés sont donnés dans le tableau suivant :

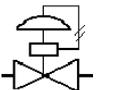
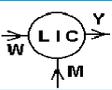
Symboles	STEAMER	Section Production de vapeur (U5P)
	la cuve	Ballon supérieur du chaudière 55-D-120Ax (ballon de vapeur)
	Condenseur	Condenseur E112
	Surchauffeur	Les deux surchauffeurs (basse température (SHT), haute température (SBT))
	Pompe centrifuge	les pompes alimentaires P110 A/B
	Vanne de régulation : organe de réglage de débit à commande pneumatique,	Vanne de réglage FV 5508X
	Capteur de débit à diaphragme	Capteur de débit d'eau alimentaire FT 5508X Capteur débit vapeur
	Capteur Transmetteur de niveau, (Level Transmitter)	Deux Capteurs transmetteurs de niveau : le LT 5507 A et LT 5507 B
	Capteur Transmetteur de pression (Pressure Transmitter)	Deux Capteurs transmetteurs de pression : le PT 6505A et le PT 6505B
	Régulateur Indicateur de niveau (Level Indicator Controller)	Régulateur Indicateur de niveau : LIC 5507
	Régulateur Indicateur de débit	Régulateur Indicateur de débit FIC 5508

Tableau 5.6 Les symboles du régulateur STEAMER

**b- Régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé)**

Le principe d'un régulateur consiste à comparer la consigne (valeur désirée) à la mesure (valeur actuelle) et à agir en conséquence sur l'organe de commande. On représente cette disposition par un schéma fonctionnel qui met en évidence le bouclage de la sortie sur l'entrée.

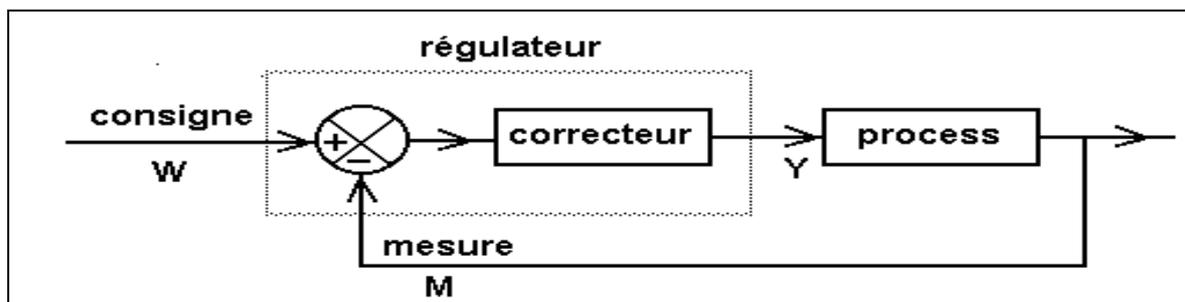


Figure 5.18 Le principe d'un régulateur PID

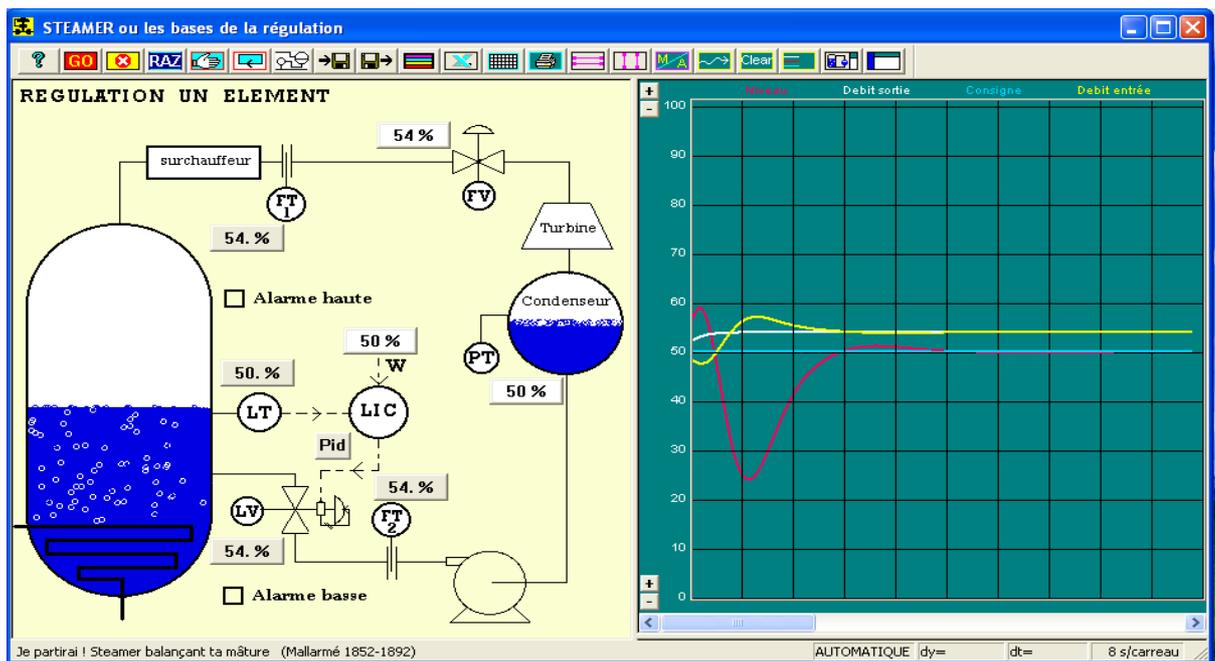
La sortie du comparateur donne l'écart entre la consigne et la mesure :  $e = W - M$ , le rôle du correcteur doit être de le rendre le plus petit possible.

### *b- Stratégies de régulation*

#### *1. Régulation un élément (niveau ballon)*

C'est le mode de démarrage. La sortie du régulateur de niveau d'eau commande directement la vanne d'eau.

La régulation monoboucle avec un régulateur PID porte encore le nom de régulation un élément (voire figure 5.19)



**Figure 5.19** Stratégies de régulation d'un seul élément

#### *Interprétation des courbes*

Pour une augmentation du débit vapeur (débit de sortie) : dans un premier temps, une demande de diminution de débit d'eau (effet de gonflement) suivie d'une demande d'augmentation proportionnelle à la variation de débit de vapeur.

La stabilité de débit vapeur et l'augmentation de débit d'eau suivie une diminution de niveau de ballon (effet de tassement), puis un certain temps en remarque une stabilité des trois éléments, le niveau de ballon avec la consigne et débit de vapeur avec le débit d'eau.

#### *2. Régulation trois éléments (niveau ballon, débit vapeur et débit d'eau)*

Elle peut s'avérer insuffisante dans le cas de certains procédés, comme procédé de liquéfaction du gaz. On met alors en œuvre d'autres composants ou d'autres régulateurs que l'on combine selon une stratégie de régulation. Par exemple, si l'on accroît brusquement la

demande de vapeur il est évident qu'il faudrait accroître aussitôt l'arrivée d'eau dans les mêmes proportions.

Le niveau dans le ballon supérieur de la chaudière 55-D-120Ax ne peut en effet être constant que si les débits massiques d'eau et de vapeur sont égaux. Mais si l'on se contente d'une simple boucle il faudra attendre que le niveau d'eau dans le ballon supérieur varie avant que le régulateur réagisse ; de plus comme on l'a déjà vu il commencera par agir dans le mauvais sens.

L'action sur la vanne d'arrivée d'eau résulte de l'addition d'une action a priori qui assure l'égalité des débits d'entrée et de sortie et d'un régulateur de niveau Pid. Grâce à cette combinaison les variations brusques de charge sont immédiatement répercutées sur l'organe de commande et l'égalité consigne mesure reste assurée par le Pid.

Une autre perturbation importante sera la pression dans le condenseur. En effet si elle vient, par exemple, à chuter brusquement, le débit de la pompe ne sera plus assuré pour une même ouverture de vanne. Pour s'affranchir de cette perturbation on passe à la régulation par trois éléments.

Plutôt que de commander directement la vanne par la sortie du sommateur on la commande par un régulateur de débit dont la consigne est fixée par le régulateur de niveau. Une telle liaison d'un régulateur maître à un régulateur esclave s'appelle une régulation cascade. Ainsi toute perturbation sur la pression du condenseur sera étouffée par le régulateur FIC de débit. On adoptera pour ce dernier un réglage dur et un réglage mou pour le régulateur LIC 5507 N, sensible aux phénomènes de gonflement et tassement, le résultat obtenu est représenté dans la Figure 5.20.

