

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Mémoire de post-graduation spécialisée en QHSE-GRI

Élaboration des procédures d'intervention pour un bac de  
stockage de Gaz Naturel Liquéfié

Cas du Bac 81TK-103 du Complexe de GNL

« GL1/K-SKIKDA-SONATRACH »

SI KADIR Madjid

Présenté et soutenu publiquement le 29 avril 2018

Composition du jury:

Président	:	Mr. Abdelmalek CHERGUI	Prof	ENP
Examineur	:	Mr. Mohamed BOUBAKEUR	MAA	ENP
Promoteur	:	Mr. Aboubakr KERTOUS	MAA	ENP

ENP 2018



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Mémoire de post-graduation spécialisée en QHSE-GRI

Élaboration des procédures d'intervention pour un bac de  
stockage de Gaz Naturel Liquéfié

Cas du Bac 81TK-103 du Complexe de GNL

« GL1/K-SKIKDA-SONATRACH »

SI KADIR Madjid

Présenté et soutenu publiquement le 29 avril 2018

Composition du jury:

Président	:	Mr. Abdelmalek CHERGUI	Prof	ENP
Examineur	:	Mr. Mohamed BOUBAKEUR	MAA	ENP
Promoteur	:	Mr. Aboubakr KERTOUS	MAA	ENP

ENP 2018

## **DEDICACE**

J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :

Ma très chère mère

Mon très cher père

Mes très chers frères

Mes chères Sœurs

Tous les membres de ma famille,

Ainsi qu'à tous mes amis

Et mes collègues de travail

**M.SI KADIR**

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier, en premier lieu, Dieu le tout puissant m'ayant accordé santé, courage et bonne foi afin que je puisse achever ce modeste travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur A.KERTOUS, mon promoteur qui m'a fait confiance en me confiant ce sujet, et m'a épaulé et encouragé dans mon travail.

Mes remerciements vont ensuite à Mes enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et à tous l'encadrement de Post-Graduation Spécialisée en QHSE-GRI, ainsi que les membres de jury.

En outre, Je tiens à remercier la direction générale de la protection civile qui ma donner la chance d'avoir cette formation, ainsi que tous mes responsables de la protection civile.

## ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة تأمين خزان الغاز الطبيعي المميع لقسم سونا طراك GL1/K من خلال اعداد طرق التدخل في حالة تسرب غاز الطبيعي المميع .

في المقام الأول، قمنا بدراسة المخاطر و ذلك باستعمال طريقة تحليل المخاطر الأولية على النظام المدروس، و ذلك بهدف استخراج الأحداث المروعة ، أسبابها ، نتائجها ، تصور سيناريوهات و كذا تقدير احتمالات حدوثها. ثم قمنا في المرحلة التالية بدراسة معمقة للمخاطر من خلال تطبيق طريقة شجرة الأعطاب، و التي من خلالها تمكنا من استخراج و بصفة متتابعة للخطر الرئيسي ، و الذي هو تسرب الغاز الطبيعي المميع من داخل الخزان ، ثم رسم شجرة الأعطاب بواسطة التطبيق الآلي، و حساب قيم احتمالات وقوع كل حدث غير مرغوب فيه. بعدها تطرقنا إلى استعمال طريقة شجرة العواقب والتي سمحت لنا باستخراج مختلف العواقب التي تنتج عن تسرب الغاز و إعطاء قيم عددية لاحتمالات وقوعها.

و بمزج الطريقتين السابقتين ، استخرجنا ما يسمى بعقدة الفراشة و رسمها في مخطط شامل يوضح و بصفة شاملة أسباب و عواقب تسرب الغاز الطبيعي من الخزان (TK-103). آخر مرحلة، و استعانة بطرق رياضية تم تحاكي الواقع باستعمال التطبيق الآلي ( فاست )، ثم تقييم ما قد ينتج عن حادث انفجار غازات المتسربة من ظواهر خطيرة.

و في الأخير تطرقنا إلى اعداد طرق التدخل في حالة تسرب الغاز الطبيعي المميع وحساب الاحتياجات من الماء و الرغوة الواجب توفيرها.

## الكلمات الدالة:

الغاز الطبيعي المميع ، دراسة أولية للمخاطر، تسرب الغاز الطبيعي المميع، شجرة الاعطاب، شجرة العواقب، عقدة الفراشة، ظواهر خطيرة، طرق التدخل .

## Abstract

This work consists of to develop response procedures in case of loss of containment in an LNG storage tank at SKIKDA-SONATRACH GL1/K complex.

First, a risk analysis study was developed using the APR method to identify sources of danger, The next step is a detailed study of the loss of containment in the bin where we used the failure tree that allowed us to identify events whose sequencing can lead to this loss of containment, then design the tree and calculate the probabilities with the software Tree-Analyst.

With the ADE method it was possible to calculate the probability of the occurrence of the dangerous phenomena and taking into account the SIS of the tank by calculating the PFD of

the SIS with software GRIF, then a summary diagram of the causes and consequences of the loss of confinement by a bow knot.

A simulation of the effects of the hazards is made with the PHAST software, and at the end elaboration of the intervention procedures for an LNG leak, and the calculation of the need for water and foam to realize a preventive foam mat.

### **Key words:**

Liquefied Natural Gas, Preliminary risk analysis, dangerous phenomenon, fault tree, loss of containment, event tree, bow knot, response procedures.

### **Résumé**

Ce travail consiste à élaborer des procédures d'intervention en cas de perte de confinement dans un bac de stockage du GNL au niveau du complexe GL1/K de SKIKDA-SONATRACH.

En premier lieu, une étude d'analyse des risques a été élaborée à l'aide de la méthode APR pour identifier les sources de danger, L'étape suivante est une étude détaillée de la perte de confinement dans le bac où on a utilisé l'arbre de défaillance qui nous a permis l'identification des évènements dont l'enchaînement peut conduire à cette perte de confinement, ensuite designer l'arbre et calculer les probabilités avec le logiciel Arbre-Analyste.

Avec la méthode ADE on a pu calculer la probabilité de la survenance des phénomènes dangereux et prenant en considération le SIS du bac en calculant le PFD du SIS avec logiciel GRIF, ensuite un schéma récapitulatif des causes et conséquences de la perte de confinement par un Nœud-papillon.

Une simulation des effets des phénomènes dangereux est faite avec le logiciel PHAST ,et à la fin élaboration des procédures d'intervention pour une fuite de GNL ,et le calcul des besoin en eau et en mousse pour réaliser un tapis de mousse préventif.

### **Mots clés :**

Gaz Naturel Liquéfié, Analyse préliminaire des risques, Phénomènes dangereux, Arbre de défaillance, perte de confinement. Arbre d'événement, Nœud-Papillon, Procédures d'interventions.

# TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

Introduction générale : .....16

## **Chapitre I : Présentation du complexe GL1/K de SKIKDA.**

I-1- Introduction.....18

I-2- Présentation du complexe GL1/K : .....18

I-3- Caractéristiques et capacité de production : .....21

I-4- Capacité totale de stockage : .....22

I-5- Description générale de l'activité du complexe : .....22

I-6- Principe de liquéfaction du gaz naturel : .....24

I-7- Présentation du train de liquéfaction : .....25

I-8- Conclusion : .....31

## **Chapitre II : Généralités sur le Gaz Naturel Liquéfié et les réservoirs de stockage.**

II-1- Introduction : .....33

II-2- Historique : .....33

II-3- La production mondiale du GNL.....33

II-4- Caractéristiques du GNL : .....34

II-5- Dangers liés au GNL : .....37

II-6- Accident liés au traitement de GNL : .....43

II-7- Caractéristiques générales des réservoirs : .....50

II-8- Différents types de stockage du GNL : .....51

II-9- Avantages et inconvénients des réservoirs aériens à simple intégrité : .....54

II-10- Description de système de stockage du bac 81T-103 : .....55

II-11- Conclusion : .....59

### **Chapitre III : Présentation des méthodes d'analyse.**

III-1- Introduction :	61
III-2- La méthodes d'analyse fonctionnelle SADT :	61
III-3- Analyse préliminaire des risques (APR) :	62
III-4- Arbre de défaillance (AdD) :	69
III-5- Arbre d'évènements (ADE) :	72
III-6- Nœud-Papillon :	73
III-7- Conclusion :	77

### **Chapitre IV : Application des méthodes d'analyse sur le bac 81TK-103.**

IV-1- Introduction :	79
IV-2- Application de l'APR :	79
IV-3- Application de l'AdD :	83
IV-4- Application de l'ADE :	87
IV-5- Application de Nœud-Papillon :	92
IV-6- Conclusion :	95

### **Chapitre V : Simulation des phénomènes dangereux.**

V-1- Introduction :	97
V-2- Données métrologiques :	97
V-3- Description de l'environnement externe du bac TK-103 :	98
V-4- Simulation des conséquences d'événements :	99
V-5- Résultats de la simulation :	101
V-6- Conclusion :	110

### **Chapitre VI : Procédures d'intervention pour le bac 81TK-103.**

VI-1-Introduction:	112
VI-2- Procédure d'intervention pour Fuite de GNL :	113
VI-3- Procédure d'intervention pour feu de nappe :	115
VI-4- Procédure d'intervention pour une explosion :	117

VI-5-Besoin en eau et en émulseur pour la réalisation d'un tapis de mousse préventif en cas de fuite de GNL :.....	118
VI-6-Conclusion :.....	118
Conclusion générale :.....	119

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1: Principaux produits du complexe.

Tableau I.2: Caractéristiques du gaz naturel d'alimentation du complexe.

Tableau II.1: Accidents liés à la liquéfaction du GNL survenus sur le complexe GL1/K.

Tableau II.2: Accidents liés au stockage et chargement du GNL survenus sur le complexe  
GL1/K.

Tableau II. 3: Accidents liés à la liquéfaction du GNL survenus sur des installations  
similaires.

Tableau II.4: Accidents liés au stockage du GNL survenus sur des installations similaires.

Tableau II.5: Accidents liés au chargement-déchargement du GNL survenus sur des  
installations similaires.

Tableau III.1: Déploiement type de l'APR.

Tableau III.2: Grille de cotation de la probabilité.

Tableau III.3: Grille de cotation de la gravité.

Tableau III.4 : Grille de criticité.

Tableau III.5 : Evénements composant un Nœud-Papillon.

Tableau IV.1 : Répartition des risques après l'application des mesures préventifs.

Tableau IV.2 : Résultats de l'APR après l'application des mesures préventifs.

Tableau IV.3 : Répartition des risques après l'action des EIPS.

Tableau IV.4 : Résultats de l'APR après l'action des EIPS.

Tableau IV.5 : Scénario le plus probable.

Tableau IV.6 : Donnée de fiabilité relative aux éléments constituant le SIS.

Tableau IV.7: Probabilité d'ignition instantanée pour une installation fixe.

Tableau IV.8: Probabilité d'ignition en une minute.

Tableau V.1: Les installations les plus proches du bac TK-103.

Tableau V.2: Seuil des effets thermiques.

Tableau V.3: Seuil des effets de surpression.

Tableau V.4: Données de simulation des scénarios.

Tableau V.5: Installations et population exposées aux seuils des effets thermiques immédiats du feu de nappe.

Tableau V.6: Installations et population exposées aux seuils des effets thermiques retardés du feu de nappe.

Tableau V.7 : Installations et Population exposées aux Flash-Fire.

Tableau V.8: Installations et population exposées aux seuils des effets de surpression.

Tableau V.9 : Résultats finals de la simulation.

## **LISTE DES FIGURES**

Figure I.1 : Zone industrielle de SKIKDA.

Figure I.2 : Vue aérienne du complexe GL1/K.

Figure I.3 : Situation géographique de GL1/K.

Figure I.4 : Vue panoramique du complexe GL1/K.

Figure I.5 : Organisation du complexe GL1/K de Skikda.

Figure I.6: Schéma des Unités du complexe GL1/K.

Figure I.7: Schéma de l'unité de liquéfaction de gaz naturel.

Figure I.8: Schéma de l'unité fractionnement des sous-produits.

Figure I.9: Postes de chargement du GNL (M1 et M2).

Figure I.10: Différentes unités de la section utilités.

Figure II.1 : Exportateur du GNL dans le monde pour l'année 2015.

Figure II.2 : Chaîne de transport du gaz naturel liquéfié.

Figure II.3 : Représentation des LIE et LIS du Méthane.

Figure II.4 : Exemple de réservoir à simple intégrité.

Figure II.5 : Réservoirs à membrane.

Figure II.6 : Réservoir aériens à intégrité totale.

Figure II.7 : Réservoirs enterrés.

Figure II.8 : Réservoir semi-enterré.

Figure II.9 : Schéma simplifié d'un bac de stockage cryogénique.

Figure II.10 : Système de stockage du bac TK-103 du complexe GL1/K.

Figure II.11 : Image du bac TK-103.

Figure III.1 : Modèle de diagramme de la méthode SADT.

Figure III.2 : Hiérarchies des diagrammes des niveaux.

Figure III.3: Exemple de l'Add.

Figure III.4 : Schéma d'un Nœud Papillon.

Figure IV.1 : Décomposition fonctionnelle par la SADT des activités de complexe GL1/K.

Figure IV.2 : Actigramme SADT du système stockage GNL.

Figure IV.3 : Interface du logiciel Arbre-Analyste.

Figure IV.4 : Arbre de défaillance d'une perte de confinement de GNL.

Figure IV.5 : Pourcentage de la contribution des événements de base à la survenance de l'ER .

Figure IV.6 : Interface du logiciel GRIF.

Figure IV.7 : Architecture du SIS.

Figure IV.8 : PFD du SIS.

Figure IV.9: Arbre d'événement d'une fuite moyenne au niveau du bac TK-103.

Figure IV.10 : Nœud-Papillon de perte de confinement au niveau du bac TK-103.

Figure V.1 : Rose des vents annuelle de SKIKDA.

Figure V.2 : Distribution fréquentielle de quatre classes de vents.

Figure V.3 : Variation des concentrations du gaz dispersé en fonction de la distance.

Figure V.4 : Variation des concentrations du gaz dispersé.

Figure V.5 : Variation des radiations thermiques immédiates du feu de nappe en fonction de la distance.

Figure V.6 : Image de variation des radiations thermiques immédiates du feu de nappe.

Figure V.7 : Variation des radiations thermiques retardées du feu de nappe en fonction de la distance.

Figure V.8 : Image de variation des radiations thermiques retardées du feu de nappe.

Figure V.9 : Courbe de variation des concentrations et la plage d'inflammabilité du gaz dispersé en fonction de la distance.

Figure V.10 : Image de variation des concentrations et la plage d'inflammabilité du gaz dispersé (Flash-Fire).

Figure V.11 : Variation des effets de surpression de l'UVCE en fonction de la distance.

Figure V.12 : Image de variation des effets de surpression de l'UVCE.

Figure VI.1 : Procédure d'intervention pour fuite de GNL.

Figure VI.2 : Procédure d'intervention pour feu de nappe.

Figure VI.3 : Procédure d'intervention pour une explosion.

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

<b>APCI</b>	Air Product and Chemicals Incorporation
<b>APR</b>	Analyse Préliminaire des Risques
<b>AMDEC</b>	Analyse des Modes de Défaillances et leur Criticité
<b>AdD</b>	Arbre de Défaillance
<b>ADE</b>	Arbre d'évènements
<b>ALARP</b>	As low as reasonably practicable
<b>BOG</b>	Boil-Off Gas
<b>BLEVE</b>	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
<b>CP1K</b>	Complexe de Matières Plastiques
<b>DRIK</b>	Direction Régionale Industrielle de Skikda.
<b>DCS</b>	Système de Control Digital
<b>ENIP</b>	Entreprise Nationale Industries Pétrochimiques
<b>ER</b>	Evènement Redouté
<b>EdB</b>	Evènement de Base
<b>ERC</b>	Evènements Redouté Central
<b>EIPS</b>	Equipement Important pour la Sécurité
<b>HAZOP</b>	Hazard Oprability
<b>GNL</b>	Gaz Naturel Liquéfié
<b>GPL</b>	Gaz Pétrole Liquéfié
<b>GN</b>	Gaz Naturel
<b>GNT</b>	Gaz Naturel Traité
<b>KBR</b>	Firme américaine Kellog Brown & Root
<b>LQS</b>	Liquéfaction
<b>LSI</b>	Limite Supérieure d'Inflammabilité
<b>LII</b>	Limite Inférieure d'Inflammabilité

<b>ORSEC</b>	Organisation des Secours
<b>PNB</b>	Produit Nationale Brute
<b>PCF</b>	Process Flow Diagram (Plan de Circulation des Fluide)
<b>PID</b>	Piping Instrumentation Diagram (Diagramme des Processus et de l'instrumentation)
<b>PFD</b>	Probabilité moyenne de défaillance sur demande
<b>PHAST</b>	Process Hazard Analysis Software Tool
<b>PAM</b>	Plan d'Assistance Mutuelle
<b>RTE</b>	Centrale Thermique Electrique de SONELGAZ
<b>RA1K</b>	Complexe de Raffinage de SKIKDA
<b>SOMIZ</b>	Société de Maintenance Industrielle d'ARZEW
<b>SOMIK</b>	Société de Maintenance Industrielle de Skikda
<b>STH</b>	Société de Transport d'Hydrocarbures.
<b>SADT</b>	Structured Analysis and Desing Technique
<b>SIS</b>	Systèmes Instrumentés de Sécurité
<b>TRP</b>	Transition Rapide de Phase
<b>UVCE</b>	Unconfined Vapour Cloud Explosion

# **INTRODUCTION GENERALE**

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Le commerce international du gaz naturel est en plein développement. Ces dernières années l'Algérie y joue un rôle actif puisque son économie est basée essentiellement sur l'exportation des hydrocarbures, dont le GNL présente la plus grande partie.