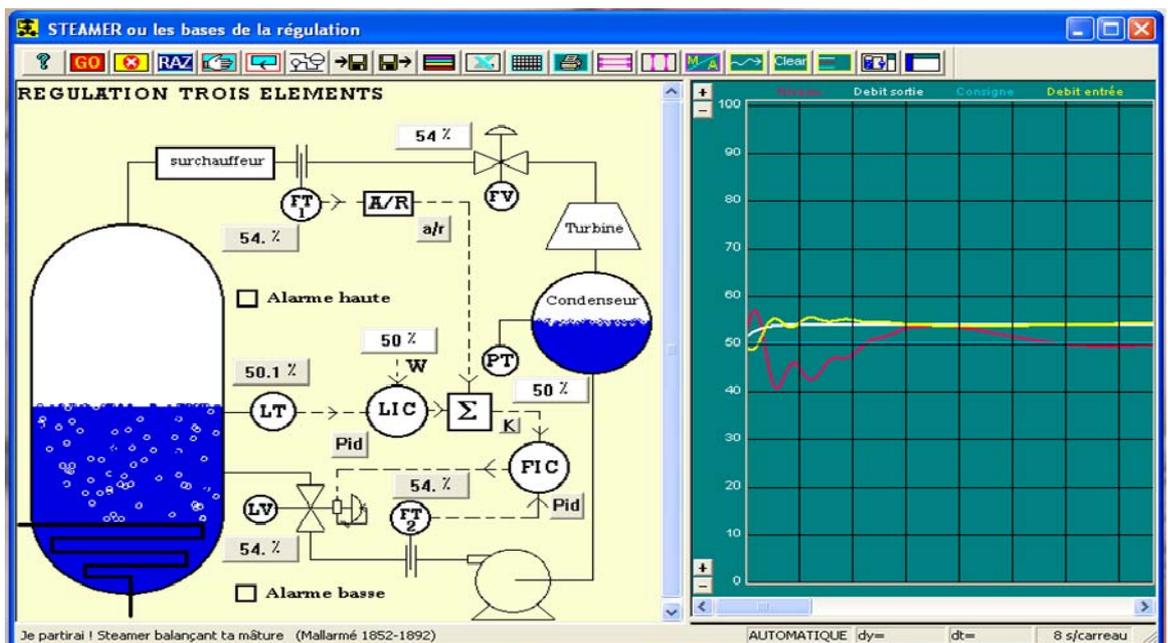


Figure 5.20 Stratégies de régulation trois éléments

### 5.3.3.2 Analyse quantitative

La définition de l'événement indésirable, qui fera l'objet de l'analyse de risque, est une étape cruciale pour la construction de l'arbre. Plus cet événement est défini de manière précise, plus simple sera l'élaboration de l'arbre des défaillances. Par ailleurs, s'agissant d'une méthode qui peut se révéler rapidement lourde à mener, elle doit être réservée à des événements jugés particulièrement critiques.

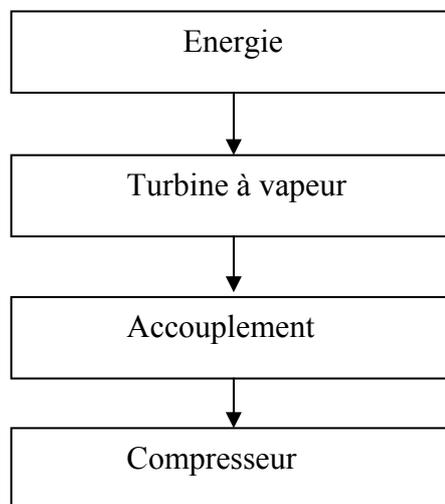
De manière classique, les événements considérés peuvent concerner le rejet à l'atmosphère de produits toxiques ou inflammables, le risque d'incendie, d'explosion...

Dans notre cas l'événement le plus redouté dans les procédés de liquéfaction est les fuites de gaz qui représente plus de 60% des accidents, c'est pour ce la on le choisit comme événement indésirable « *Perte de confinement du Compresseur C201* »

L'utilisation préalable de la méthode inductive (AMDEC machine) permet d'identifier les événements qui méritent d'être retenus pour une analyse par arbre des défaillances.

#### *a- Analyse du système*

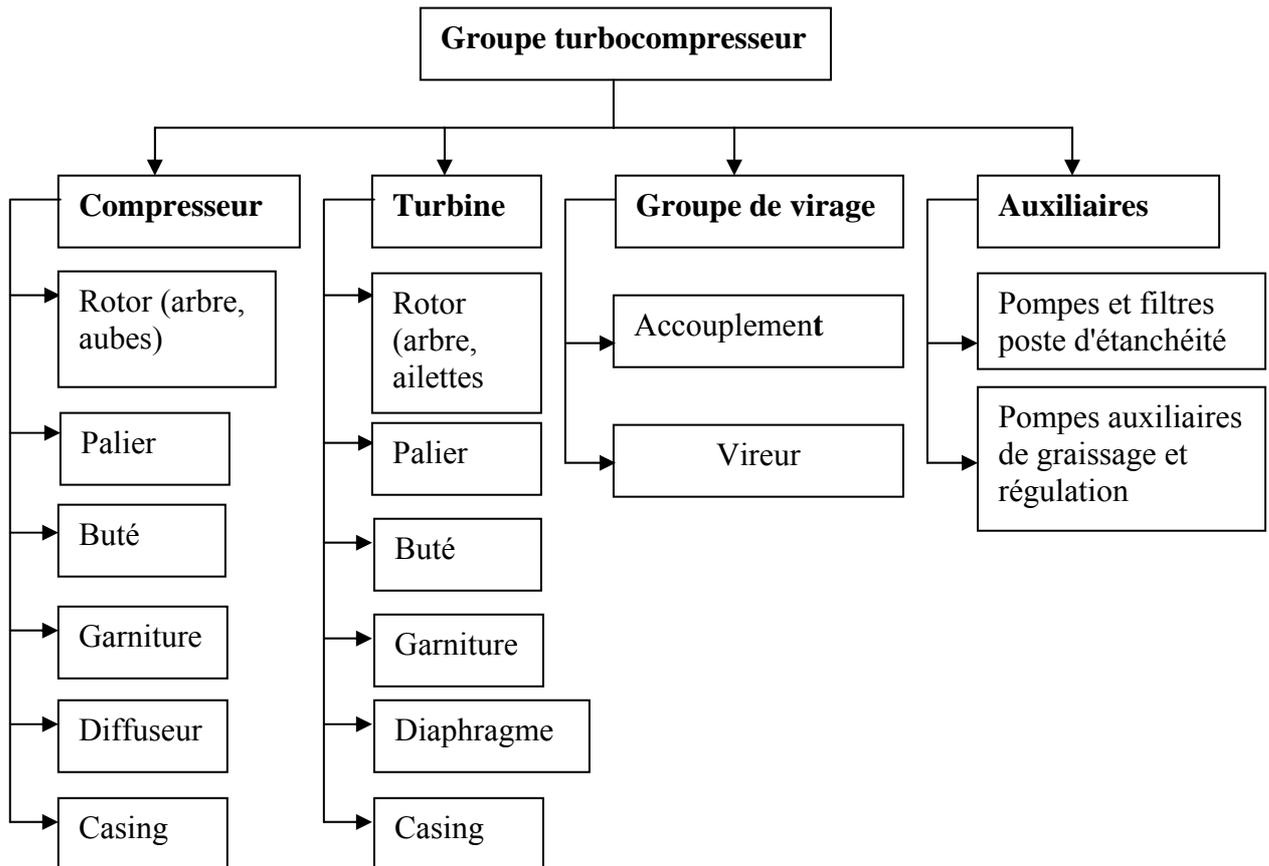
Dans un premier lieu on a décomposé fonctionnellement le système (groupe turbocompresseur)



**Figure 5.21** Décomposition fonctionnelle du système

#### *b- Décomposition du système*

L'AMDEC est une méthode de réflexion créative qui repose essentiellement sur la décomposition fonctionnelle de système en éléments simples jusqu'au niveau des composants.



**Figure 5.22** Décomposition du GTC

Les Tableaux présentés ci-après regroupent, pour chaque élément du compresseur C 201, les résultats obtenus à l'issue de la session de travail AMDEC, voir tableau 5.7

En utilisant les résultats de l'analyse AMDEC et en appliquant l'analyse par l'arbre de défaillance sur le logiciel *JaGrif*, on aura l'arbre de défaillance de la Figure 5.23

<b>Système : Turbocompresseur</b>	<b>Date</b>
<b>Sous-système : Compresseur</b>	<b>Tableau N°</b>

N°	Elément	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effet	Détection	P	G	Action à engager
<b>(1)</b>	<b>Garniture</b>	Etanchéité (Empêche toute fuite de gaz vers l'extérieure)	Fuite (gaz et huile)	-Mauvaise qualité d'huile - Défaut de pression d'huile d'étanchéité - Huile à haute température - Echauffement du rotor (déformation)	-Explosion -Contamination de l'air -Pollution atmosphérique (gaz dangereux, inflammable) - Rendement diminué de la machine -Présence d'huile dans le gaz comprimé. -Feu d'huile	-Détection visuelle et déclanchement du compresseur	<b>C</b>	<b>I</b>	-Déclenche le système de sécurité - Seuil d'alarme et de déclanchement sur débit de fuite de gaz. - Sécurité d'arrêt automatique lors d'une grande fuite. - Redirection du mélange vers réseau torche ou à l'atmosphère. - Détecteur de fumée. -Voir avec la maintenance et travaux neufs la possibilité d'éviter l'écoulement de fuite d'huile sur la tuyauterie chaude.
<b>(2)</b>	<b>Butée</b>	Contre la poussé axial	Usure Frottement	-L'insuffisance d'huile - survitesse de la machine d'entraînement (turbine)	-Fuite de gaz -Basse du rendement du compresseur -Vibration du rotor -Jeux excessifs	-Sonde de vibration  -Salle de contrôle (DCS)	<b>D</b>	<b>III</b>	- Détection de déplacement axial - Détection de vibration axiale et radiale - Butée magnétique -Voir avec maintenance et travaux neufs (analyse vibratoire, ...) -changer la butée si nécessaire.
<b>(3)</b>	<b>Roue (Aubes)</b>	Augmente la pression de refoulement du gaz	Endommagements mécaniques de la roue ou des aubes	- Pompage - Niveau de vibrations élevé	- Pression au refoulement ne correspondant pas aux pressions nominales - Fuite de gaz - Baisse du rendement du C201	-Salle de contrôle (DCS)	<b>D</b>	<b>II</b>	- Détection de déplacement axial, seuil d'alarme et de déclanchement. - Seuil alarme et déclanchement sur niveau bas du débit de gaz. - Détection de vibration axiale et radiale. Arrêter et inspecter l'arbre et le rotor, nettoyage des roues et des aubes,