L'Algérie dispose d'une réserve de gaz considérable dans la zone de HASSI R'MEL. Une partie importante de ce gaz, est transportée vers la zone industrielle de SKIKDA, pour cela l'Algérie développe de plus en plus l'industrie de liquéfaction du gaz naturel qui nécessite des moyens lourds et une précision dans les paramètres de liquéfaction.

Après l'accident survenu le 19 janvier 2004 au complexe de liquéfaction de gaz naturel de Skikda GL1/k qui a occasionné des dégâts considérables et a provoqué la destruction totale des trains 20, 30, 40, la directive générale relative à la sécurité des installations et des travailleurs stipule que toutes les structures et unités du groupe SONATRACH à tous les niveaux doivent mettre la prévention au cœur de la stratégie de la sécurité.

Le risque engendré par cette industrie est très important et la gestion des risques est nécessaire pour les complexes du GNL afin d'éviter la survenance des accidents.

Afin d'assurer la sécurité dans les sites industriels et lutter contre les accidents industriels, une identification et évaluation des risques est indispensable pour aboutir à des procédures d'interventions.

L'objectif de ce travail est d'élaborer des procédures d'intervention pour faire face à des accidents et ce après avoir identifier et évaluer les risques liés au stockage du GNL au niveau du bac 81TK-103 du complexe GL1/K de SKIKDA.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter brièvement le complexe GL1/K ainsi que le procédé de liquéfaction.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur le GNL et à la description du système de stockage.

Le troisième chapitre présente les méthodes d'analyses que nous allons appliquer dans le chapitre quatre pour l'identification et l'évaluation des risques dans le bac de stockage.

Dans le cinquième chapitre nous présenterons les résultats de la simulation des effets des événements dangereux

Dans le sixième chapitre, nous allons élaborer des procédures d'intervention afin d'en faire face, en cas de perte de confinement. et à la fin une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I**

## **Présentation du Complexe GL1/K**

## **I-1- Introduction :**

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, dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par Méthaniers.

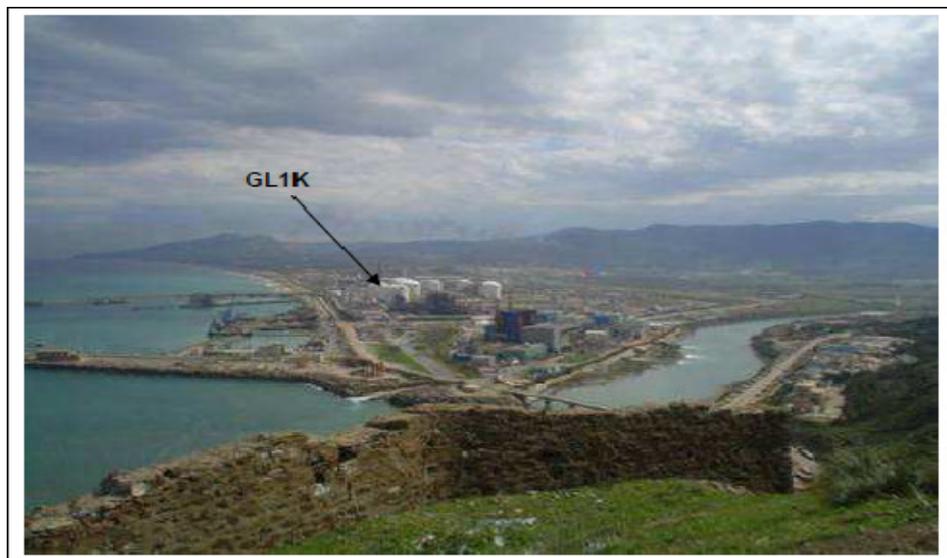
Le complexe de GL1/K de Skikda fait partie de ces usines. Son activité principale est la liquéfaction du gaz naturel et la séparation des produits : éthane, propane, gazoline et isobutane.

## **I-2-Présentation du complexe GL1/K :**

### **I-2-1-Localisation et accès :**

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL1/K relève de la branche LQS de l'entreprise SONATRACH. Il est situé à environ quatre kilomètres à l'Est de la ville de Skikda, Wilaya de Skikda située au Nord- Est de l'Algérie et est implanté dans la zone Industrielle de Skikda située dans le Golfe de Stora.

Sa capacité annuelle de production est de 13,2 millions de m<sup>3</sup> de gaz naturel liquéfié et une capacité de stockage de 340 000 m<sup>3</sup> de GNL. Il emploie 1200 travailleurs permanents (Figure I.1) [1].



**Figure I.1 : Zone industrielle de SKIKDA [1].**

Ce complexe s'étend sur une superficie de près de 73 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.

Les établissements à proximité du complexe GL1K sont :

- A l'est, le complexe de matières plastiques CP1K (Entreprise Nationale Industries Pétrochimiques – ENIP) et les installations de la société HELISON (filiale de SONATRACH).
- Au sud, la Société de Maintenance Industrielle de Skikda (SOMIK) et la Direction Régionale Industrielle de Skikda (DRIK).
- A l'ouest, la centrale thermique électrique de SONELGAZ (RTE) et la branche commerciale de SONATRACH.
- Au nord, le nouveau port et la Société de Transport d'Hydrocarbures (STH).



**Figure I.2 :** Vue aérienne du complexe GL1/K de Skikda.



**Figure I.3 :** Situation géographique de GL1/K de Skikda [2].



**Figure I.4 :** Vue panoramique du complexe GL1/K de Skikda [1].

### **I-2-2-Historique du complexe :**

Le chantier du complexe GL1/K a débuté en mars 1969 et la date en mise en service de la production du premier train du complexe GL1/K a eu lieu en novembre 1972.

Les trois premières unités du GNL (10 – 20 – 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 de GPL a été construite par la société japonaise IHI, son démarrage initial fut en septembre 1973.

La rénovation du complexe s'est déroulée entre 1991 et 1999 [1].

### **I-2-3-Mission du complexe :**

Le complexe GL1/K a pour mission de liquéfier le gaz naturel provenant des champs gaziers de HASSI R'MEL, avec la possibilité d'extraction de l'Ethane, propane, du butane et

de la gazoline. Le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) est pompé est chargé dans des méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique pour être expédié vers l'étranger.

### I-2-4- Organisation du complexe GL1/K :

L'organisation du complexe GL1K est représentée dans l'organigramme suivant :

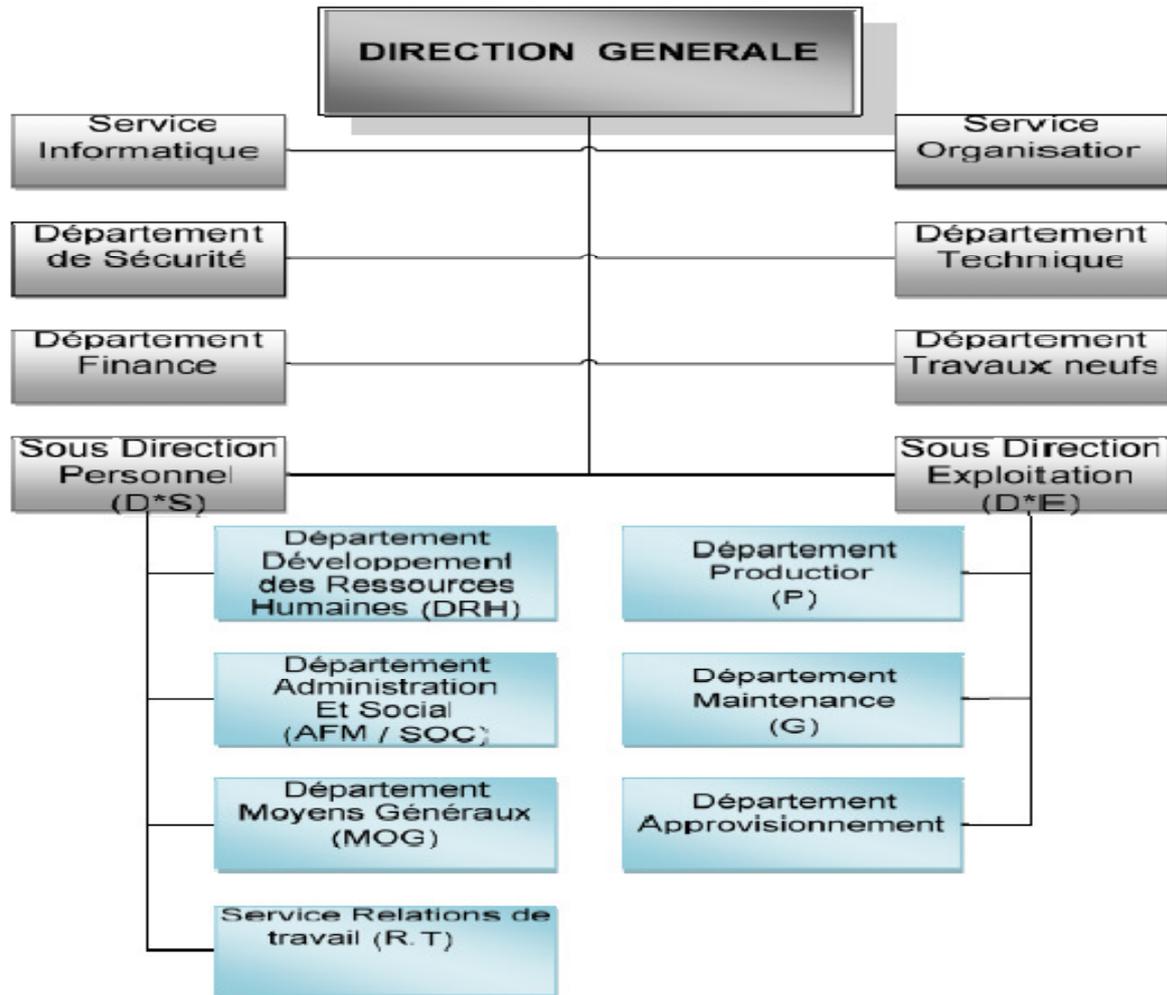


Figure I.5 : Organisation du complexe GL1/K de Skikda [1].

### I-3- Caractéristiques et capacité de production :

Le train de liquéfaction a été conçu pour une capacité de production de 4,5 millions de tonnes de GNL par an, et peut fonctionner avec ou sans extraction des sous-produits (Ethane, Propane, Butane, Gazoline).

Une charge de gaz enrichi en Hélium est également produite pour alimenter l'usine de production d'Hélium (Hellison). En retour, cette dernière renvoie de l'azote gazeux et du fuel gaz (48 % azote et 52 % méthane) vers le complexe [2].

Les principaux produits du complexe sont représentés dans le Tableau I.1 :

**Tableau I.1:** Principaux produits du complexe [2]

<b>Produits finis</b>	<b>Quantités (t / an)</b>
GNL	4 500 000
Ethane	164 700
Propane	207 600
Butane	171 400
Gazoline	108 700
Gaz enrichi en He (Nm <sup>3</sup> /an)	1 630 000

#### **I-4-Capacité totale de stockage :**

- Un bac de stockage de GNL de 150 000 m<sup>3</sup>.
- Deux anciens bacs de stockage de GNL d'une capacité de 70.000 m<sup>3</sup>.
- Un bac de stockage de propane de capacité totale de 66 000 m<sup>3</sup>.
- Un bac de stockage de butane de capacité totale de 66 000 m<sup>3</sup>.
- Une sphère de stockage de gazoline de capacité totale de 3 760 m<sup>3</sup>.

#### **I-5-Description générale de l'activité du complexe :**

Le complexe GL1/K comprend les installations de réception du gaz naturel produit par les champs gaziers de HASSI R'MEL, qui se situent à 550 km au sud d'Alger.

Après traitement dans les trains de liquéfaction, le gaz liquéfié est stocké à la température d'environ - 162°C dans trois bacs cryogéniques d'une capacité totale de 196 000 m<sup>3</sup> avant d'être exporté.

Le complexe de liquéfaction du gaz naturel comprend actuellement :

- 03 unités de liquéfaction.
- une unité de stockage et de chargement de GNL.
- une unité de traitement, de stockage et d'expéditions de GPL.
- une unité de production d'isobutane.
- les unités annexes / utilités (stockage gazoline, réseaux de torche...).

A sa sortie du gisement de HASSI R'MEL, le gaz naturel (GN) est un mélange d'hydrocarbures dont la teneur en méthane est supérieur 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><sup>+</sup>).

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, ainsi que des impuretés sous forme de poussières.

Le tableau suivant représente les caractéristiques du gaz naturel d'alimentation du complexe :

**Tableau I.2:** Caractéristiques du gaz naturel d'alimentation du complexe [2]

Composants	Pourcentage molaire (%)
He	0.17
N <sub>2</sub>	5.60
CO <sub>2</sub>	0.18
C <sub>1</sub>	82.27
C <sub>2</sub>	6.92
C <sub>3</sub>	2.15
iC <sub>4</sub>	0.33
nC <sub>4</sub>	0.52
iC <sub>5</sub>	0.09
nC <sub>5</sub>	0.11
C <sub>6</sub>	0.13

Le gaz naturel alimentant l'unité de liquéfaction doit subir au préalable, un prétraitement afin de lui enlever les traces de gaz contaminants susceptibles de se solidifier lors du refroidissement. Le train de liquéfaction se compose de plusieurs unités qui sont présentées sur la figure I.6.

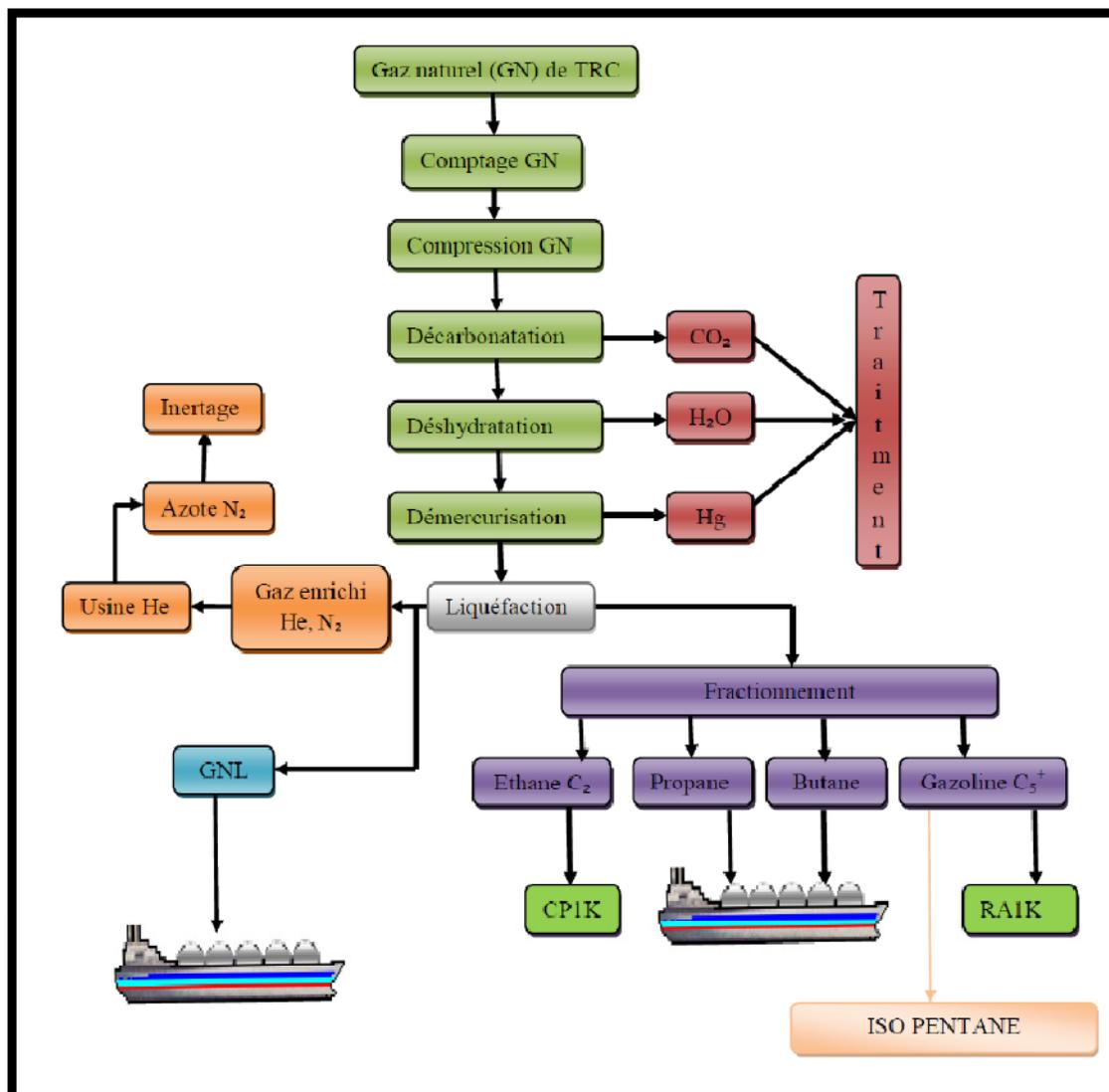


Figure I.6: Schéma des Unités du complexe GL1/K [1]

### I-6-Principe de liquéfaction du gaz naturel :

Le principe de liquéfaction de gaz naturel consiste à abaisser son enthalpie par réfrigération jusqu'à une température de stockage de  $-162^{\circ}C$ .

Basé sur ce principe, le complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1/K a été conçu pour assurer le transport de gaz naturel provenant de HASSI R'MEL sous forme liquide.

L'usine comprend un Méga train de production, où le gaz naturel d'alimentation est traité pour éliminer le gaz carbonique, la vapeur d'eau ainsi que le mercure. Il est ensuite réfrigéré pour extraire les hydrocarbures lourds afin d'être liquéfié.

Une fois le gaz naturel liquéfié, il est envoyé par pompage dans les réservoirs de stockage puis chargé dans les méthaniers à partir des postes de chargement pour le transport.

## **I-7- Présentation du train de liquéfaction:**

Le train de liquéfaction est situé à l'intérieur du complexe GL1K, au Nord-Ouest d'ancienne unité 10. Il a été conçu pour remplacer les unités 20, 30, et 40 qui ont été détruites lors de l'incident de l'année 2004.

Sa construction a été confiée à la firme américaine Kellog Brown & Root (KBR) suite à un appel d'offre lancé par SONATRACH en 2006. Les travaux de construction ont commencé le 28 Septembre 2007, tandis que la mise en production a été effectuée le 27 Mars 2013.

Il est alimenté en gaz naturel (GN) à partir de HASSI R'MEL via un gazoduc d'une longueur de 580 Km et de 40" de diamètre. La capacité du traitement de gaz naturel de ce train est de 126 millions m<sup>3</sup> par an.

Ce train utilise le procédé APCI (C3MR-Split MR) à voie sèche. Les différences fondamentales par rapport au procédé APCI classique de GL1Z, GL2Z sont les suivantes :

- Remplacement des condenseurs à eau de mer par des aéro-réfrigérants pour la condensation du MR (Mixed Refrigerant).
- Les compresseurs MR et propane sont entraînés par des turbines à gaz (pas d'utilisation de la vapeur).
- Des expanders remplacent les vannes d'injection de MR dans l'échangeur cryogénique.
- La pression du gaz à l'entrée est remontée à 66 bars.

Le train de liquéfaction se compose des unités suivantes :

### **I-7-1- Unité « Comptage du gaz naturel » :**

Le système de comptage installé, mesure et comptabilise tout le gaz naturel entrant aux anciennes unités du complexe GL1/K et du train de liquéfaction. Le comptage sert à fournir les éléments nécessaires pour :

- Le calcul des divers bilans de l'usine et de l'autoconsommation.
- Le calcul des quantités consommées pour les besoins de facturation.

### **I-7-2- Unité « compression du gaz naturel » :**

A la sortie du système de comptage (42 bars et 25 °C) le GN est comprimé jusqu'à 66 bars pour faciliter sa liquéfaction.

### **I-7-3-Unité « Traitement du gaz » :**

Avant la liquéfaction, le gaz naturel doit subir des traitements pour être débarrassé de trois éléments nuisibles au fonctionnement de l'installation :

- Le CO<sub>2</sub>
- L'eau.
- Le mercure.

#### **a) Décarbonatation du gaz naturel :**

Elle sert pour réduire la teneur en CO<sub>2</sub> de 0.18 % à 50 ppm-v pour éviter sa solidification dans la section liquéfaction. Elle utilise le procédé BASF utilisant Méthyle Diethanol Amine activé (MDEA) et une colonne de garnissage en vrac. Le solvant utilisé est de 60 % massique d'eau et 40 % massique de l'MDEA.

#### **b) Déshydratation du gaz naturel :**

Durant le processus de liquéfaction, le gaz naturel est refroidit progressivement de 35°C à -162 °C. Dans la même étape, l'eau contenue dans le gaz naturel, s'il n'était pas extrait, il se solidifierait et provoquerait l'obturation de l'échangeur principal.

#### **c) Démercurisation du gaz naturel :**

Le système de démercurisation est situé en aval du système de déshydratation et en amont de la colonne de lavage. Il est conçu pour éliminer le Mercure du gaz d'alimentation et empêcher la corrosion des sections cryogéniques de l'usine.

### **I-7-4-Unité « Liquéfaction et Extraction de gaz riche en He » :**

Le train de liquéfaction utilise dans cette unité le procédé APCI (Air Product and Chemicals Incorporation) qui est constitué de :

- **Une boucle de réfrigération (pré-refroidissement) au propane comprenant :**
  - Un décompresseur principal de propane à 4 corps (51,8 MW) est entraîné par une turbine à gaz type FRAME 7 (82.9 MW). Sur le même arbre est attelé un moteur d'assistance au démarrage (helpermotor) de 17 M W.
  - Une batterie d'évaporateurs.
  - Une batterie d'aéro-réfrigérants.

Le rôle de cette boucle de réfrigération est de pré-refroidir environ 2/3 du réfrigérant principal (Mixed Réfrigérant "MR") de 40°C à -36°C et pré-refroidir le gaz naturel décarbonaté et sec de 22°C à -35°C avant son entrée dans l'échangeur principal cryogénique.

➤ **Une boucle de réfrigération au réfrigérant mixte (MR), comprenant :**

- Un compresseur à 3 corps est entraîné par une turbine à gaz de type FRAME 7 (83.3 MW). Sur le même arbre est attelé un moteur d'assistance au démarrage de 17 MW.
- Une batterie d'évaporateurs.
- Une batterie d'aéro-réfrigérants.

Le rôle de cette boucle de réfrigération est de refroidir et liquéfier le gaz naturel dans l'échangeur principal cryogénique.

➤ **Une boucle externe de réfrigération au propane comprenant :**

- Un compresseur de propane à 4 corps (22MW) est entraîné par une turbine à gaz de type FRAME5 (31MW).
- Une batterie d'évaporateurs.
- Une batterie d'aéro-réfrigérants.

Cette boucle de réfrigération au propane est utilisée pour pré-refroidir environ 1/3 du réfrigérant principal de 40°C à -36°C et assurer la réfrigération pour les échangeurs de l'unité de fractionnement.

➤ **Un échangeur principal de type bobiné pour la liquéfaction :**

Cet échangeur est constitué d'une calandre et de plusieurs faisceaux de tubes en aluminium enroulés autour d'un noyau central.

Le fluide réfrigérant utilisé est du MR, est fabriqué à partir des constituants du gaz naturel produits dans l'unité de fractionnement [3].

La composition en % mole du MR est la suivante :

- Azote = 5.22 %
- Méthane = 48.90 %
- Ethane = 37.15 %
- Propane = 8.73 %

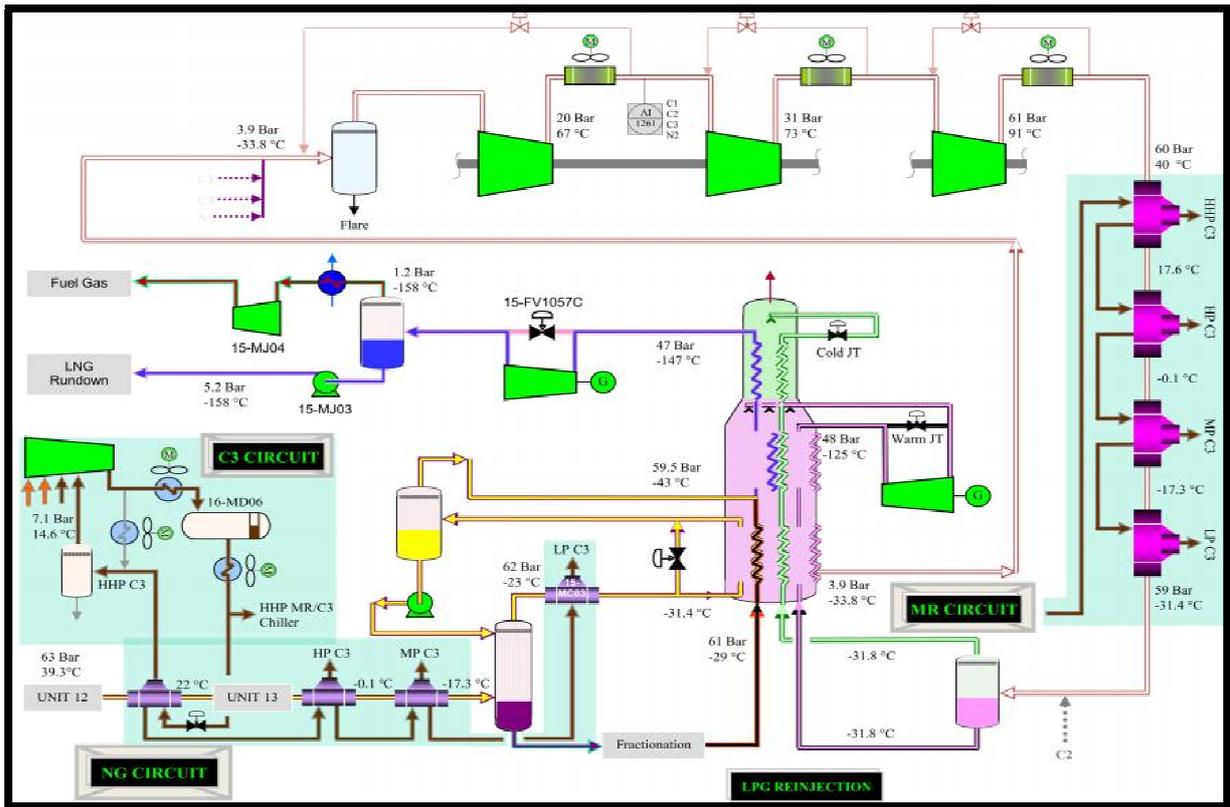


Figure I.7: Schéma de l'unité de liquéfaction de gaz naturel [3]

### I-7-5- Unité « fractionnement » :

L'unité de fractionnement a pour but de séparer les constituants dits "lourds" du gaz naturel, ceci afin de respecter les spécifications commerciales du GNL. Ces constituants sont l'éthane, le propane, le butane et la gazoline ( $C_5^+$ ) (Figure I.8).

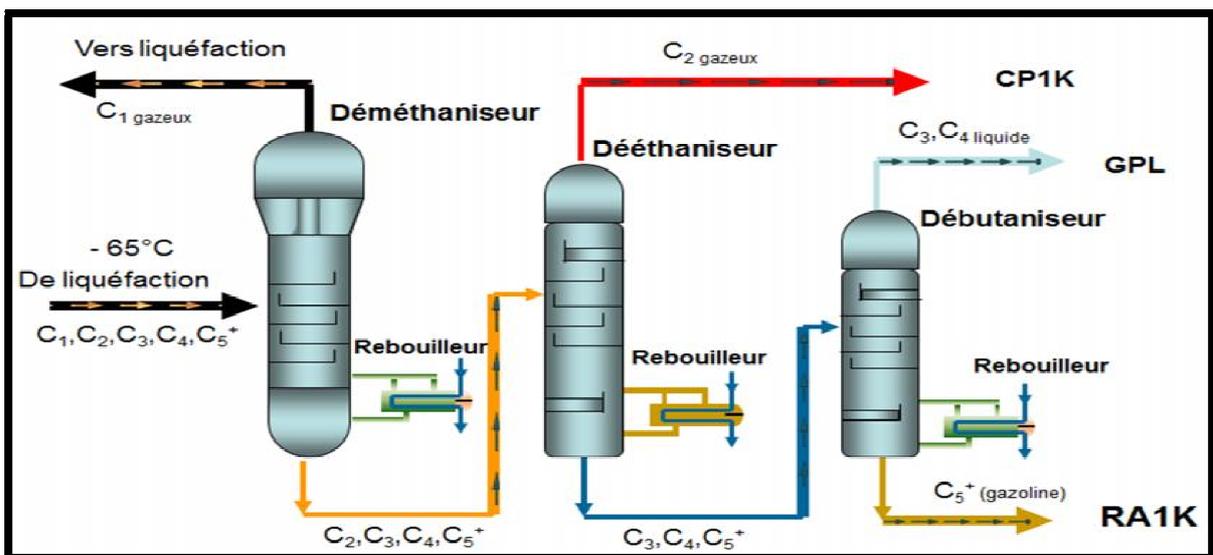


Figure I.8: Schéma de l'unité fractionnement des sous-produits [3]

## **I-7-6- Unité « Stockage et Expédition du GNL » :**

### **I-7-6-1- Stockage du GNL :**

Le parc de stockage de GNL est constitué de 3 bacs aériens à double paroi et à toit suspendu en aluminium.

Le GNL est ainsi stocké à une température de  $-161.4^{\circ}\text{C}$  et à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique.

Le maintien de pression dans les bacs de stockage est assuré par :

- Une mise à la torche des évaporations (« boil-off gas » - BOG), en commun avec la vapeur produite pendant des opérations de chargement des navires ;
- L'injection de gaz de couverture dans les bacs de stockage.

En l'absence de chargement, une circulation de GNL par l'intermédiaire des pompes P213 A/B (de type « carter ») est assurée pour maintenir en froid les lignes de chargement.

### **I-7-6-2- Expédition du GNL :**

A partir des bacs de stockage, le GNL est acheminé dans deux lignes de coulée par des pompes de transfert aux deux postes de chargement M1 et M2.

Cette section est principalement composée des équipements suivants :

- le séparateur d'évent D201.
- les pompes de chargement P212 C/D, de type « guinard ».
- les pompes de chargement P212 E/F, immergées et de type « carter ».
- le poste de chargement M1 comprenant :
  - les 3 bras LA-1, LA-2 et LA-3 de chargement du GNL.
  - le bras LA-4 de retour vapeur depuis les navires.
  - le ballon B-01 de purge des bras de chargement.
- le poste de chargement M2 comprenant :
  - les 3 bras Y-03 A/B/C de chargement du GNL.
  - le bras Y-04 de retour vapeur depuis les navires.
  - le ballon B-02 de purge des bras de chargement.