N°	Elément	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effet	Détection	P	G	Action à engager
(4)	Palier	Support de l'arbre	Usure du palier	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Débit inadéquat de lubrifiant (Fuite)</li> <li>- Mauvaise état de lubrifiant.</li> <li>- Débit d'eau de Refroidissement insuffisant.</li> <li>-Corrosion</li> <li>-fatigue</li> <li>-non respect l'entretien et la maintenance de l'équipement.</li> <li>-Viscosité de l'huile excessive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibration</li> <li>Echauffement excessive</li> <li>- Fiabilité faible.</li> <li>-Dégradation d'huile</li> <li>-Arrêt du compresseur</li> <li>Frottement + Echauffement</li> </ul>	Visuelle (DCS)	C	II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de déplacement axial</li> <li>- Détection de vibration axiale et radiale</li> <li>- Butée magnétique</li> <li>-Voir avec maintenance et travaux neufs (analyse vibratoire, ...)</li> <li>-Vérifier le manomètre (pression d'huile)</li> <li>-Ajouter de l'huile dans le réservoir jusqu'au niveau correct du fonctionnement.</li> <li>-Aspiration de la pompe d'huile obturée</li> <li>-Vérification du filtre d'huile (nettoyer).</li> <li>-Inspecter et nettoyer les paliers.</li> <li>-Peinture anti corrosion</li> </ul>
(5)	L'arbre	Assure la rotation des roues	Rupture de l'arbre	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vibrations excessives</li> <li>-Jeu axial excessif</li> <li>-fatigue</li> <li>- corrosion</li> <li>- températures du fluide excessives</li> <li>-défaut de fabrication</li> <li>-mauvais alignement</li> <li>-Mauvais démarrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Blocage des roues</li> <li>- arrêt du compresseur</li> <li>- baisse du rendement</li> <li>-Dommages mécaniques aux différents éléments.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Salle de contrôle (DCS)</li> <li>-Bruit</li> <li>Déclenchement du compresseur</li> </ul>	D	IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seuil d'alarme et de déclenchement sur température des paliers, vibrations et déplacement axial minutieusement choisi suivant les spécifications du constructeur.</li> <li>- Réglage du jeu axial.</li> <li>-Remplacer le rotor et équilibrer.</li> <li>-Réglage du jeu axial.</li> <li>-Peinture anti corrosion</li> </ul>

Tableau 5.7 AMDEC Compresseur C 201

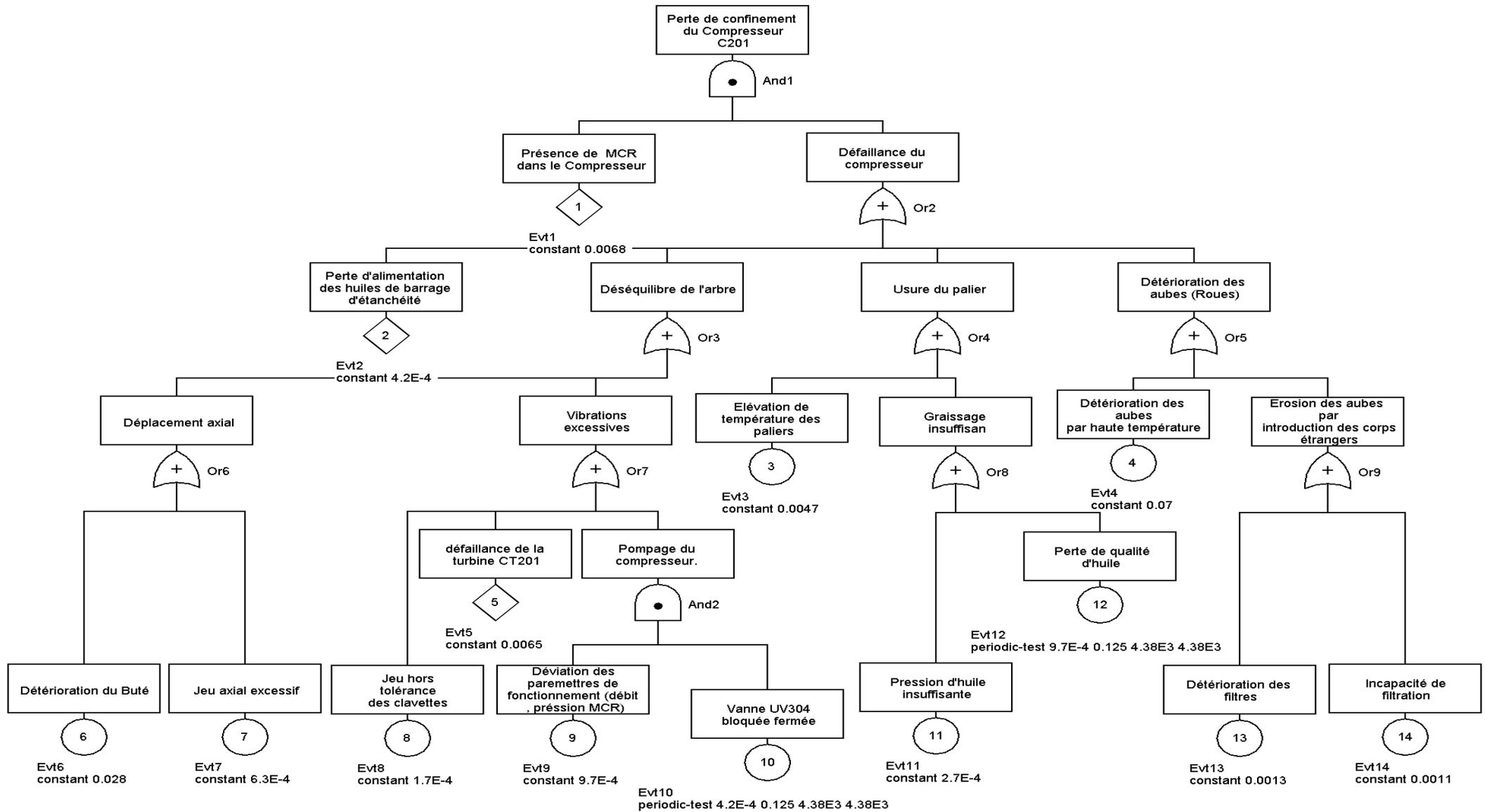


Figure 5.23 Arbre de défaillance du compresseur C 201

### a- Exploitation de l'arbre des défaillances

L'analyse de l'arbre comprend une analyse qualitative puis éventuellement une analyse quantitative. Ces concepts sont expliqués plus en détail dans ce qui suit.

#### 1. L'exploitation qualitative

Le traitement qualitatif de l'arbre est double. Tout d'abord, il vise à déterminer les coupes minimales puis à examiner dans quelle proportion une défaillance correspondant à un événement de base peut se propager dans l'enchaînement des causes jusqu'à l'évènement indésirable.

L'arbre de la Figure 5.24, comporte donc (12) coupes, (11 coupes d'ordre 2 et une d'ordre 3).

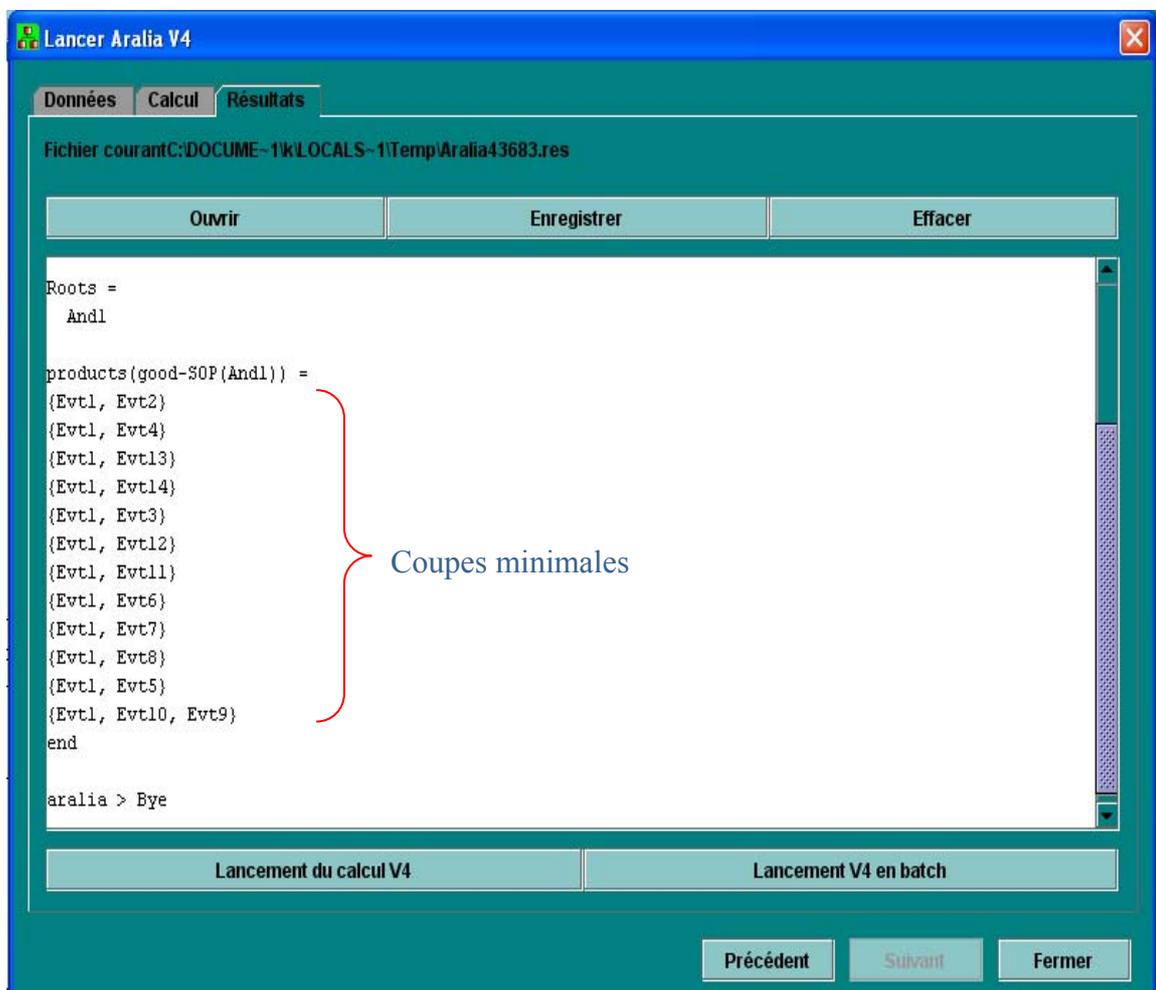
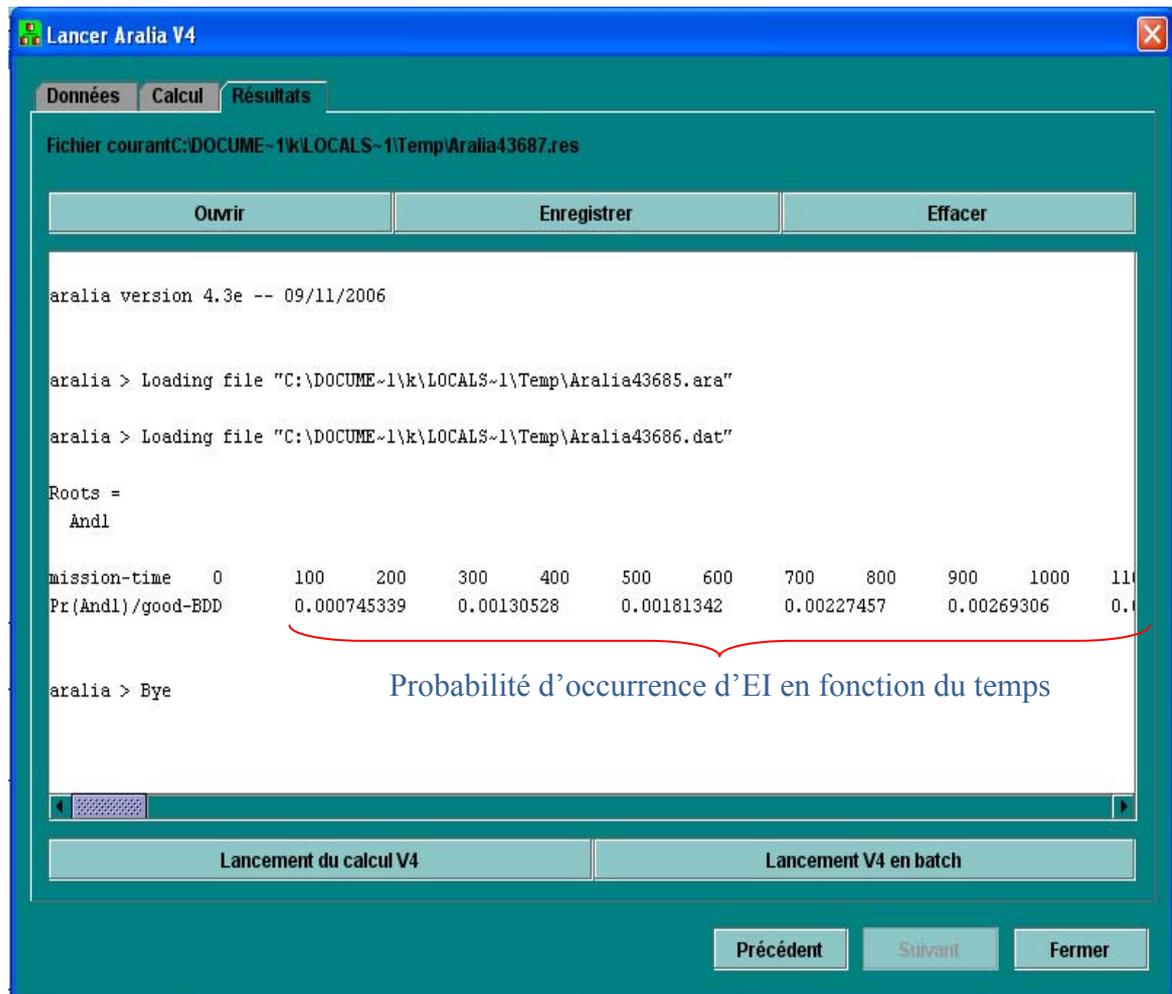


Figure 5.24 Coupes minimales

## 2. L'exploitation quantitative

L'analyse quantitative de l'arbre des défaillances vise à évaluer, à partir des probabilités d'occurrence des événements de base, la probabilité d'occurrence de l'événement indésirable. En pratique, il est souvent difficile d'obtenir des valeurs précises de probabilités des événements de base. En vue de les estimer.

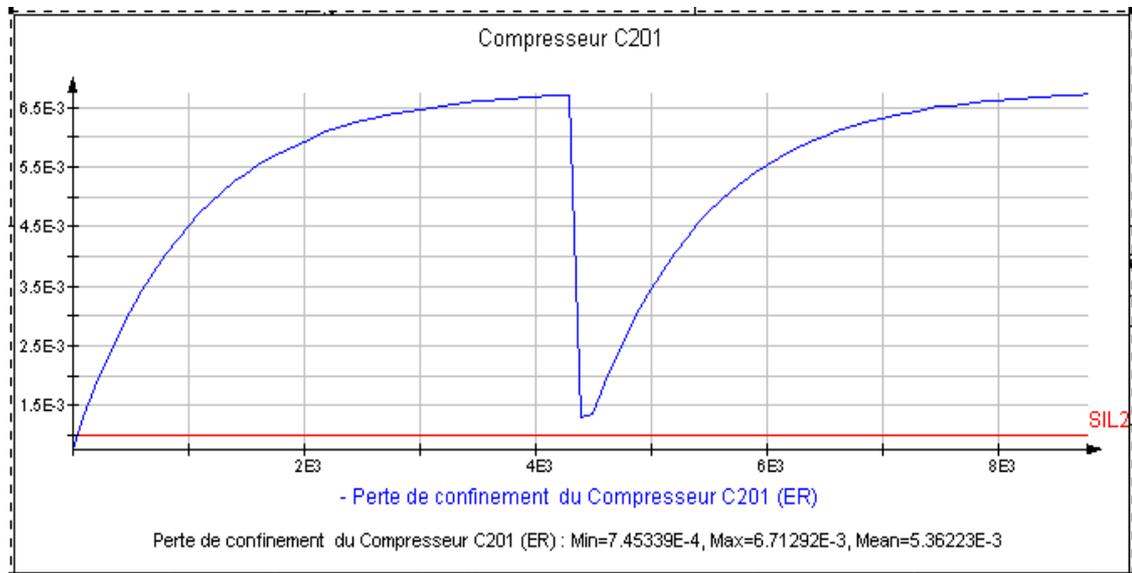


**Figure 5.25** Probabilité d'occurrence d'ER en fonction du temps

La réduction de la probabilité de cet événement final peut alors être envisagée de plusieurs manières :

- en supprimant ou réduisant la probabilité d'occurrence des événements de base,
- en améliorant la fiabilité du système par l'ajout de portes « ET » entre l'événement final et les événements de base. Les portes « ET » placées au plus proche de l'événement final permettent de traiter un maximum de coupes minimales et le cas échéant, de traiter certaines causes qui n'auraient pas été envisagées.

La courbe suivante représente la variation de la probabilité d'occurrence sur 8760 heures (une année) calculée au niveau du sommet de l'arbre ER (perte de confinement MCR du compresseur C201).



**Figure 5.26** Variation de la probabilité d'occurrence d'ER en fonction du temps

### *Interprétation de la courbe*

La réduction de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté «Perte de confinement du compresseur C201 » ce faite par des testes périodique chaque six (6) mois (4380 heures) pour la vanne UV 304 et la qualité d'huile de graissage.