**Figure I.9:** Postes de chargement du GNL (M1 et M2) [2]

#### **I-7-7- Unité « Stockage et Expédition du GPL » :**

Les fonctions de l'unité GPL sont :

- de fractionner le bupro issu des unités de liquéfaction.
- d'assurer le stockage du propane et du butane issu :
  - du fractionnement du bupro.
  - des unités de liquéfaction 5P et 6P.
  - de la raffinerie RA1K.
- d'expédier le propane et le butane vers :
  - les postes de chargement de navires (chargement réfrigéré, chargement sous pression).
  - le centre enfûteur connexe au complexe GL1K.
  - le centre enfûteur KHROUBE à proximité de la ville de Constantine.
  - le poste de chargement de camions-citernes (uniquement pour le butane lors des périodes hivernales)

#### **I-7-8- Unité « Production d'isobutane » :**

Les fonctions de cette unité sont :

- de produire de l'isobutane à partir des alimentations en butane en provenance de l'unité GPL et des unités de liquéfaction 5P/6P.

- de l'expédier vers l'unité POLYMED.

Les colonnes de fractionnement présentes au sein de l'unité de production d'isobutane sont les suivantes : dépropaniseur et déisobutaniseur.

### **I-7-9- Unité « Production de vapeur » :**

La chaudière est conçue pour transformer l'eau en vapeur surchauffée à une pression et une température bien déterminée dont 80% de la quantité sert à entraîner le turbocompresseur de cycle.

Les 20% restants sont utilisés par les consommateurs suivants :

- Les auxiliaires de la chaudière (turbopompes alimentaires, turbo-ventilateur).
- Le compresseur de gaz de combustible (pour les unités 5P et 6P).
- La section « Traitement du gaz ».
- La section « Fractionnement ».

### **I-7-10- Unité « Utilités » :**

Le rôle des utilités est de fournir les éléments nécessaires au fonctionnement du train de GNL et de gérer les réseaux communs qui le composent.

Ces unités produisent et distribuent : l'énergie électrique, l'air de service et l'air instrument.

Elles gèrent également les systèmes : torches, eaux diverses, azote...

## **II-8- Conclusion :**

Le complexe GL1/K de SKIKDA joue un rôle très important dans l'industrie pétrolière en Algérie, il contribue avec une grande part dans le développement économique du pays à travers ses revenus annuels.

Pour satisfaire la demande en GNL il faut assurer une production permanente, car le procédé de liquéfaction nécessite des équipements industriels lourds et une forte consommation en énergie.

Pour cela l'Algérie a fait développer ses complexe de GNL notamment le complexe de GL1/K, ce complexe possède un nouveau méga train de liquéfaction de haut niveau avec une grande capacité de production.

## **Chapitre II**

# **Généralités sur le Gaz Naturel Liquéfié et les réservoirs de stockage**

## **II-1-Introduction:**

Le gaz naturel liquéfié, ou GNL, est tout simplement du gaz naturel à l'état liquide. Lorsque le gaz naturel est refroidi à une température d'environ -160°C à la pression atmosphérique, il se transforme en un liquide clair, transparent et inodore. Le GNL est non corrosif et non toxique.

Le procédé de liquéfaction retire le dioxyde de carbone, les composés sulfurés (sulfure d'hydrogène, sulfure de carbone) et l'eau contenus dans le gaz naturel, le transformant ainsi en un mélange composé principalement de méthane et contenant de petites quantités d'autres hydrocarbures et de l'azote. À l'état liquide, le gaz naturel est réduit à 1/600 de son volume original, ce qui rend possible son transport sur de longues distances dans des navires-citernes spécialement conçus pour le stockage, la regazéification et la livraison sur les marchés.

## **II-2-Historique:**

Les premières expériences de liquéfaction du gaz naturel date de 1934 en URSS et de 1940 aux états- unis. Les Américains envisagèrent sa liquéfaction pour pouvoir le stocker et le transporter sur de longues distances mais cette tentative s'est soldée par un échec.

Le 20 Février 1959, les Américains et les Anglais réussirent la première cargaison de Gaz Naturel Liquéfié, depuis Lake Charles (USA) à Convery Island.

Pour l'Algérie, la première découverte du Gaz Naturel a eu lieu en Novembre 1956 à Hassi-R'Mel, la Compagnie Algérienne du Méthane Liquide (CAMEL) a été créé et installée à Arzew. le contrat de réalisation de cette usine fut confié à une association Technip /J.F.Pritchard , technip ayant la charge des unités de liquéfaction et de fractionnement.

L'étude du projet du Complexe GL1K de Skikda a duré de 1965 à 1967 [5].

## **II-3-La production mondiale du GNL :**

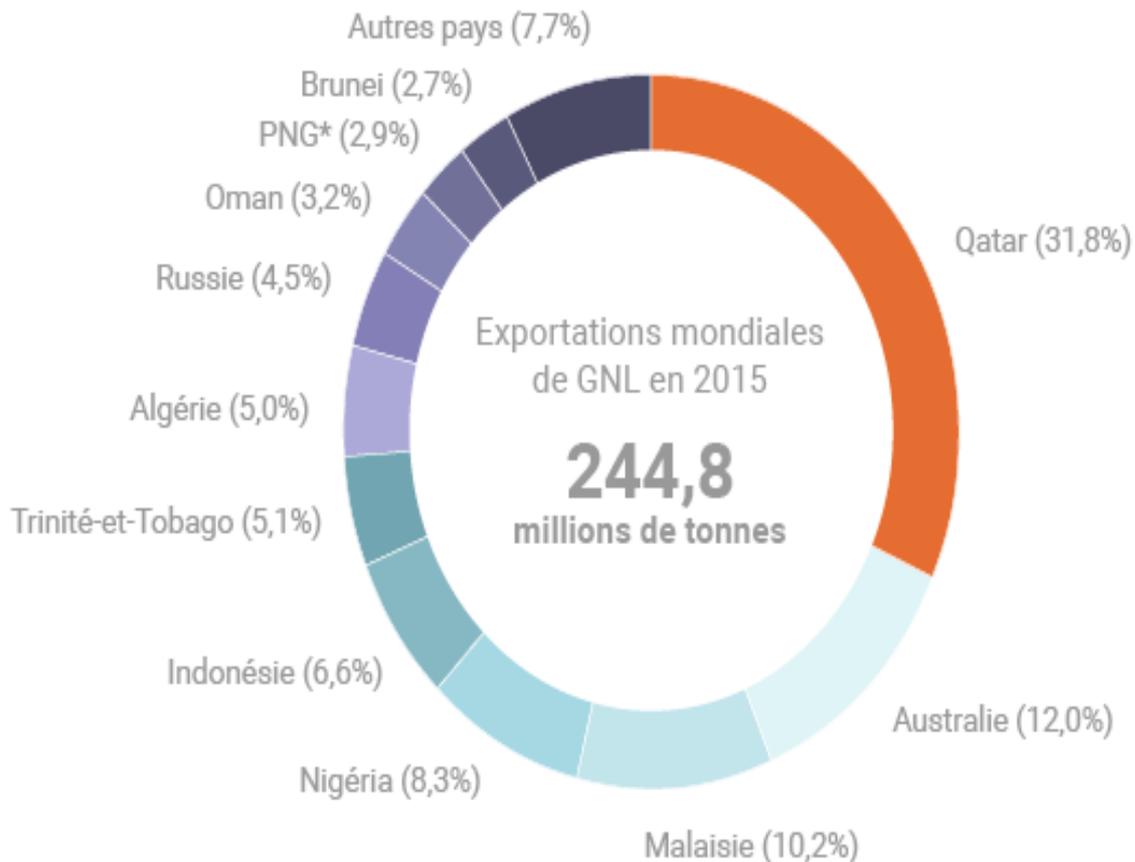
Tous disposent par définition d'une façade maritime : le transport du GNL par navire méthanier permet de s'affranchir partiellement des contraintes géographiques et géopolitiques.

Notons que l'île de Trinité-et-Tobago ne dispose pas de gazoducs la reliant aux pays voisins et peut uniquement exporter du gaz naturel sous forme liquéfiée à l'heure actuelle.

L'Australie a pour objectif de dominer le marché du GNL en triplant sa production d'ici à 2020. Une quinzaine d'unités de liquéfaction sont actuellement en cours de construction dans ce pays. Les États-Unis construisent également de nombreuses installations en vue d'exporter

une partie de leur production de gaz de schiste sous forme liquéfiée (la première livraison de GNL américain vers l'Union européenne a eu lieu en avril 2016 au Portugal). Les autres principaux sites de liquéfaction en projet sont situés en Malaisie et en Russie.

Au total, près d'un tiers des flux mondiaux de gaz naturel sont désormais acheminés sous forme de GNL. Près de 70% de la demande de GNL provient d'Asie, les principaux pays importateurs étant le Japon et la Corée du Sud (Figure II.1). [6].



**Figure II.1 :** Exportateur du GNL dans le monde pour l'année 2015[6]

#### **II-4-Caractéristiques du GNL :**

L'industrie du GNL utilise des technologies et des consignes de sécurité de pointe qui s'appuient sur de nombreux codes, normes et mécanismes de surveillance réglementaire pour assurer la sécurité et la fiabilité des installations de GNL. Dans cette partie on décrit les propriétés physiques et les dangers liés au caractère inflammable du GNL.

## II-4-1- Intérêt du GNL:

La liquéfaction du gaz naturel réduit le volume occupé par le gaz de plus de 600 fois. Le GNL est donc une solution avantageuse par rapport au gaz naturel en phase gazeuse pour le transport et le stockage.

Une « chaîne GNL » est mise en place lorsque la construction d'un gazoduc n'est pas envisageable, le plus souvent en raison des coûts de construction trop élevés, de la distance de transport, d'une étape maritime imposée ou de contraintes géopolitiques. Plusieurs grandes étapes constituent cette chaîne GNL, de la liquéfaction du gaz naturel jusqu'à la regazéification pour fournir le gaz au consommateur final (Figure II.2).

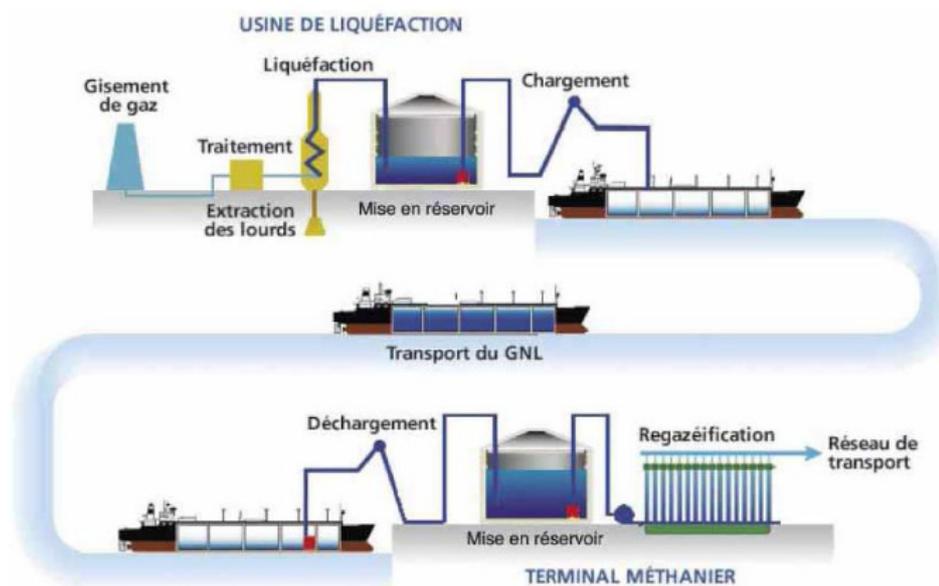


Figure II.2 : Chaîne de transport du gaz naturel liquéfié [7]

## II-4-2-Propriété physique du GNL :

Le GNL est du gaz naturel qui a été refroidi jusqu'à son point d'ébullition, de telle sorte qu'il se retrouve à l'état liquide à pression atmosphérique. Ce point d'ébullition varie avec la composition du gaz naturel, mais se situe néanmoins aux alentours de  $-160^{\circ}\text{C}$ .

Le GNL est essentiellement composé de méthane, et contient d'autres hydrocarbures tels

que l'éthane, le butane, le propane, et en quantités moindres du pentane, de l'azote, de l'oxygène, du dioxyde de carbone, et des composés sulfurés. Selon la norme européenne NF EN 1160, « Caractéristiques générales du Gaz Naturel Liquéfié », la proportion de méthane dans le mélange doit être supérieure à 75 % pour que celui-ci soit considéré comme du GNL. Cette proportion se situe le plus souvent aux alentours de 90 %.

La liquéfaction du gaz naturel est effectuée à pression atmosphérique, et le GNL est donc transporté à pression ambiante [8].

#### **II-4-2-1-Densité du GNL :**

La densité du GNL dépend principalement de sa composition, mais aussi de sa température. Elle est comprise généralement entre 430 et 470 kg/m<sup>3</sup>, ce qui est inférieur à la moitié de la densité de l'eau. Ainsi, s'il est répandu sur l'eau, le GNL flotte.

La densité des vapeurs de GNL (c'est-à-dire la densité du gaz naturel) varie avec la température : elle décroît si la température du gaz augmente. Les vapeurs de GNL à température d'ébullition (-162°C) et à pression atmosphérique ont une densité d'environ 1,5. Elles sont donc plus lourdes que l'air à la même température.

Cependant, la densité relative d'un nuage de gaz naturel pur à -110°C est proche de 1, et à température ambiante, la densité du gaz naturel pur est d'environ 0,6. A cette température, il est donc plus léger que l'air.

Un nuage de vapeurs de GNL créé par une nappe de GNL a donc une densité initialement plus importante que celle de l'air. Peu à peu, les vapeurs vont d'une part se réchauffer et d'autre part se mélanger avec l'air ambiant, qui, lui, va alors se refroidir donc s'alourdir. La densité d'un tel mélange sera ainsi supérieure à celle du gaz naturel pur à la même température [9].

#### **II-4-2-2-Toxicité du GNL:**

Le GNL est non toxique et non corrosif. En outre, les vapeurs de GNL sont incolores et inodores bien que le gaz naturel utilisé dans les résidences privées ait une forte odeur. Cela vient du fait qu'un gaz odorant est ajouté au gaz naturel avant son envoi dans le réseau de distribution, afin de détecter les fuites plus facilement [9].

#### **II-4-2-3- Inflammabilité du GNL:**

Les vapeurs de GNL mélangées à l'air sont inflammables dans une certaine gamme de

concentration. La Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) et la Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI) du méthane sont respectivement de 5% et de 15% en volume dans l'air à une température de 25°C. Les limites d'inflammabilité des vapeurs de GNL dépendent de sa composition, mais la norme européenne NF EN 1160 considère le même domaine d'inflammabilité [9].

La température d'auto-inflammation des vapeurs de GNL dépend de la composition exacte du GNL. Elle est très souvent de l'ordre de 540-595°C (Figure II.3).

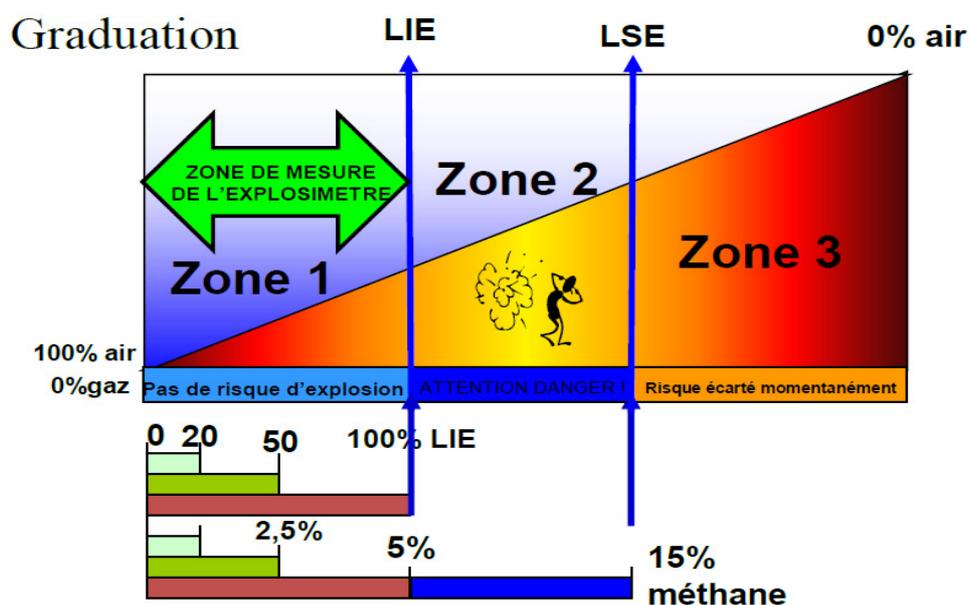


Figure II.3 : Représentation des LIE et LIS du Méthane [9]

## II-5-Dangers Liés au GNL :

### II-5-1-Dangers liés à la température cryogénique du GNL :

A cause de sa température très basse, un épandage de GNL peut endommager les structures et blesser les personnes situées à proximité.