### **5.3.4 Évaluation des risques du GTC (matrice de criticité 5\*5)**

L'évaluation d'acceptabilité de la gravité des conséquences des scenarios d'accident sera faite par référence à la grille de criticité suivante :

D'après la grille de criticité (Tableau 5.8) les risques de défaillance inacceptables pour le compresseur C 201 sont:

- Fuite gaz du Garniture d'étanchéité du compresseur C 201) ;
- Détérioration (usure) du Buté ;
- Endommagements mécaniques de la roue ou des aubes.

Individu	Perte d'équipement (Milliard de DA)	Environnement	Heures de travail perdues	Probabilité d'occurrence		Très rare	Rare	Occasionnel	Probable	Fréquent
				Gravité		< 10 <sup>-5</sup> / an (A)	entre 10 <sup>-4</sup> et 10 <sup>-5</sup> (B)	entre 10 <sup>-3</sup> et 10 <sup>-4</sup> (C)	Entre 10 <sup>-2</sup> et 10 <sup>-3</sup> (D)	> 10 <sup>-2</sup> / an (E)
						Jamais entendu dans l'industrie	Entendu dans l'industrie 01/ mille ans	Survenu une fois dans l'entreprise	Survenu 01/ 10 ans dans le site	Survenu plusieurs fois dans le site
≥ mort	> 100	Dommages irréversibles	>3mois	<b>Catastrophique I</b>			<i>Perte de confinement du Compresseur C201</i>			
Incapacité physique permanente	10 à 100	Dommages réparables à long terme (>10 ans)	1 à 3(mois)	<b>Critique II</b>						
Incapacité physique temporaire	1 à 10	Dommage réparables à moyen terme (5 à 10 ans)	< 1mois	<b>Dangereux III</b>						
Légère blessure	0,5 à 1	Dommage réparables à court terme (< 5 ans)	2 à 4 jours	<b>Tolérable IV</b>						
Sans blessure	< 0,5	Pas de dommage	< 1 journée	<b>Négligeable V</b>						

<b>Risque Inacceptable</b>	<b>Risque Acceptable</b>	<b>Risque Tolérable</b>
----------------------------	--------------------------	-------------------------

**Tableau 5.8** Matrice de criticité du Groupe turbocompresseur

### 5.3.5 Planifications des tâches de maintenance du GTC

#### 5.3.5.1 Diagramme de Pareto (Causes de panne du groupe turbocompresseur)

D'après l'historique de maintenance, la feuille 'Collecte' liste les causes des pannes pour le GTC. Un nombre des pannes de l'équipement, mesuré sur trois ans (Du 01/01/2007 au 31/12/2009),

Collecte des données			Calculs			Limite (ABC) de Pareto	
N	Unité	NP du GTC (fois)	Pourcentage (%)	Cumul (fois)	Cumul (%)	Limite A (%)	Limite B (%)
1	Déplacement et vibration	47	46	47	46	80	95
2	Huile	29	28	76	75	80	95
3	Régulation	11	11	87	85	80	95
4	Fatigue	5	5	92	90	80	95
5	Désalignement	4	4	96	94	80	95
6	Frottement	3	3	99	97	80	95
7	Mauvais démarrage	2	2	101	99	80	95
8	Corrosion	1	1	102	100	80	95

Tableau 5.9 Calcul selon la méthode de Pareto (NP)

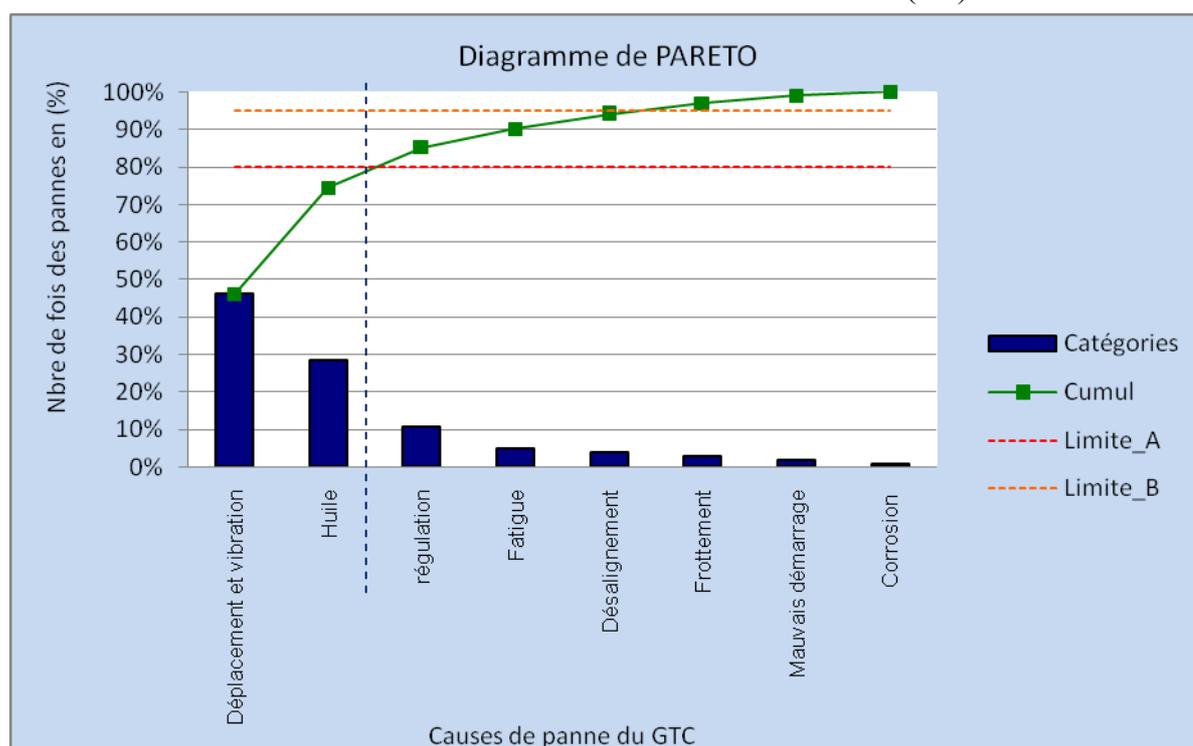


Figure 5.27 Diagramme de Pareto (causes de panne du GTC)

#### Interprétation des résultats

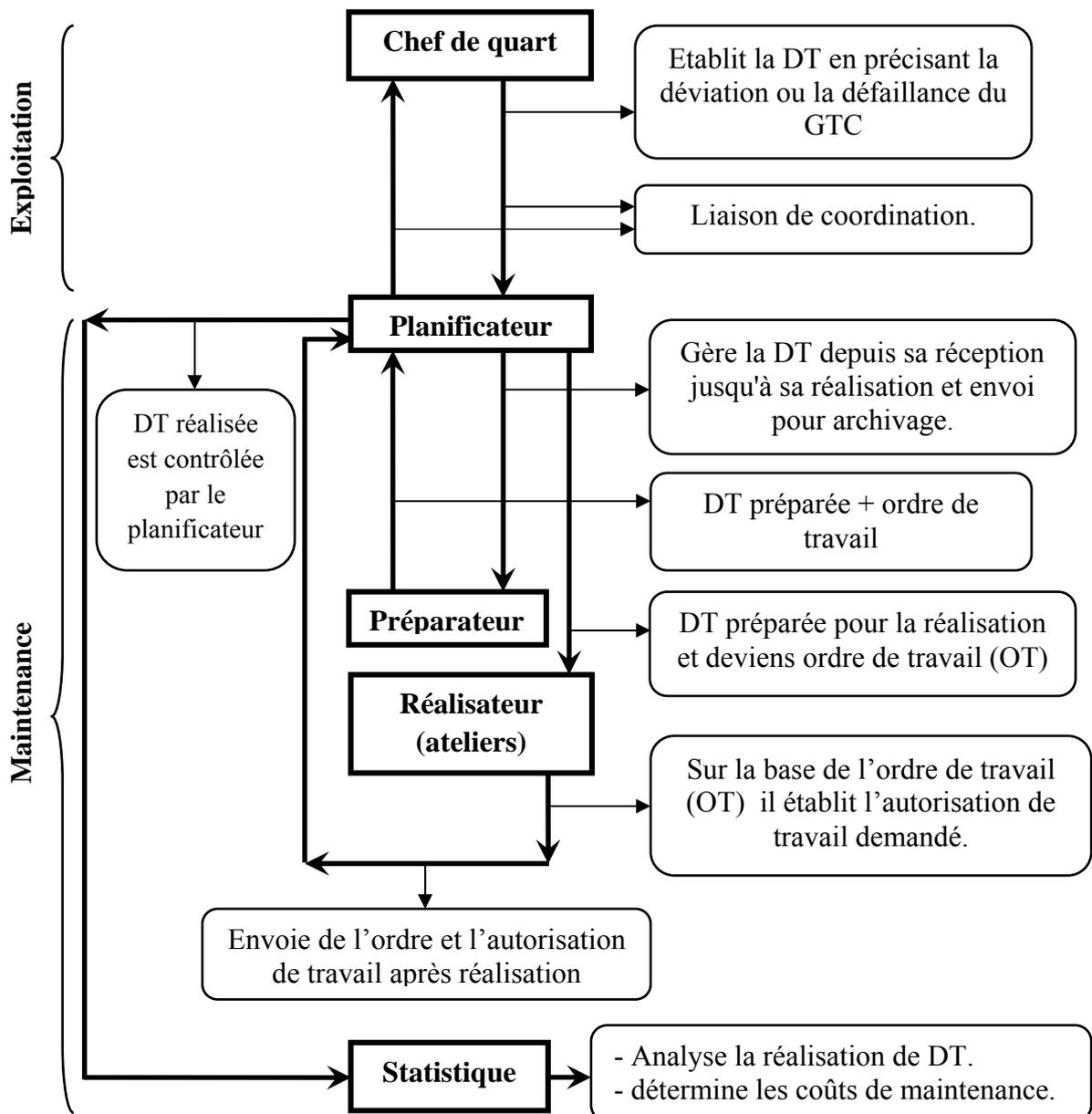
On remarque que **80%** des problèmes viennent du : Déplacement axial, les vibrations et l'huile.