En effet, les matériaux qui ne sont pas spécialement conçus pour des températures cryogéniques subissent des contraintes thermiques et deviennent cassants s'ils sont en contact avec du GNL. Un épandage de GNL peut donc fragiliser les surfaces et les connexions, et peut créer des dommages additionnels sur les structures proches de la source de fuite.

Pour ce qui est des effets sur les personnes, le liquide cryogénique et les vapeurs qu'il produit peuvent entraîner des dommages sur la peau, similaires à une brûlure «froide».

Une exposition brève peut entraîner des dommages sur des tissus délicats comme les yeux, une exposition prolongée peut causer des gelures aussi bien que des brûlures et des dommages aux poumons. De plus, si la peau entre en contact avec un métal très froid, elle peut rester collée au métal et s'arracher si retirée [9].

Les dangers pour l'homme liés à la température cryogénique du GNL relèvent à priori du risque pour les travailleurs car les personnes situées à l'extérieur du complexe sont plutôt exposées aux vapeurs de GNL réchauffées par l'air ambiant.

## **II-5-2-Dangers liés à l'épandage de GNL :**

### **➤ Rejet de GNL**

Une fuite sur un équipement ou une canalisation contenant du GNL libère le produit sous forme liquide. Puisque celui-ci se trouve à son point d'ébullition et se réchauffe au contact de l'air ambiant, une partie du liquide se vaporise instantanément à la sortie de l'orifice, c'est le « flash », tandis que le reste se dirige vers le sol sous forme de gouttelettes. Une partie de ces gouttelettes peut encore s'évaporer avant d'atteindre le sol et les retombées finales forment une nappe de GNL [10].

La forme et la durée de vie de cette flaque de liquide sont gouvernées par plusieurs paramètres, et en particulier :

- ❖ Le type de sol : toute la quantité de GNL présente dans la flaque s'évapore à cause des apports thermiques en provenance de l'air, du soleil et surtout du sol. Les variations du taux d'évaporation au cours du temps dépendent principalement du mode dominant de transfert de chaleur en provenance du sol, et on peut distinguer :
  - La formation d'une nappe sur la terre ou sur un revêtement thermiquement isolant (ex : béton calorifugé) : l'apport de chaleur se fait principalement par conduction, le revêtement thermiquement isolant ayant une conductivité thermique volontairement faible.
  - La formation d'une nappe sur l'eau : l'apport de chaleur se fait principalement par convection et le brassage de l'eau ainsi crée un échange beaucoup plus efficace qu'une conduction thermique. L'évaporation de GNL sur l'eau est donc beaucoup plus rapide que sur la terre et peut initier un phénomène particulier, appelé Transition Rapide de Phase (TRP).
- ❖ La nature du sol : les caractéristiques de porosité et de rugosité du sol influencent

l'étalement de la nappe, de manière similaire à toute autre flaque de liquide.

- ❖ La présence de dispositif de rétention: un tel dispositif pose une contrainte sur la forme de la flaque (tant que celle-ci ne déborde pas). Cette contrainte a une influence non négligeable sur le taux d'évaporation car elle limite l'efficacité des échanges thermiques avec le sol en diminuant la surface de contact.
- ❖ La composition du GNL: l'évaporation de la flaque s'arrête lorsqu'il n'y a plus de GNL et la flaque disparaît alors, laissant éventuellement derrière elle une zone gelée. il n'y a pas de pollution du sol.

### ➤ **Dispersion des vapeurs de GNL**

Si les vapeurs de GNL issues de l'évaporation d'une nappe ou directement dégagées par un rejet depuis un équipement ou une canalisation ne sont pas immédiatement enflammées, le GNL continue de s'évaporer et crée un nuage très froid qui reste près du sol ou de la surface de la mer.

L'humidité de l'air se condense dans le nuage à cause des basses températures qui y règnent à l'intérieur, ce qui forme des petites particules d'eau liquide ou des flocons de neige et rend le nuage visible. Cette condensation de l'humidité réchauffe le nuage de vapeurs et l'allège.

Ainsi, en cas de dispersion en champ libre, un nuage de vapeurs de GNL voit sa densité diminuer au fur et à mesure qu'il s'étend et se mélange avec de l'air.

### ➤ **Transition Rapide de Phase**

Lorsqu'une quantité importante de GNL se répand sur l'eau à un débit important, un phénomène nommé Transition Rapide de Phase (TRP) peut survenir : Le mécanisme physique d'une TRP n'est pas encore tout à fait maîtrisé, mais il est généralement expliqué par la théorie de la surchauffe.

Une TRP survient lorsque deux liquides de température différente sont subitement mis en contact, et si la température du liquide le plus chaud est sensiblement supérieure à la température de surchauffe du liquide le plus froid.

La température de surchauffe est la température maximale au-delà du point d'ébullition qu'un liquide peut atteindre dans certaines conditions (un réchauffement extrêmement rapide par exemple) sans atteindre l'ébullition.

La plus basse température augmente rapidement jusqu'à cette température de surchauffe, le liquide atteint sa limite de stabilité thermodynamique et finalement s'évapore dans un intervalle de temps très court, causant une surpression similaire à une onde de pression provoquée par une explosion.

Dans le cas d'un épandage de GNL à température cryogénique sur l'eau, la chaleur est transférée très rapidement de l'eau au GNL, faisant atteindre pour une partie du GNL la limite de surchauffe, celle-ci se convertissent alors instantanément en phase gazeuse. Une grande quantité d'énergie est relâchée durant cette transition rapide entre deux phases, et des surpressions peuvent être créées.

### **II-5-3-Dangers liés aux caractères inflammables du GNL :**

#### **➤ Feu de nappe (Feu de flaque)**

Lorsque du GNL se répand sur le sol ou sur l'eau, il forme une nappe qui s'évapore plus ou moins vite selon les caractéristiques du milieu sur lequel elle s'étend.

Si une source d'inflammation se trouve à proximité immédiate de la nappe, les vapeurs mélangées à l'air dans les limites d'inflammabilité s'enflammeront au contact de cette source et créent un feu de flaque (également appelé feu de nappe).

L'impact d'un feu de nappe dépend de la taille de la surface en feu, du produit qui se consume et de la durée de l'incendie.

De manière générale, les principales conséquences observées de manière récurrente sont la pollution des eaux de surface ainsi que la contamination des sols, voire des eaux souterraines, plus rarement, des blessés ou des morts. Les effets thermiques observés dépendront de la taille de la nappe ainsi que du combustible.

#### **➤ Feu de nuage – Explosions - UVCE**

Lorsque du GNL se répand sous forme de nappe, s'évapore et que ses vapeurs de GNL ne rencontrent pas immédiatement de source d'inflammation à proximité, celles-ci se dispersent dans l'air en s'éloignant de la nappe.

Dès que le nuage de vapeurs de GNL rencontre une source d'inflammation, les vapeurs inflammables commencent à s'enflammer. Le front de flamme se propage au travers du mélange non brûlé et retourne à la source du rejet, d'où provient de manière continue du combustible « frais ». Ce phénomène est appelé « flash fire » ou feu de nuage.

Le feu de nuage est en général suivi d'un feu de flaque lorsque les flammes sont situées au-dessus d'un rejet de liquide.

En champ libre, la combustion des vapeurs progresse à «faible» vitesse, ce qui correspond à des valeurs de 5 à 15 m/s. Cela peut mener à des surpressions locales dans certaines parties du nuage, mais elles ne sont pas très significatives et restent inférieures à 50 mbar, selon la norme européenne NF EN 1160.

Cependant, des niveaux de surpression plus importants peuvent être atteints si la répartition des vapeurs de GNL et de l'oxygène est exactement proportionnelle à celle d'écrite dans une réaction stœchiométrique.

### ➤ **Feu de torche**

Un feu torche résulte de la combustion d'un gaz combustible rejeté de manière continue avec une certaine vitesse. Les feux de torche ont lieu lorsqu'un gaz inflammable est dégagé par une brèche dans une canalisation ou un équipement après inflammation.

### ➤ **BLEVE**

Un gaz liquéfié pressurisé rejeté soudainement d'un réservoir de stockage se vaporise de façon violente à la pression atmosphérique et à température ambiante. Cette transition très rapide est la cause d'un phénomène appelé BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), qui crée des ondes de pressions et éventuellement une boule de feu si le gaz est inflammable et rencontre une source d'inflammation.

La cause la plus probable d'un BLEVE est un feu extérieur, qui réchauffe le gaz liquéfié stocké à l'intérieur se vaporise, augmente sa pression, et affaiblit dans le même temps l'enceinte du réservoir. Arrivé à un certain point, celui-ci est trop affaibli, la vapeur est relâchée et un BLEVE devra suivre.

Or, le GNL est stocké dans des réservoirs qui ne sont donc pas conçus pour résister à des pressions internes importantes. Ainsi, une enceinte contenant du GNL, exposée à un incendie à proximité, s'affaiblira et cèdera avant d'atteindre des pressions assez importantes pour créer un BLEVE.

De plus, il faut souligner que le gaz naturel est liquéfié à une température très basse, et non à une pression très élevée, ce qui empêche la conjugaison de toutes les conditions préliminaires nécessaires à un BLEVE.

Le phénomène de BLEVE est plutôt lié aux gaz liquéfiés tels que le GPL, l'ammoniac, etc., qui sont stockés ou mise en œuvre sous pression.

#### **II-5-4-Autres types de dangers liés au GNL :**

##### **➤ Anoxie**

Les vapeurs de GNL ne sont pas toxiques pour l'homme, mais peuvent être la cause d'asphyxie si la proportion d'oxygène n'est plus assez importante dans l'air respiré.

En effet dans le cas d'un épandage, si les vapeurs de GNL ne s'enflamment pas, leur concentration augmente, créant ainsi un mélange de vapeurs de gaz et d'air à faible teneur en oxygène. Ceci peut entraîner l'asphyxie et potentiellement la mort pour des personnes qui seraient situés trop près de la nappe.

Il faut noter que ce phénomène reste néanmoins limité à la zone proche du rejet car les concentrations en vapeurs de GNL requises pour abaisser la teneur en oxygène à un niveau suffisamment bas sont assez élevées.

Par conséquent, le danger relatif au phénomène d'anoxie ne concerne pas vraiment les personnes situées à l'extérieur de l'installation, mais plutôt les équipes d'intervention aux situations d'urgence, qui seraient amenées à intervenir au plus près d'un rejet de GNL. Ce phénomène relève donc du risque professionnel [11].

##### **➤ Roll-over**

Le GNL est majoritairement composé de méthane (souvent à plus de 90%), mais il est également constitué d'autres gaz, comme le butane et le propane, présent en plus faibles proportions.

Comme ces gaz ont des propriétés physiques différentes (masse volumique, température d'ébullition...), des GNL de composition différente auront alors des densités différentes.

Lors du stockage du GNL, cette différence de densité peut conduire à des phénomènes de renversements de couche, appelés « roll-over ». à l'intérieur d'un réservoir, une couche de GNL « lourd » est stockée en dessous d'une couche de GNL plus « léger ».

Si la couche de GNL « lourd » se réchauffe, elle peut devenir moins dense que la couche supérieure. Les deux couches vont alors avoir tendance à rechercher une position d'équilibre :

Elles vont se renverser de telle sorte que la couche la plus dense se retrouve en dessous de la couche la moins dense.

Un autre cas peut engendrer le phénomène de roll-over est le transfert de GNL entre les deux complexes. En effets, les trains de production des deux complexes ne sont pas identiques donc les caractéristiques et la composition du GNL ne sont pas les mêmes lorsqu'il y a un transfert du GNL entre les deux complexes la différence de composition conduit à la différence de densité cette dernière peut conduire à des phénomènes de renversements de couche, « roll-over ».

Ce renversement est accompagné d'une évaporation importante de GNL, ce qui peut conduire à des augmentations de pression significatives à l'intérieur du réservoir.

## **II-6-Accident liés au traitement de GNL :**

### **II-6-1-Accidents liés au traitement de GNL survenus sur le complexe GL1/K :**

#### **II-6-1-1-Accidents majeurs liés au traitement de GNL survenu sur le complexe GL1/K :**

La base ARIA a recensé un accident majeur survenu sur le complexe GL1/K de Skikda, Cet accident reste, de par son ampleur, l'accident industriel le plus important de l'industrie pétrolière Algérienne.

L'accident est survenu le 19/01/2004 dans l'usine de liquéfaction, une explosion se produit en fin d'après-midi dans un complexe pétrochimique portuaire, situé sur la côte et comprenant 6 unités de traitement de gaz et d'hydrocarbures ; 12 000 personnes travaillent sur ce site qui est en partie alimenté par du gaz et du pétrole en provenance du Sahara. 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. Sous la violence de l'explosion, des réservoirs de substances inflammables se trouvant à proximité ont été endommagés à leur tour : les fuites qui en résultent ont provoqué l'extension de l'incendie en différents foyers. Le souffle de l'explosion, entendue à 10 km à la ronde, brise les vitres d'immeubles et commerces du voisinage... [11]

#### **II-6-1-2-Autres accidents liés au traitement de GNL survenus sur le complexe GL1/K :**

➤ **Liquéfaction du GNL**

**Tableau II.1:** Accidents liés à la liquéfaction du GNL survenus sur le complexe GL1/K [1]

<b>Date</b>	<b>Evénement</b>	<b>Cause</b>
11/02/2006	Fuite de gaz au niveau d'une prise d'impulsion.	Rupture de la soudure.
16/04/2006	Fuite de gaz au niveau du joint de chapelle et du presse étoupe de 2 vannes.	
02/05/2006	Fuite de gaz de purge au fond de l'échangeur 13E06.	
30/05/2006	Fuite de gaz sur la ligne C <sub>3</sub> (diamètre de 4").	Ligne légèrement percée au niveau de son support.
28/11/2006	Cisaillement du rotor du ventilateur de la chaudière U10.	
21/12/2006	Echauffement au niveau de l'arbre du moteur de la pompe 55P206 A.	Graissage insuffisant.
16/02/2007	Fuite de gaz sur la ligne C <sub>2</sub> sur manchette à 3 brides de liaison avec la tête de colonne 63T202, l'échangeur. 53E209 et la LV5403, au niveau d'une P.G déjà réparée.	
11/03/2007	Fuite de gaz au niveau de la garniture mécanique de la pompe 54PM204 B associée à la colonne 54T203.	
21/06/2007	Début de feu.	Projection d'étincelle lors des travaux de soudure au niveau de la colonne T202.
29/07/2007	Fuite de GNT sur la bride au niveau de l'échangeur 13E40, détectée par le détecteur gaz 13GGA14.	Rupture de joint.

01/12/2007	Fuite de gaz MCR à basse pression (> 3 bar) en aval de la vanne 63UV304.	Vanne de purge ouverte (volant cassé tournant dans le vide) et bouchon peu serré (à la main).
17/12/2007	Fuite de gaz au niveau des purges des pompes PM208 A/B, lors d'une opération de vidange du ballon D206.	Erreur de disposition du circuit.
28/12/2007	Fuite par les lignes ouvertes pour travaux VL du 63D206A et PM208, retour de fluide froid du rebouilleur E226 de la colonne T205 (initialement prévu vers la torche) via le ballon D206A.	Givrage imprévu du rebouilleur E226 par manque de platine nécessite vidange vers la torche Or, vanne en limite d'unité VL isolée.
06/01/2008	Feu d'huile sur calorifuge de la ligne de vapeur surchauffée.	Imprégnation d'huile du calorifuge ligne VS suite à fuite sur piston aubage du turbocompresseur CT201.
25/02/2008	Fuite de gaz GNL sur bride de fond du ballon 54D206 B et fuite de gaz MCR sur garniture mécanique de la pompe 53MP202 A.	Rupture de joint lors du démarrage et fuite sur garniture mécanique de la pompe.
21/07/2008	Fuite de fluide frigorigène au niveau d'une purge de l'échangeur 13E15.	Vanne de purge fuyarde.
16/12/2008	Fuite de gaz sur ligne 4" d'équilibrage côté refoulement HP 13KT01.	Cisaillement de la tuyauterie 4".
17/12/2008	Fuite de MCR au niveau du compresseur 13K01 B.	Cisaillement par fatigue de la tuyauterie d'équilibrage du compresseur HP au niveau du cordon de soudure.
07/03/2009	Déclenchement d'un feu d'huile au niveau de la soupape réglante de la turbine du compresseur 13KT01.	Fuite d'huile au niveau de la soupape imbibant son calorifuge et réchauffage progressif jusqu'à température d'auto-inflammation.

➤ **Stockage et chargement du GNL**

**Tableau II.2:** Accidents liés au stockage et chargement du GNL survenus sur le complexe GL1/K [1].

<b>Date</b>	<b>Événement</b>	<b>Cause</b>
27/04/2004	Départ de feu entre les parois du bac 81T01 B.	Formation d'escarbilles suite aux travaux de coupure de la paroi extérieure du bac 80T01 B au chalumeau, mise en contact avec la laine de verre d'isolation.
14/10/2006	Feu d'évent TK104.	Orages.
30/07/2006	Fuite de gaz sur ligne retour vapeur appontement vers bacs de stockage.	
04/03/2007	Fuite légère au niveau de la bride de la vanne UV8122 du bac TK104.	Bride de la vanne desserrée.
16/11/2007	Feu au niveau des événements des bacs TK103/104.	Orages.
22/01/2008	Crachement important de gaz à la soupape de TK104.	Réception, à l'intérieur du bac, de GNL trop chaud en sortie de cryogénie engendrant la montée en pression (126,7 mbar) et l'ouverture des soupapes tarées à 110 mbar.
02/03/2008	Cisaillement du câble instrumentation 080D70 au niveau du bac 81T01 A.	Mauvaise vérification et identification des câbles instrumentation lors de la préparation des travaux de démantèlement du bac 81T01 A.
14/04/2008	Départ de feu entre les parois du bac 81T01 B.	Formation d'escarbilles suite aux travaux de coupure de la paroi extérieure du bac 80T01 B au chalumeau, mise en contact avec la laine de verre d'isolation.

## II-6-2-Accidents liés au traitement de GNL survenus sur des installations similaires :

### ➤ Liquéfaction du GNL

**Tableau II.3:** Accidents liés à la liquéfaction du GNL survenus sur des installations similaires [11]

Description de l'accident	Analyse de l'accident
<p>1977 – ALGERIE – Arzew (usine de liquéfaction)</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. Il faut noter que le nuage de vapeurs de GNL ne s'est jamais enflammé au cours du rejet.</p>	<p>Phénomène physique : Rejet de GNL.</p> <p>Evénement initiateur : Equipement non conçu avec des matériaux cryogéniques.</p>
<p>ARIA N°10162</p> <p>Le 14/02/1983 – INDONESIE – Bontang (usine de liquéfaction)</p> <p>Sur une installation de GNL, une explosion se produit.</p> <p>L'accident a pour origine une rupture d'échangeur cryogénique provoquée par des défaillances matérielles (avarie de PSV) et humaine (vanne laissée fermée lors du démarrage). La rupture est survenue à une pression effective de 34 bar (l'échangeur n'était éprouvé qu'à une pression de 4 bar).</p>	<p>Phénomène physique : Explosion.</p> <p>Evénement initiateur : Rupture de tuyauterie due à une surpression et erreur humaine.</p>

<p>1993 – INDONESIE – Usine de liquéfaction</p> <p>Fuite de GNL provenant du « open run-down line » pendant une modification d'un pipe. Le GNL est entré dans le réseau d'eaux pluviales en sous-sol et a subi une expansion rapide, conduisant à une surpression due à la vapeur et à la rupture des canalisations. Le réseau d'eaux pluviales a donc été lourdement endommagé.</p>	<p>Phénomène physique : Explosion.</p> <p>Evénement initiateur : Rupture de tuyauterie due à une surpression.</p>
--	---

➤ **Stockage de GNL**

**Tableau II.4:** Accidents liés au stockage du GNL survenus sur des installations similaires

[11]

Description de l'accident	Analyse de l'accident
<p>ARIA N°6059</p> <p>Le 20/10/1944 – ETATS-UNIS – Cleveland</p> <p>Une fissure se développe dans la paroi d'un réservoir cryogénique de 4540 m<sup>3</sup> de Gaz Naturel Liquéfié. La double paroi était composée d'un acier à 3,5 % de nickel avec une isolation en laine de roche. Le nuage s'enflamme rapidement et explose. Un gigantesque incendie se déclare et se propage à un autre réservoir qui explose à son tour. Au total, 12 ha d'installation sont détruits et près de 2900 t de gaz sont brûlés. 136 personnes sont tuées, 300 blessées, 80 maisons détruites et 10 usines fortement endommagées. Les dégâts sont évalués à 8 millions de dollars US.</p>	<p>Phénomène physique : Inflammation de nuage de vapeur.</p> <p>Evénement initiateur : Utilisation d'acier de mauvaise qualité / Système de rétention inadéquat.</p>

<p>1971 – ITALIE – La Spezia</p> <p>Le méthanier Esso Brega est resté en attente pendant un mois à proximité du terminal avant de pouvoir décharger un GNL « lourd ». 18 heures après le déchargement du navire, le réservoir du terminal a subi une brusque montée en pression interne, ce qui a conduit à un dégagement de vapeurs de GNL à travers les soupapes et les événements de surpression du réservoir durant quelques heures. En outre, le dôme du réservoir a été légèrement endommagé. On estime à environ 2000 tonnes la quantité de vapeurs de GNL qui se sont échappées du réservoir. Ces vapeurs ne se sont pas enflammées au cours du dégagement. Cet accident a été causé par un phénomène de roll-over</p>	<p>Phénomène physique : Roll-over.</p> <p>Evénement initiateur : Présence dans un même réservoir de 2 types de GNL de densités différentes.</p>
--	---

➤ **Chargement-déchargement de GNL**

**Tableau II.5:** Accidents liés au chargement-déchargement du GNL survenus sur des installations similaires [11]

Description de l'accident	Analyse de l'accident
<p>1965 – Methane Princess</p> <p>Les bras de chargement du GNL ont été déconnectés avant que les conduites de liquide ne soient complètement vidées. Ceci a provoqué l'écoulement de GNL à travers une soupape fermée fuyarde, jusque dans un bac récepteur en acier inoxydable placé sous les bras. De l'eau de mer a été appliquée sur la zone. Une fracture est par la suite apparue au niveau du bordé de pont.</p>	<p>Phénomène physique : Rejet de GNL.</p> <p>Evénement initiateur : Déconnexion avant vidange du bras.</p>
<p>1979 – Mostefa Ben Boulaid</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>Phénomène physique : Rejet de GNL.</p> <p>Evénement initiateur : Défaillance d'un clapet anti- retour.</p>

<p>1979 – Pollenger</p> <p>Alors que le méthanier Pollenger déchargeait du GNL au terminal à Everett (USA) le 25 avril, du GNL qui s'échappait a apparemment fracturé la semelle de renforcement supérieure de la cuve n°1. La quantité de GNL répandue n'était probablement que de quelques litres, mais les fractures sur la semelle de renforcement s'étendaient sur environ 2 m<sup>2</sup>.</p>	<p>Phénomène physique : Rejet de GNL.</p> <p>Evénement initiateur : Défaillance d'une valve.</p>
<p>1983 – Norman Lady</p> <p>A Sodegaura au Japon, au cours de la mise en froid des bras de transfert de la cargaison avant un déchargement, le méthanier Norman Lady s'est déplacé soudain vers l'arrière, mu par ses propres moteurs. Tous les bras de transfert ont été cisailés et du GNL s'est répandu. Il n'y a pas eu d'inflammation.</p>	<p>Phénomène physique : Rejet de GNL.</p> <p>Evénement initiateur : Déplacement incontrôlé du Méthanier.</p>
<p>2001 - Mostafa Ben Boulaid</p> <p>Pendant un transfert de GNL, un rejet s'est produit et a causé des fractures sur le pont.</p>	<p>Phénomène physique : Rejet de GNL.</p> <p>Evénement initiateur : Surpression dans un réservoir</p>
<p>Le 14/03/2006 – Golar Freeze</p> <p>Le méthanier Golar Freeze rompt ses amarres à cause d'une vague créée par un navire passant à proximité. Le système de déconnexion d'urgence des bras a correctement fonctionné et aucun rejet de GNL n'a été constaté. Cet incident pourrait être dû à un phénomène de résonance et d'amplification des vagues dans la darse creusée à l'écart du chenal de navigation.</p>	<p>Phénomène physique : Rupture des amarres.</p> <p>Evénement initiateur : Passage à proximité d'un navire de fort tonnage.</p>

## II-7-Caractéristiques générales des réservoirs:

Un réservoir de stockage est déterminé par sa forme, ses dimensions géométriques qui déterminent notamment le volume contenu, sa pression et la température du produit stocké.

La forme sphérique est la mieux adaptée à l'isolation, mais pour des capacités dépassant 15 à 20 000 m<sup>3</sup>, on a toujours recours à la forme cylindrique. Si l'on suppose (hypothèse

grossière) que les échanges thermiques ont la même intensité au m<sup>2</sup> sur la surface latérale, le fond et le toit, on démontre que la forme la plus favorable d'un réservoir cylindrique vérifie l'égalité : Hauteur = Diamètre.

La pression est toujours légèrement supérieure à la pression atmosphérique, de manière à éviter les rentrées d'air. Qui forme avec la vapeur du GNL un mélange explosif. La surpression est de l'ordre de quelques dizaines millibars.

La température interne est celle correspondant à l'ébullition du produit. Elle est de l'ordre de -160°C. Un réservoir est donc toujours constitué de deux enveloppes séparées par une épaisseur importante de calorifuge. Malgré cette isolation les apports calorifiques inévitables, en provenance de l'extérieur, se traduisent par une évaporation du produit, à température constante.

La qualité de l'isolation se traduit donc par le taux d'évaporation, exprimé généralement en pour cent par jour.

Les réservoirs doivent satisfaire à des conditions de nature mécanique et de nature thermique. Ces deux types de conditions sont énumérés séparément ci-dessous.

## **II-8-Différents types de stockages du GNL :**

Il existe plusieurs types de réservoirs qui sont couramment utilisés dans l'industrie mondiale. Les principaux sont présentés ci-après [8] :

- les réservoirs aériens à simple intégrité,
- les réservoirs aériens à double intégrité,
- les réservoirs aériens à intégrité totale,
- les réservoirs aériens de type membrane,
- les réservoirs semi-enterrés et enterrés.

On s'intéresse au réservoir aérien à simple intégrité.

### **II-8-1-Réservoirs aériens à simple intégrité :**

Un réservoir simple intégrité est composé de :

- Une cuve interne autoportante qui contient directement le GNL, réalisée en matériau ductile à basse température (aluminium, acier inoxydable ou acier à 9% de nickel),
- Une isolation permettant de contrôler l'évaporation du contenu liquide de la cuve interne réalisée en :

- Matériau pulvérulent pour les parois latérales (nom commercial "perlite", fabriquée sur place par expansion de sable de silice).
- Perlite ou laine de verre pour une importante isolation.
- Bloc de verre cellulaire.

➤ Une cuve externe remplissant trois fonctions :

- Empêcher la pénétration d'eau provenant de l'extérieur vers la cuve interne.
- Contenir l'isolation.
- Être étanche au gaz d'évaporation produit par le liquide stocké.

A noter que l'enveloppe externe n'est pas conçue pour contenir le GNL de la cuve primaire (pas de matériau ductile à basse température). En fonction des options prises pour le confinement des vapeurs et l'isolation thermique, il existe plusieurs types de réservoirs à simple intégrité.

Pour permettre de recueillir la totalité du contenu de l'enveloppe primaire en cas de perte de confinement de celle-ci, une cuvette de rétention est construite autour du réservoir dans un matériau adapté aux conditions cryogéniques (talus de terre ou excavation de terre lorsque le relief le permet, mur en béton).

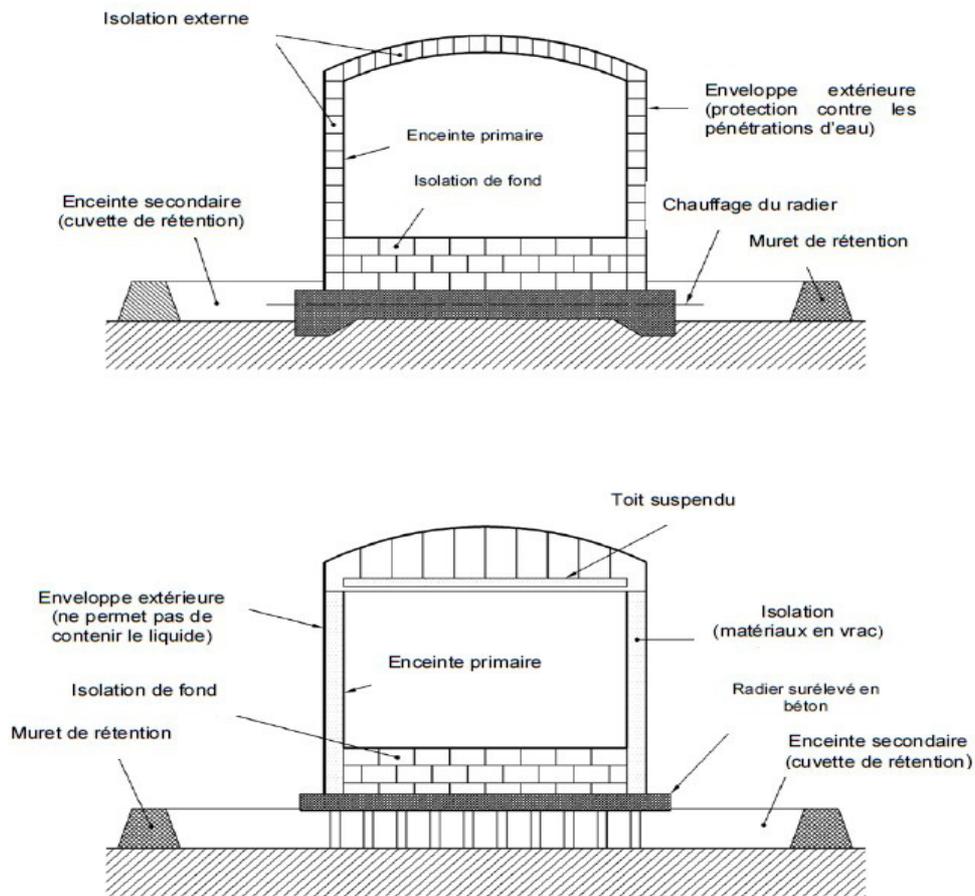
L'historique du GNL ne révèle aucun accident sur un réservoir de ce type (respectant tous les critères de construction). La raison de cette bonne exploitation est due :

- à la bonne adéquation des matériaux face aux conditions cryogéniques,
- à la qualité des GNL exploités exempte de toute impureté évitant les risques de corrosion interne des équipements.

Le schéma suivant présente deux types de réservoirs aériens à simple intégrité :

- le premier réservoir repose sur une dalle en béton chauffée.
- le second réservoir est construit sur un radier surélevé reposant sur des piliers.

Le système d'assise doit permettre d'éviter la déformation du fond du réservoir (par soulèvement par le gel et poussée hydrostatique) (Figure II.4).



**Figure II.4 :** Exemple de réservoir à simple intégrité [8]



**Figure II.5 :** Réservoirs à membrane [13]



**Figure II.6 :** Réservoir aériens à intégrité totale [12]



**Figure II.7 :** Réservoirs enterrés [13]



**Figure II.8 :** Réservoir semi-enterré [13]

## **II-9-Avantages et inconvénients Réservoirs aériens à simple intégrité :**

Les avantages de cette première technologie de réservoir sont :

- Leur simplicité de conception.
- Leur coût de construction relativement bas en comparaison des autres types de réservoirs.

Les inconvénients sont :

- En cas de fissuration de la cuve primaire, la seconde enveloppe n'est pas conçue pour résister aux conditions cryogéniques. En cas d'épandage, le GNL sera contenu dans le bassin de rétention et les gaz d'évaporation seront relâchés à l'air libre,
- L'importante emprise au sol des rétentions autour des réservoirs qui doivent être dimensionnées pour recueillir la totalité du contenu du réservoir,
- Leur protection limitée en cas d'agressions externes (incendie, explosion, chute d'objet) survenant dans le terminal à proximité du réservoir,
- Leur faible pression d'exploitation principalement due au toit métallique (qui induit

des contraintes lors du déchargement des navires méthaniers).