Alors les actions de maintenance doivent être portées sur les deux causes, illustrer dans le diagramme de **Pareto**. Afin d'éliminer ou bien minimiser leurs effets sur le turbocompresseur CT201/C201 et sur l'unité 5P.

**5.3.5.2 Cheminement de la demande de travail (DT) : maintenance groupe turbocompresseur**

La demande de travail est un document établi par tout utilisateur ou exploitant d'équipement dans lequel il exprime la déviation ou la défaillance dans le fonctionnement de cet équipement.

La demande de travail est l'élément de base sur lequel s'organise toute opération de maintenance du GTC. Toute demande de travail se distingue selon sa priorité et genre de maintenance.



**Figure 5.28** Cheminement de la demande de travail (DT) maintenance du GTC

### 5.3.5.3 Priorité et genre de maintenance

Le code de priorité d'une DT indique le temps dont dispose la maintenance pour la préparation, la programmation et la réalisation du travail demandé. On distingue cinq priorités.

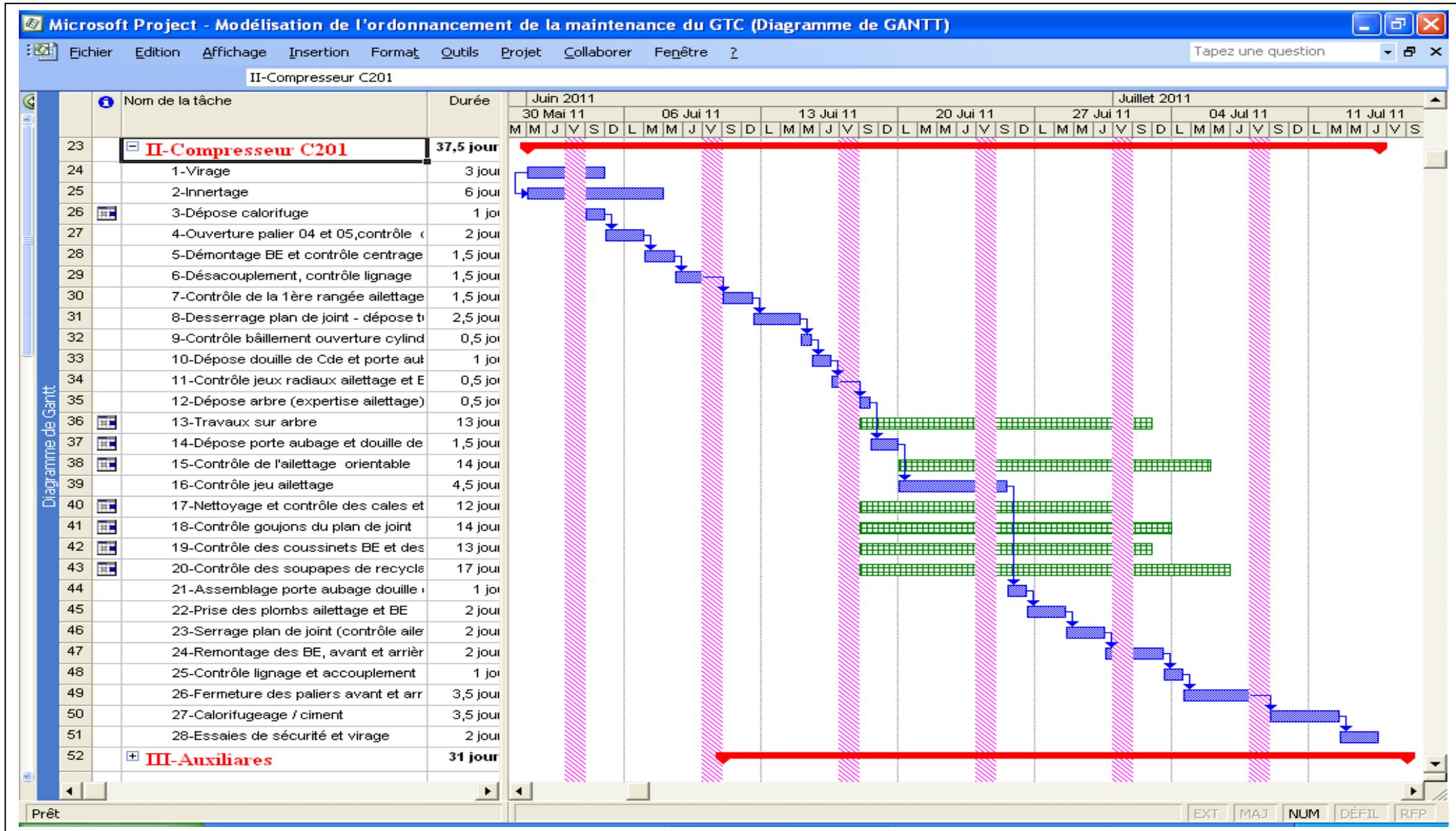
Le code du genre de maintenance est déterminé par les services du département maintenance et indique les types de travaux effectués. Le code du genre de maintenance est utilisé pour analyser les coûts de maintenance. On distingue cinq genres de maintenance.

Priorité et genre de la maintenance		Travaux
Priorité de maintenance	P <sub>1</sub>	les travaux urgents qui doivent commencer le jour même de la demande de travail car il y'a risque de perte de production ou un risque lié a la sécurité des personnes ou du matériel.
	P <sub>2</sub>	les travaux doivent commencer dans les 24h à 48h après notification de la DT.
	P <sub>3</sub>	les travaux pour les quels on se donne le temps de préparer la DT.
	P <sub>4</sub>	les travaux réalisés lors de l'arrêt de l'équipement ou de l'unité concernée.
	P <sub>5</sub>	les travaux qui ne pouvant réalisée suite a différent obstacles (ex : attente pièce de rechange, spécialiste, personnel, etc.). Cette priorité est décidée pour le département maintenance après préparation de la DT et constatation de l'obstacle empêchant d'entamer les travaux. Cette DT est alors maintenue en instance jusqu'à résolution du problème empêchant le lancement des travaux.
Genre de maintenance	G <sub>1</sub>	les travaux accidentels demandés suite à une déviation (défaillance)
	G <sub>2</sub>	les travaux préventifs et d'inspection.
	G <sub>3</sub>	les travaux de modification.
	G <sub>4</sub>	les travaux permanents programmés par le département maintenance
	G <sub>5</sub>	les travaux réalisés pour les unités extérieures au complexe ou travaux pour tiers.

**Tableau 5.10** Priorité et genre de la maintenance

### 5.3.5.4 Planning de maintenance du GTC

Nous avons choisis la méthode de GANTT pour réaliser le planning des opérations de maintenance du GTC. Le planning suivant visualise l'étendu et l'enchaînement des taches effectuées lors de la révision générale du GTC.