- Un inconvénient majeur de ce type de technologie se trouve être l'emprise au sol (dimension de la rétention). En effet, en cas d'épandage de GNL dans la rétention, les effets associés seront :
  - en cas d'incendie, des zones d'effets thermiques importantes autour de la rétention et autour du site.
  - en cas d'épandage sans inflammation, l'évaporation d'une grande quantité de gaz naturel due à l'étendue de la nappe.

## **II-10-Description de système de stockage du bac 81TK-103 :**

Ce réservoir, construit par CBI pour PULLMAN-KELLOGG, est à double enveloppe métallique et toit suspendu. Sa capacité est de 70 000 m<sup>3</sup>. La cuve externe repose sur un anneau en béton armé de 58,93 m de diamètre extérieur et de 54,43 m de diamètre intérieur et sur une galette de sable de 0,3 m d'épaisseur, à même le sol, rendant nécessaire un réchauffage par résistances électrique.

Le réservoir extérieur à 57,92 m de diamètre pour 44,82 m de hauteur dont 10,22 m de calotte sphérique, le tout en acier BS 4360 Gr 43 A.

Le réservoir intérieur à 56,09 m de diamètre pour 31,55 m de hauteur en acier à 9 % de nickel, avec un toit suspendu en aluminium AL5083-0 situé à 30,95 m du fond intérieur [2].

### **L'isolation est constituée :**

- Au fond en haut et en bas, de sable sec (0,025 m), de foam-glass (0,5 m) et de béton (0,102 m).
- Sur la robe de haut en bas de laine de verre (0,15 m) et de perlite expansée (0,75 m).
- Sur le toit, de laine de verre (1,5 m).

Le réservoir est en outre équipé :

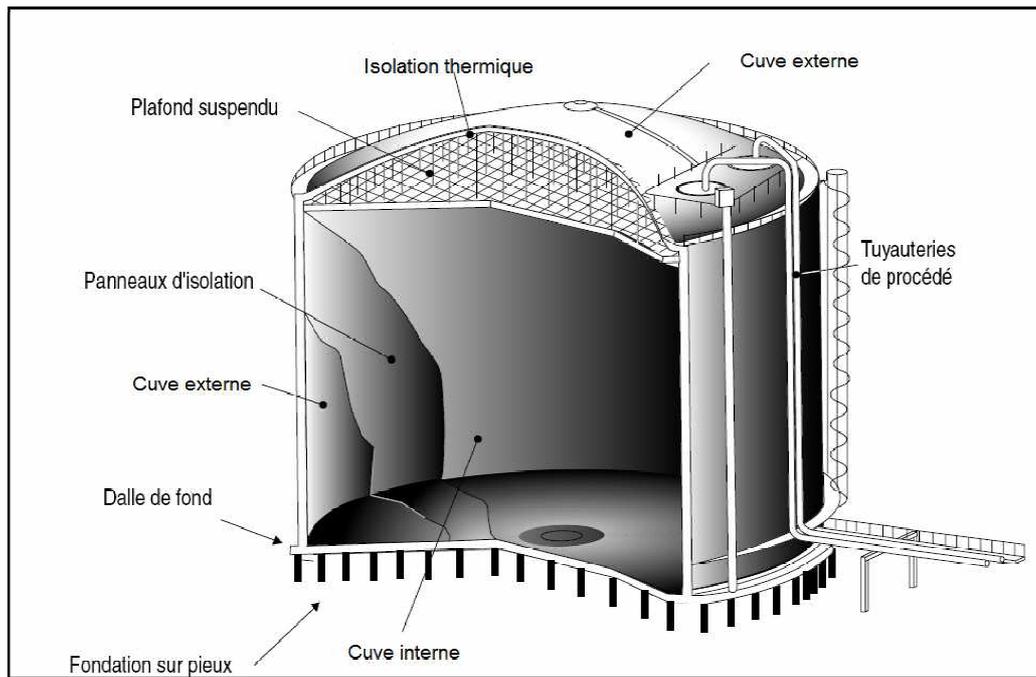
#### **➤ En partie haute :**

- D'une canalisation d'emplissage (ligne de coulée P-80-101) centrale de 16", munie d'un éclateur de jet.
- D'une ligne de mise en froid centrale de 4", munie d'un éclateur de jet.
- D'une ligne de retour de GNL de maintien en froid de 8".
- De deux trop-pleins de 12".

- D'une ligne de reprise des évaporateurs de 18".
- D'une ligne de 6" de dégazage du ballon de purge de la pomperie 82 D 201.
- D'une ligne de 6" de dégazage des canalisations de vidange.
- D'un évent de 6" piloté depuis la salle de contrôle et piqué sur une des canalisations de 12" support des soupapes de surpression.
- D'un évent manuel de dôme de 4".
- De 4 soupapes de dépression (VSV) de 12" tarées à -2 mbar et de 4 soupapes de surpression (PSV) de 10" tarées à 120 mbar par rapport à la pression atmosphérique. Ces derniers sont regroupés par deux piquées sur deux canalisations de 12".
- De deux jaugeurs de niveau et d'un contacteur de niveau.
- De quatre trous d'homme de toit de 36".
- De 29 orifices de 3" pour appoint de perlite.
- De 8 ouvertures de 24" dans le toit suspendu.
- De 10 thermocouples sur le toit suspendu.

➤ **En partie basse :**

- De 03 canalisations de soutirage de 36" dont une platinée. Leur génératrice inférieure est à 0,7 m du fond de la cuve interne, ce qui conduit à un volume de 1,738 m<sup>3</sup>.
- D'un drain latéral de 6" entre les fonds des deux cuves.
- D'une couronne d'injection d'azote de 4 pouces dans l'inter-paroi.
- De huit piquages de purge à l'atmosphère de l'inter-paroi de 2".
- D'un trou d'homme double débouchant dans la cuve interne de 24".
- De 20 thermocouples sur la cuve interne et 10 en périphérique du fond intérieur.
- De 64 tubes parallèles noyés dans la couche de sable située sous le réservoir extérieur, contenant des résistances électriques qui assurent le maintien hors gel.
- De 9 sondes de températures pour le contrôle du système de réchauffage électrique des fondations (Figure II.9).



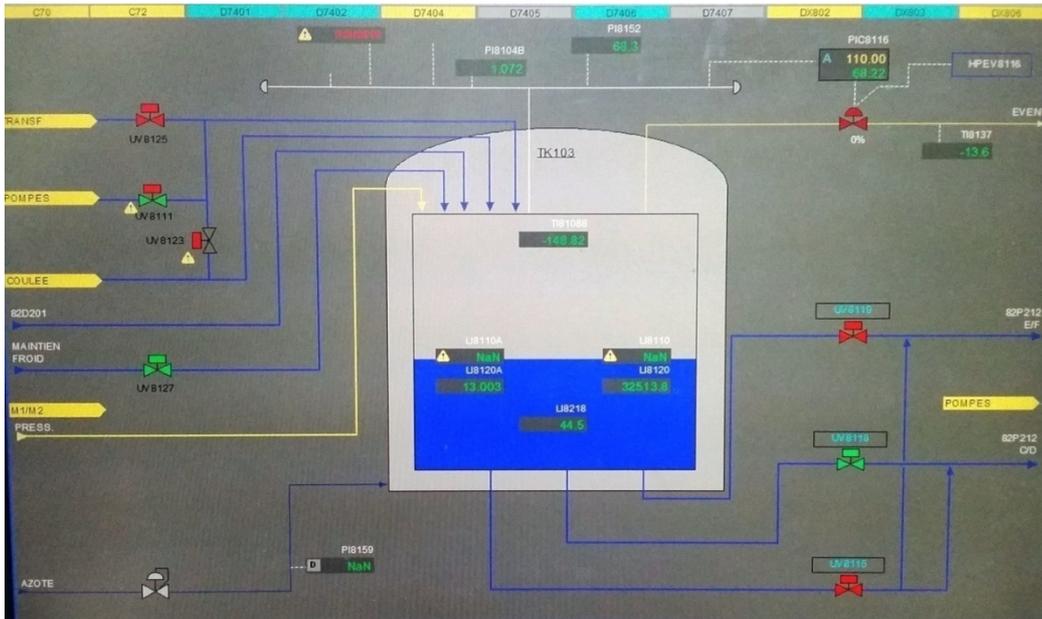
**Figure II.9 :** Schéma simplifié d'un bac de stockage cryogénique [12]

### ➤ **Pomperies**

- 4 pompes de chargement d'un méthanier P 212 C /D /E /F avec les quelles le GNL est soutiré du réservoir pour être dirigé vers l'appontement.
- 2 pompes de maintien en froid des lignes de chargement P 213 A et B pour la circulation du GNL en l'absence de chargement. et un séparateur d'évent 82 D 201.

### ➤ **Vannes**

- Vanne de remplissage UV-8123 à partir du GNL produit.
- Vanne de remplissage UV-8125 à partir d'autres bacs.
- Vanne de recirculation du GNL UV-8111.
- Vanne de la ligne de mise en froid UV-8127.
- Vanne de soutirage du GNL UV81-15-18-19.



**Figure II.10 :** Système de stockage du bac TK-103 du GL1/K [2]



**Figure II.11 :** Image du bac TK-103[2]

## II-11-Conclusion:

Les dangers potentiels du GNL sont attribuables à ses propriétés de base, notamment sa nature cryogénique et ses caractéristiques de dispersion et d'inflammabilité. Les chapitres suivants font l'objet d'une évaluation des risques liés au stockage du GNL.

# **Chapitre III**

## **Présentation des méthodes d'analyse**

### **III-1-Introduction :**

Cette partie est consacrée pour la présentation des méthodes d'analyses dont les quelles notre étude en a besoin.

En commençant par la décomposition fonctionnelle de notre système à étudier par la SADT, puis une analyse préliminaire des risques par l'APR.

Pour une analyse détaillée en premier lieu, on fait appel à une application de l'arbre de défaillance, afin de déduire et de quantifier les événements de bases qui peuvent nous conduire à un événement redouté.

L'arbre d'événement nous oriente sur tous les résultats possibles résultant d'un événement accidentel, enfin de compte le tout sera schématisé dans un nœud-papillon.

### **III-2-La méthode d'analyse fonctionnelle SADT :**

#### **III-2-1-Définition :**

La méthode SADT (Structured Analysis and Desing Technique) est une technique de modélisation avec analyse structurée, on procède par analyse successive descendante c'est-à-dire en allant de la plus générale vers le plus détaillé en fonction des besoins [14].

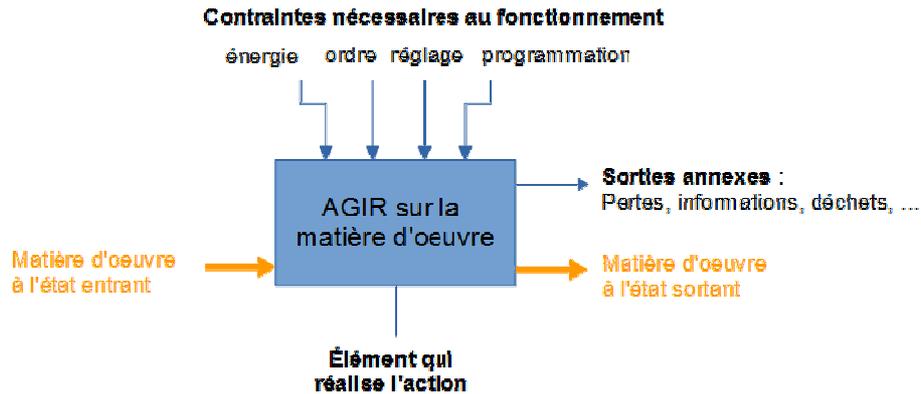
#### **III-2-2-Objectif :**

- Méthode d'analyse fonctionnelle et de gestion de projets
- Spécification de n'importe quel système
- Démarche d'analyse structurée qui identifie et organise les détails d'un système qu'on veut appréhender suivant une hiérarchie de modèles parfaitement référencées.

#### **III-2-3-Principe de base de la méthode SADT :**

La SADT est structurée selon la méthodologie de l'analyse qui suit une stratégie de décomposition fonctionnelle afin de créer un modèle hiérarchique du système. Le bloc de construction de base de ce modèle est une boîte noire représentant une opération ou une fonction du système. Cette boîte opérationnelle a quatre types d'interfaces qui se distinguent graphiquement (figure III.1).

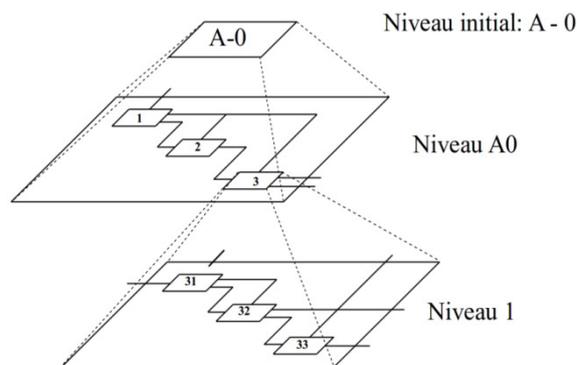
- Les entrées de l'opération sont montrées entrant sur le côté gauche.
- Les flux de commande sont affichés en haut.
- Les résultats apparaissent sur le côté droit.
- Des mécanismes, tels que des outils, sont prévus au niveau du fond.



**Figure III.1 :** Modèle de diagramme de la méthode SADT [14]

### III-2-4-Les niveaux de représentation de SADT :

Les modèles de SADT contiennent un ensemble coordonné de diagrammes, chacun avec la même forme graphique. Ces diagrammes se composent de texte ainsi que de deux types d'objets, boîtes et lignes dirigées. Un modèle se compose d'un ensemble de diagrammes, et le niveau inférieur des diagrammes est une extension d'une seule boîte sur le diagramme de niveau supérieur. Le premier niveau est nommé niveau A-0, il représente la fonction principale du système (stockage dans notre cas), et les autres systèmes plus détaillés vont suivre par la suite (figure III.2).



**Figure III.2 :** Hiérarchie des diagrammes des niveaux [15]

### III-3-Analyse préliminaire des risques (APR) :

#### III-3-1- Historique et définition de l'APR :

L'analyse préliminaire des risques a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautique et militaire, elle est utilisée depuis dans de nombreuses autres industries.

L'analyse préliminaire des risques (APR) est une méthode d'usage très général utilisée couramment pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet.

Par conséquent elle ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée [16].

### **III-3-2- Domaine d'application :**

L'APR est une méthode qui est applicable à tous les types d'installation industrielle quel qu'en soit leur taille ou leur secteur d'activité, à condition qu'elle soit conduite dans des contextes temporels précis dans le cycle de vie de l'installation et qu'elle soit en concordance avec des objectifs d'étude bien définis. Et comme son nom l'indique, une APR est utile pour l'appréciation préliminaire des risques lors de la phase de conception d'une installation, la phase exploitation, ou Une évolution de la technologie de l'installation ou une modification dans les procédés ou les opérations industrielles.

### **III-3-3-Objectif :**

L'évaluation préliminaire des risques, au travers de la méthode APR, permet :

- d'identifier les évènements redoutés, leurs causes (événements initiateurs) et leurs conséquences (phénomènes dangereux et effets engendrés).
- de lister les mesures de prévention, de détecteur et de protection ou limitation prises ou envisagées.
- d'évaluer les classes de probabilité d'occurrence et de gravité, ainsi que la cinétique de chaque phénomène dangereux identifié.
- de sélectionner les phénomènes dangereux majeurs, c'est-à-dire susceptibles de conduire à des effets en dehors du site, de ce fait, faire l'objet d'une analyse détaillée des risques.

### **III-3-4-Principe de l'APR :**

L'Analyse Préliminaire des Risques nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation. Ces éléments dangereux désignent le plus souvent :

- Des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités....
- Des équipements dangereux comme par exemple les équipements sous pression, les

équipements de stockage, équipements de zones de réception/expédition, les réacteurs, les fournitures d'utilités (chaudière...).

- Des opérations dangereuses associées au procédé.

A partir de ces éléments dangereux, APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations, qui, si elles ne sont pas maîtrisées, peuvent conduire à l'exposition de cibles à un ou plusieurs phénomènes dangereux.

### **III-3-5-Déroulement de l'APR :**

En respectant les principes de la méthode, le déroulement de celle-ci se fera selon les étapes suivantes :

#### **Étape 1 : Détermination du système étudié**

Cette étape consiste à sélectionner et à déterminer le système à analyser.

#### **Étape 2 : Identification des éléments dangereux**

Ces éléments dangereux désignent le plus souvent des substances ou préparation dangereuses, des différents équipements dangereux que comporte l'installation.