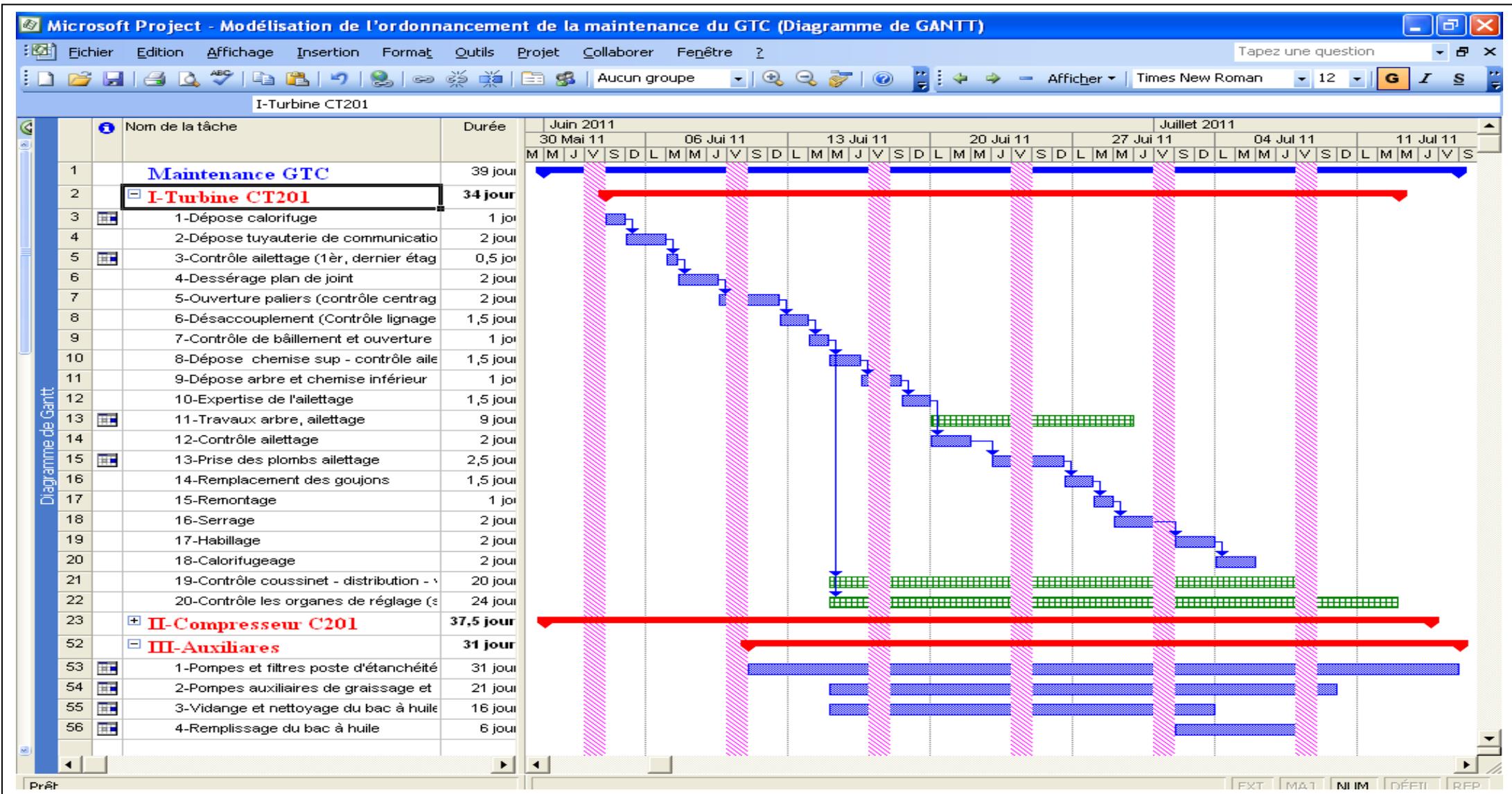


Figure 5.29 Modélisation de l'ordonnement de la maintenance du GTC (diagramme de GANTT)

## 5.4 Conclusion

La liquéfaction du gaz naturel dépend directement de l'état du groupe turbocompresseur. Donc, il faut s'assurer que ce dernier fonctionne dans les meilleures conditions pour atteindre un meilleur rendement et pour éviter les scénarios d'accidents.

C'est dans ce cadre qu'on a effectué notre étude sur le groupe turbocompresseur, afin d'évaluer qualitativement et quantitativement les différentes causes possibles de l'évènement indésirable et caractériser les scénarios d'accidents en terme de probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences, et enfin la sécurité de cette machine vis-à-vis de ces scénarios d'accidents par une meilleure planification des tâches de maintenance.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Les équipements de production dans l'industrie du GNL sont dotés d'innovation technologique avancée ce qui induit des coûts élevés en termes d'investissement et de maintenance. La MBR est une approche innovante qui permet de définir et de modifier des plans de maintenance préventive en fonction du risque potentiel.

Cette approche considère le risque comme un critère central dans le processus de décision de la maintenance. L'objectif de cette approche est l'amélioration des plannings de maintenance et leur mise à jour en se basant sur le niveau de risque. Elle développe trois modules : estimation du risque, évaluation du risque et modification des plans de maintenance. Le premier module consiste à développer des scénarios potentiels de défaillance, leurs conséquences sur le système et d'estimer par la suite les risques associés. Le second module permet d'évaluer les critères du risque par les experts et définir si des actions sont nécessaires ou non. Le dernier module est basé sur le résultat des deux précédents pour revoir les plannings de maintenance.

Une étude de cas d'optimisation de planning de maintenance d'un groupe turbocompresseur de l'unité de GNL 5P du complexe GL1K montrant l'intérêt de cette approche pour la réduction de risque de défaillance du système et de ses conséquences en matière de sécurité, économique et environnement.

Notre perspective, consistera à ajuster et améliorer la méthodologie MBR (maintenance basée sur le risque) pour répondre à la problématique contextuelle précitée. Ceci a été fait en proposant aux experts une liste prédéterminée de risques prioritaires, un outil d'aide à la décision et de gestion des retours d'expérience assistant les ingénieurs maintenance pendant les deux phases d'identification et d'estimation des risques. L'approche dynamique a consisté à identifier les risques dans un système de gestion de maintenance et à intégrer l'expérience des événements enregistrés au cours du cycle de production. Avec cette approche nommée RBM dynamique, il a été possible de suivre en temps réel les facteurs majeurs de pertes de performance et d'agir en conséquence sur les causes potentielles en fournissant pour les opérationnels une notion de priorité cohérente associée aux risques encourus.

Dans nos perspectives aussi notre recherche sera orientée vers introduction d'un nouveau système de management de la maintenance basée sur le risque (SMMBR) dans un cycle PDCA (plan, do, check, action).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [**ABBOU, 03**] Rosa ABBOU, « *Contribution à la mise en oeuvre d'une maintenance centralisée : conception et optimisation d'un atelier de maintenance* ». Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale EEATS, 2003.
- [**AFNOR, 00**] « *Applications ferroviaires : Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS)* », NF EN 50126, Paris, Janvier 2000.
- [**AFNOR, 01**] « *Terminologie de la maintenance* », Recueil de normes françaises - NF EN 13306, AFNOR 2001.
- [**Arunraj & Maiti, 07**] Arunraj, N. & Maiti, J « *Risk-based maintenance--Techniques and applications*», *Journal of Hazardous Materials*, 142(3), 653-661.2007.
- [**ARIA, 92**] La base de donnée ARIA « *Analyse, Recherche et Information sur les Accidents* », 1992.
- [**Benaissa, 06**] Wassila BENAÏSSA, « *Développement d'une méthodologie pour la conduite en sécurité d'un réacteur continu intensifié* », thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2006.
- [**Boulenger, 88**] Boulenger A, « *Vers les zéro pannes avec la maintenance conditionnelle* », Guides de l'utilisateur, AFNOR, Paris, 1988.
- [**Brown, 99**] A.E.P., « *Risk analysis: an investment in engineering*», *Process Safety Progress*, 18(2), 121-125, 1999.
- [**Castanier, 02**] B. Castanier « *Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle* », Thèse PhD de l'Université de Technologie de Troyes, 2002.
- [**Cassanelli et al, 06**] Cassanelli, G. et al, « *Failure Analysis-assisted FMEA* ». *Microelectronics and Reliability*, 46(9-11), 1795-1799, 2006.
- [**Chatelet et al, 99**] « *Les systèmes d'automatismes et Internet* », chapter 3, pp. 53\_55, 1999.
- [**Chabrelie, 06**] Marie Françoise Chabrelie, « *L'industrie gazière à l'horizon 2020* », Cedigaz, Janvier 2006.
- [**Charles, 00**] Charles A-S, « *Modélisation des défaillances des équipements d'une unité de production de composants électroniques. Optimisation des stratégies de maintenance* ». Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.2000.
-

- [Comtois, 06] Yves Comtois, «*implantation du terminal et du gazoduc* », *Projet Rabaska*, Janvier 2006.
- [Coudert, 00] Coudert T, «*Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance* ». Thèse de doctorat de l'ENI de Tarbes (France), 2000.
- [Darling, 96] Darling, S.S, «*Implementing a 'least cost' and 'risk focused' maintenance process* ». International Conference on Nuclear Engineering, 1996.
- [Debray, Chaumette, Descouriere, Trommeter, 06] B.Debray, S.Chaumette, S.Descouriere, V.Trommeter, «*Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs* », Rapport d'étude № INERIS-DRA-2006-p46055-cl47569. Octobre 2006.
- [Desmercieres, 09] M. Desmercieres, «*Etude de dangers, SONATRACH aval, Complexe GLIK* », Janvier 2009.
- [DOD, 80] D.O.D, «*military standard: procedures for performing a failure mode effects and criticality analysis*», United State Of America, 1980.
- [Duarte et al. 06] Duarte, J.A.C, Craveiro, J.C.T.A & Trigo, T.P., «*Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system*». International Journal of Pressure Vessels and Piping, 83(4), 244-248, 2006.
- [Esquirol et al, 01] «*Concepts et méthodes de base en ordonnancement de la production, Information, Commande, Communication* », chapter 2, pp. 25\_53, 2001
- [Flanagan & Norman, 93] Flanagan.R, Norman.G, «*Risk Management and Construction* », Edition Blackwell Science Ltd, 1993.
- [Frenette, Gérard, Bernard, 07] R. Frenette, B. Gérard, O. Bernard, «*Gestion durable des infrastructures par les risques*», colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 2007.
- [Fujiyama et al, 04] Fujiyama, K. et al, 2004. «*Risk-based inspection and maintenance systems for steam turbines* », International Journal of Pressure Vessels and Piping, 81(10-11), 825-835, 2004.
- [ISO, 02] «*Management du risque – Vocabulaire – principes directeurs pour les inclure dans les normes ISO*», ISO/CEI Guide 73, 2002.
- [GT Méthodologie, 03] «*Principes généraux pour l'élaboration et la lecture des études de danger* », INERIS, 2003.
-

- [GT Aspects sémantiques du risque, 97] « *Vocabulaire lié au risque à travers une analyse bibliographique* ». Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN), 1997.
- [HADEF, SOUKEHAL, 04] Hayette HADEF, Boudjemaa SOUKEHAL, « *Urbanisation et risque industriel en Algérie, cas de la ville de Skikda et sa zone pétrochimique* », décembre 2004.
- [Héng, 02] Jean Héng, « *Pratique de la maintenance préventive* », Edition Dunod, Paris 2002.
- [Herrou & Elghorba, 05] Herrou, B. & Elghorba, M, « *FMECA, a powerful tool for maintenance improvement* ». *Case study for a compressor*», Casablanca, 2005.
- [HOUMEUR, 08] HOUMEUR Sana, « *modélisation et optimisation de l'aval des chaînes de GNL Algériennes* », Mémoire de magister de l'université de Boumerdes, Février 2008.
- [ISO, 08] « *Gestion du risque*», ISO/IEC 27005, 2008.
- [Hu et al, 09] Hu, H. et al, « *Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system*», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 392-397, 2009.
- [Iung & Marquez, 06] Iung, B & Marquez, A.C, « *Special issue on e-maintenance* ». *Computers in Industry*, 57(6), 473-475, 2006.
- [Khan & Haddara, 03] Khan, F.I & Haddara, M.M, « *Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning* ». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16(6), 561-573, 2003.
- [Kolski & Millot, 93] Kolski C. & Millot P. « *Problems in telemaintenance and decision aid criteria for telemaintenance system design* », *International Journal of Industrial Ergonomics*, VOL.11 (2), pp. 99-106, 1993.
- [Krishnasamy et al. 05] Krishnasamy, L, Khan, F. & Haddara, M, « *Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant*». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(2), 69-81, 2005.
- [Levrat et al, 08] Levrat, E., Iung, B. & Crespo Marquez, A, « *E-maintenance: review and conceptual framework*», *Production Planning and Control*, 19, 408-429, 2008.
- [Lopez & Roubellat, 01] Lopez P. & Roubellat F., « *Ordonnement de la production* ».Edition Hermès Science, 2001.
-

- [**Mazouni, 08**] Mohamed-Habib MAZOUNI, « *Pour une meilleure approche du Management des risques* », thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Novembre 2008.
- [**Monchy, 00**] Monchy F, « *Maintenance : Méthodes et Organisations* ». Edition DUNOD.2000.
- [**Muller et al, 05**] Muller Alexandre, Levrat Eric et Suhner Marie-Christine. « *Le pronostic, processus clé d'une stratégie de maintenance prévisionnelle pour le maintien en Conditions Opérationnelles d'un système de production* », Congrès International de Génie Industriel (GI), 2005.
- [**Nichan, 06**] Nichan Margossian, « *Risques et accidents Industriels majeurs* », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [**Paz & Leigh, 94**] Paz N.M & Leigh W, «*Maintenance scheduling: issues, results and research needs*», International Journal of Operations & Production Management, VOL. 14(8), pp.47-69, 1994.
- [**RE, 86**] « *Recommandations pour les études de l'industrie aérospatiale - Guide des méthodes courantes d'analyse de la sécurité d'un système missile ou spatial Aéro 701 11* ». Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE),1986.
- [**Retour & al, 1990**] Retour D., Bouche M. et Plauchu V., « *Où va la maintenance industrielle, Problèmes Économiques* », No. 2.159, pp. 7-13, 24, Janvier 1990.
- [**RICHET& Gabriel, 96**] Richet D. & Gabriel M, « *Maintenance basée sur la fiabilité* », Edition Masson, 1996.
- [**SONATRACH**] Documentation de SONATRACH.
- [**Tsang, 2002**] « *Strategic dimension of maintenance management*». Journal of Quality in Maintenance Engineering, 8 (1), p. 7–39, 2002.
- [**Tomic, 93**] Tomic. B, «*Risk based optimisation of maintenance - methods and approaches* ». European safety and reliability conference, pp. 259–265, 1993.
- [**Wybo, 04**] Wybo, J.L, « *Mastering risks of damage and risks of crisis: the role of organisational learning*», International Journal of Emergency Management, Vol.2, n° 1-2, 22-34, 2004.
- [**Zwingelstein, 96**] Zwingelstein, G, « *La maintenance basée sur la fiabilité : Guide pratique d'application de la RCM* », Edition HERMES, 1996.
-

**ANNEXE 1 : Processus de déroulement d'une HAZOP et d'une Add****Processus de déroulement d'une HAZOP :***Début\_HAZOP***Pour tous les éléments (ou composant) du système faire***Debut\_pour1***Pour tous les paramètres de fonctionnement de cet élément faire***Debut\_pour2***Pour tous les mots clés faire***Debut\_pour3*Générer une **dérive** () ; Evaluer les **Conséquences** () ;**Si cette dérive est crédible alors***Début\_si*Identifier les **Causes** () ;Evaluer la **Criticité** = (Probabilité, Gravité) ;**Tant que Criticité est non acceptable faire***Début\_tq*Engager **des actions de MdR** (détecter cette dérive,  
limiter les effets);Re-évaluer la **Criticité** = (Probabilité, Gravité) ;*Fin\_tq**Fin\_si**Fin\_pour3**Fin\_pour2**Fin\_pour1**Fin\_HAZOP*

**Processus de déroulement d'une AAD :***Début\_AAD*

Considérer\_un\_Evénement\_Final ;

**Label\_événement\_intermediaire :**

Identifier\_les\_causes () ; /\*Identification exhaustive des causes immédiates\*/

Définir\_les\_événements\_en\_question () ;

Lier\_ces\_événements () /\* liaisons graphiques par portes logiques\*/ ;

**Pour chaque Evénement faire**            *Début\_pour*            **Si cet Evénement est décomposable Alors** /\*n'est pas un événement de base\*/                *Début\_si*                **Goto** Label\_événement\_intermediaire ;                *Fin\_si*            *Fin\_pour**Fin\_AAD***ANNEXE 2: Evolution de la réglementation algérienne de l'étude de danger :**

Décret exécutif n°06-198 du 4 Joumada El Oula 1427 correspondant au 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.

**Art. 5.** — Toute demande d'autorisation d'exploitation d'un établissement classé est précédée, selon le cas et conformément à la nomenclature des installations classées:

- d'une étude ou d'une notice d'impact sur l'environnement établie et approuvée selon les conditions fixées par la réglementation en vigueur,
- d'une étude de danger établie et approuvée selon les conditions fixées par le présent décret,
- d'une enquête publique effectuée conformément aux modalités fixées par la réglementation en vigueur.

**Art. 12.** — L'étude de danger a pour objet de préciser les risques directs ou indirects par lesquels l'activité de l'établissement classé met en danger les personnes, les biens et l'environnement, que la cause soit interne ou externe.

L'étude de danger doit permettre de définir les mesures d'ordre technique propres à réduire la probabilité et les effets des accidents ainsi que les mesures d'organisation pour la prévention et la gestion de ces accidents.

**Art. 13.** — Les études de danger sont réalisées, à la charge du promoteur, par des bureaux d'études, des bureaux d'expertise ou des bureaux de consultation compétents en la matière et agréés par le ministre chargé de l'environnement, après avis des ministres concernés, le cas échéant.

**Art. 14.** — L'étude de danger doit comporter les éléments suivants :

- 1) une présentation générale du projet ;
- 2) la description de l'environnement immédiat du projet et du voisinage potentiellement affecté en cas d'accident comprenant :
  - a) les données physiques : géologie, hydrologie, météorologie et les conditions naturelles (topographie, sismicité,) ;
  - b) les données socio-économiques et culturelles : population, habitat, points d'eau, captage, occupation des sols, activités économiques, voies de communication ou de transport et aires protégées.
- 3) la description du projet et ses différentes installations (implantation, taille et capacité, accès, choix du procédé retenu, fonctionnement, produits et matières mis en œuvre,) en se servant au besoin de cartes (plan d'ensemble, plan de situation, plan de masse, plan de mouvement.) ;
- 4) l'identification de tous les facteurs de risques générés par l'exploitation de chaque installation considérée. Cette évaluation doit tenir compte non seulement des facteurs intrinsèques mais également des facteurs extrinsèques auxquels la zone est exposée ;
- 5) l'analyse des risques et des conséquences au niveau de l'établissement classé afin d'identifier de façon exhaustive les événements accidentels pouvant survenir, leur attribuer une cotation en terme de gravité et de probabilité permettant de les hiérarchiser, ainsi que la méthode d'évaluation des risques utilisée pour l'élaboration de l'étude de danger ;
- 6) l'analyse des impacts potentiels en cas d'accidents sur les populations (y compris les travailleurs au sein de l'établissement), l'environnement ainsi que les impacts économiques et financiers prévisibles ;
- 7) Les modalités d'organisation de la sécurité du site, les modalités de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité et des moyens de secours.

**Art. 15.** — Les modalités d'examen et d'approbation des études de danger sont fixées par arrêté conjoint des ministres chargés de l'intérieur et de l'environnement.

**Art. 47.** — Les établissements classés existants pour lesquels la nomenclature prévoit une étude de danger sont tenus, dans un délai n'excédant pas deux (2) ans à partir de la date de promulgation du présent décret, de réaliser une étude de danger.

---