#### **Étape 3 : Détermination des évènements redoutés (ER)**

Détermination des évènements redoutés résultant des situations dangereuses et du déclenchement d'un évènement initiateur en s'appuyant sur le retour d'expérience.

#### **Étape 4 : Détermination des causes et des conséquences**

Énumérer les causes qui sont à l'origine de chaque ER et les conséquences qui peuvent en découler.

#### **Étape 5 : Grille d'évaluation (P et G)**

Mise en place d'une grille d'évaluation de la probabilité (P) d'apparition d'un ER et de la gravité (G) des conséquences engendrées.

#### **Étape 6 : Estimation de la criticité (C) du risque**

Estimation de la probabilité et de la gravité de chaque ER. Par la suite, vient le calcul à partir de ces estimations de la criticité (C) du risque à l'aide de la formule suivante :

$$C = P \times G \quad (1)$$

### Étape 7 : Identification des barrières de sécurité existantes

Cette étape consiste à identifier les mesures de sécurité existantes pour chaque système étudié.

### Étape 8 : Réévaluation de niveau de criticité (C') du risque

Après détermination des mesures de prévention et de protection existantes, une nouvelle estimation de la probabilité (P') et de la gravité (G') est réalisée, puis nous ressortons avec un niveau de risque réévalué

$$C' = P' \times G' \quad (2)$$

### Étape 9 : Hiérarchisation des risques

Hiérarchisation des risques à l'aide de la matrice de criticité, qui est une matrice à deux dimensions (P, G) en ressortant avec les catégories des risques suivants :

- Risques acceptables.
- Risques ALARP.
- Risques inacceptables.

A la fin de ce travail, les résultats seront synthétisés dans un tableau.

Le tableau III.1 est le déploiement type de l'APR qui constitue le produit de cette méthode.

**Tableau III.1:**Déploiement type de l'APR

N°	Événement Redouté	Détails	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesures de Prévention	P'	Mesures de Protection	G'	C'
----	-------------------	---------	--------	--------------	---	---	---	-----------------------	----	-----------------------	----	----

### III-3-6- Évaluation des potentiels de dangers :

#### ➤ Les grilles de cotation

Dans le cadre d'un processus générale de management des risques, SONATRACH a décidé de réaliser une cartographie des risques. À cet effet la société de courtage en assurance GRAS SAVOY a établie des grilles de cotation des risques pour répondre à la demande de l'entreprise [1].

Le paramétrage des grilles de mesure des risques est une étape importante dans les outils APR et HAZOP, Il consiste à déterminer les niveaux de probabilité d'occurrence, niveaux de gravité des évènements redoutés.

❖ Grille de cotation de la probabilité :

Tableau III.2 : Grille de cotation de la probabilité [1].

Echelle de probabilité	1	2	3	4	5
<b>Appréciation quantitative</b> (par unité et par an)	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
<b>Appréciation qualitative</b>	« événement possible mais extrêmement peu probable » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations.	« événement très improbable » : s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.	« événement improbable » : un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.	« événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations.	« événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives.

❖ **Grille de cotation de la gravité :**

**Tableau III. 3 :** Grille de cotation de la gravité [1]

<b>Niveau de gravité</b>		<b>Zone délimitée par le seuil des effets létaux</b>	<b>Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine</b>
<b>E</b>	<b>Désastreux</b>	Plus de 100 personnes exposées en externe	Plus de 1000 personnes exposées en externe
<b>D</b>	<b>Catastrophique</b>	Externe : Entre 10 et 100 personnes exposées Interne : Plus de 100 personnes exposées	Externe : Entre 100 et 1 000 personnes exposées Interne : Plus de 1000 personnes exposées
<b>C</b>	<b>Important</b>	Externe : Entre 1 et 10 personnes exposées Interne : Entre 10 et 100 personnes exposées	Externe : Entre 10 et 100 personnes exposées Interne : Entre 100 et 1000 personnes exposées
<b>B</b>	<b>Sérieux</b>	Externe : Au plus 1 personne exposée Interne : Entre 1 et 10 personnes exposées	Externe : Moins de 10 personnes exposées Interne : Entre 10 et 100 personnes exposées
<b>A</b>	<b>Modéré</b>	Au plus 1 personne exposée	Pas d'effet externe Interne : Au plus 10 personnes exposées

➤ **Matrice d'évaluation des risques**

Le niveau du risque d'un système est caractérisé par un nombre à deux chiffres résultant dans l'ordre :

- Du niveau de gravité.
- Du niveau de probabilité.

Une grille portant en abscisse les gravités et en ordonnée les probabilités permet de visualiser les zones critiques. Dans tous les cas, l'objectif est de réduire par des actions

appropriées le niveau de risque des événements indésirables pour les ramener à un niveau de risque acceptable.

Les actions à mener consistent à :

- **Soit abaisser la probabilité d'occurrence** de l'événement indésirable : mise en place de procédures, accroissement de fiabilité des éléments les plus faibles, utilisation de redondances.
- **Soit diminuer le niveau de gravité** en limitant les conséquences de l'événement indésirable : mise en place d'ouvrages spéciaux de protection, d'isolement, d'automatismes de mise en sécurité, améliorations des protections collectives et/ou individuelles.

**L'approche probabiliste** vise à privilégier les moyens de prévention et donc à réduire la probabilité d'occurrence.

**L'approche déterministe** vise à compléter les moyens de protection et donc à réduire le niveau de gravité.

❖ **Hierarchisation des risques :**

Cette étape va consister à comparer le risque potentiel à des critères de risques définis.

Pour chaque élément, le niveau de risque potentiel sera évalué. Pour cela on aura recours à une matrice de criticité adaptée à la section de l'étude.

Chaque élément ou composant évalué avec la probabilité d'occurrence du mode de défaillance et sa gravité se trouvera positionner dans la grille de criticité suivante :

**Tableau III. 4 : Grille de criticité [1]**

		Niveau De Gravité				
		Modéré (A)	Sérieux (B)	Important (C)	Catastrophique (D)	Désastreux (E)
Niveau De Probabilité	Courant (5)	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé
	Probable (4)	Basse	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé
	Improbable (3)	Basse	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé
	Très Improbable (2)	Basse	Basse	Moyen	Moyen	Elevé
	Extrêmement Peu Probable (1)	Basse	Basse	Moyen	Moyen	Moyen

Trois niveaux de risque sont définis selon la position dans la matrice :

- **La criticité C1** : (zone verte) correspond à un risque faible « risque acceptable » ne justifiant pas d'action supplémentaire.
- **La criticité C2** : (zone jaune) correspond à un risque moyen si la variation d'un paramètre (probabilité ou gravité) seulement peut amener le niveau de risque à un niveau de gravité élevé, des actions doivent être mises en place pour réduire ce paramètre. Si non, des mesures de prévention sont mises en place afin de maintenir ce risque à ce niveau.
- **La criticité C3** : (zone rouge) correspond à un risque élevé « risque inacceptable » nécessitant la prise de mesures urgentes pour réduire ce risque à un niveau acceptable.

### **III-4-Arbre de Défaillance (AdD):**

#### **III-4-1- Historique et définition de l'AdD :**

La méthode de l'Arbre de Défaillance (AdD) naquit en 1961-62 dans les laboratoires Bell Telephone Company. Développée par Watson dans le cadre du projet des missiles «Minuteman». En 1965, Haasl eut donné les règles de base pour la construction des AdD, Le calcul des AdD est devenu plus complet dès l'année 1970 grâce à Vesely. Les années 1980 sont marquées par de nouvelles extensions (traitement des AdD non cohérents, flous, ...). Récemment, de nouveaux algorithmes ont augmenté considérablement les performances de traitement et ont donné la possibilité de traiter des grands AdD.

L'AdD est un diagramme logique d'un accident (événement indésirable ou événement-sommet), exprimé en termes de combinaisons d'événements conduisant à celui-ci. Son traitement qualitatif met en évidence un ensemble de «scénarios» dont la réalisation de chacun d'eux entraîne la réalisation de l'accident. Ces «scénarios» appelés coupes sont donnés par une expression logique dite fonction de structure (FdS) de l'AdD. La probabilité d'occurrence de l'accident est donnée par un traitement quantitatif de l'AdD ; elle est calculée à partir des probabilités des EdB [17].

#### **III-4-2- Domaine d'application :**

L'analyse par arbre des défaillances est maintenant appliquée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie chimique... [16].

### **III-4-3- Objectif :**

L'objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié.

L'objectif « quantitatif » est d'évaluer la vraisemblance de la survenue de l'événement étudié à partir des combinaisons d'événements élémentaires qui peuvent le produire. Si on connaît les probabilités de ces événements on peut en déduire la probabilité de l'événement étudié et l'impact sur celle-ci d'une réduction (ou augmentation) de telle ou telle des probabilités élémentaires.

### **III-4-4- Principe de l'Add :**

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.

Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté. Ainsi, l'analyse par arbre des défaillances permet d'identifier les successions et les combinaisons d'événements qui conduisent des événements de base jusqu'à l'événement indésirable retenu [16].

Les liens entre les différents événements sont réalisés grâce à des portes logiques « ET » et « OU ». Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente. Il convient d'ajouter à ces étapes, une étape préliminaire de connaissance du système. Nous verrons que cette dernière est primordiale pour mener l'analyse et qu'elle nécessite le plus souvent une connaissance préalable des risques.

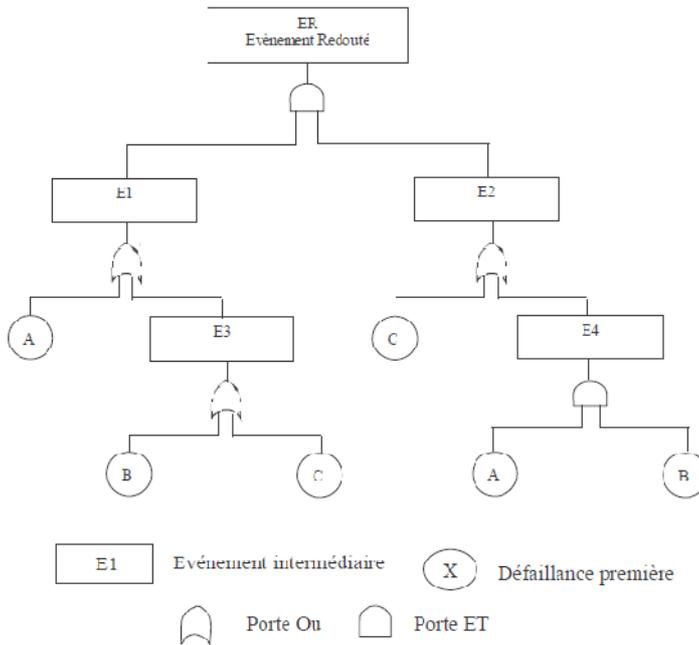
### **III-4-5- Déroulement de l'Add :**

La méthode d'analyse par Add comporte six étapes :

1. Définition du système à étudier.
2. Définition de l'événement indésirable.
3. Construction de l'Add.
4. Traitement qualitatif de l'Add,
5. Traitement quantitatif de l'Add :

- collecte des données quantitatives relatives aux EdB.
- calcul de la probabilité de l'ES de l'AdD.
- analyse d'importance et calcul d'incertitude.

6. Analyse des résultats et recommandations.



**Figure III.3:** Exemple de l'AdD [16]

- **Évènement redouté** : Événement conventionnellement défini, dans le cadre d'une analyse de risque, au centre de l'enchaînement accidentel. Généralement, il s'agit d'une perte de confinement pour les fluides et d'une perte d'intégrité physique pour les solides.
- **Événements intermédiaires** : L'événement étudié étant défini, l'étape suivante est de le décrire en une combinaison logique (conjonction ou disjonction) de deux ou plusieurs événements plus réduits.
- **Événements de base** : Un événement de base est un événement qui ne se décompose plus en événements plus fins.
- **Portes logiques** : Les deux connecteurs logiques de base sont ET et OU. Toutes les combinaisons logiques s'expriment avec ces deux connecteurs.



### ➤ COUPES MINIMALES

Une coupe minimale représente la plus petite combinaison d'évènements pouvant conduire à l'évènement indésirable ou redouté. On parle parfois également de « chemin critique ».

## **III-5-Arbre d'évènements (ADE) :**

### **III-5-1- Historique et définition de l'ADE :**

L'analyse par arbre d'évènements a été développée au début des années 1970 pour l'évaluation du risque lié aux centrales nucléaires à eau légère. Elle apporte une aide précieuse pour traiter des systèmes comportant de nombreux dispositifs de sécurité et de leurs interactions.

L'analyse par arbre d'évènements est une méthode qui permet d'examiner, à partir d'un évènement initiateur, l'enchaînement des évènements pouvant conduire ou non à un accident potentiel. Elle suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les évènements qui en découlent. À partir d'un évènement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs [18].

### **III-5-2- Domaine d'application :**

Cette méthode est Particulièrement utilisée dans le domaine du nucléaire, son utilisation s'est étendue à d'autres secteurs d'activité.

Cette méthode est aussi utilisée dans le domaine de l'analyse après accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système [18].

### **III-5-3- Objectif :**

L'objectif de l'ADE est de définir les conséquences de l'évènement redouté centrale.

### **III-5-4- Principe l'ADE :**

L'analyse par arbre des défaillances, comme nous l'avons vu précédemment, vise à déterminer, dans une démarche déductive, les causes d'un évènement indésirable ou redouté retenu a priori. A l'inverse, l'analyse par arbre d'évènements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les évènements qui en

découlent. A partir d'un événement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention...

L'ADE (Arbre Des Evénements) est un procédé inductif qui montre tous les résultats possibles résultant d'un événement accidentel, tenant compte, que les dispositifs de sécurité installée fonctionnent ou pas. La démarche généralement retenue pour réaliser une analyse par arbre d'évènements est la suivante :

- Définir l'événement initiateur à considérer.
- Identifier les fonctions de sécurité prévues pour y faire face.
- Construire l'arbre.
- Décrire et exploiter les séquences d'évènements identifiées.

### **III-6- Nœud-Papillon :**

#### **III-6-1- Historique et définition :**

Le concept du nœud de papillon a été introduit par la compagnie ICI (Imperial Chemical Industries).Après l'accident survenu sur la plate-forme pétrolière Paper-Alpah, la compagnie Royal Dutch/Shell a développé cette technique d'analyse au début des années 1990 afin d'améliorer la sécurité sur de telles installations.

Nœud de papillon est une méthode d'analyse des risques à la fois inductive et déductive.

Elle permet :

- d'apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action des mesures de sécurité sur le déroulement du scénario envisagé.
- de sensibiliser efficacement les opérateurs sur la base d'un schéma détaillé mais compréhensible par tous.

C'est une construction graphique représentée sous la forme d'une double arborescence. Combinant un arbre de défaillance et un arbre d'événement [18].

### **III-6-2- Domaine d'application :**

Le Nœud Papillon est utilisé dans les différents secteurs industriels par des entreprises comme Shell qui a été à l'origine du développement de ce type d'outil.

### **III-6-3- Objectif :**

- Le développement d'une méthodologie plus précise et harmonisée d'analyse de risque pour les études de dangers, dans le contexte de l'application de la directive Seveso II.
- L'identification et la qualification des principaux phénomènes accidentels majeurs (Appréciation de la probabilité et de la gravité des effets physiques en utilisant, par exemple, la représentation sous forme de nœud de papillon).
- L'évaluation de la performance des fonctions et éléments de sécurité liés à la prévention des phénomènes accidentels.
- L'identification de la vulnérabilité de l'environnement des sites.

### **III-6-4- Principe de Nœud-Papillon :**

Le fondement de la méthode du « nœud papillon » est relativement simple. Elle propose pour un même événement redouté de réunir un arbre de défaillance pour expliciter les causes et un arbre d'événements pour expliciter les conséquences.

Le point central du nœud papillon est constitué par un événement redouté central qui peut être par exemple une perte de confinement.

La partie gauche de l'événement redouté central est constituée par un arbre de défaillance qui permet d'analyser les combinaisons de causes, et de valoriser les barrières de prévention mises en place pour prévenir l'apparition de l'événement redouté central.

La partie droite de l'événement redouté central est constituée par un arbre d'événement qui permet de différencier les conséquences en fonction du fonctionnement ou non des mesures de protections [16].

Les Mesures de Maitrise des Risques sont représentées sur le nœud papillon par des barres verticales, symbolisant le fait qu'elles s'opposent au développement du scénario d'accident.

La figure (Figure III.4) présente la structure de nœud papillon :

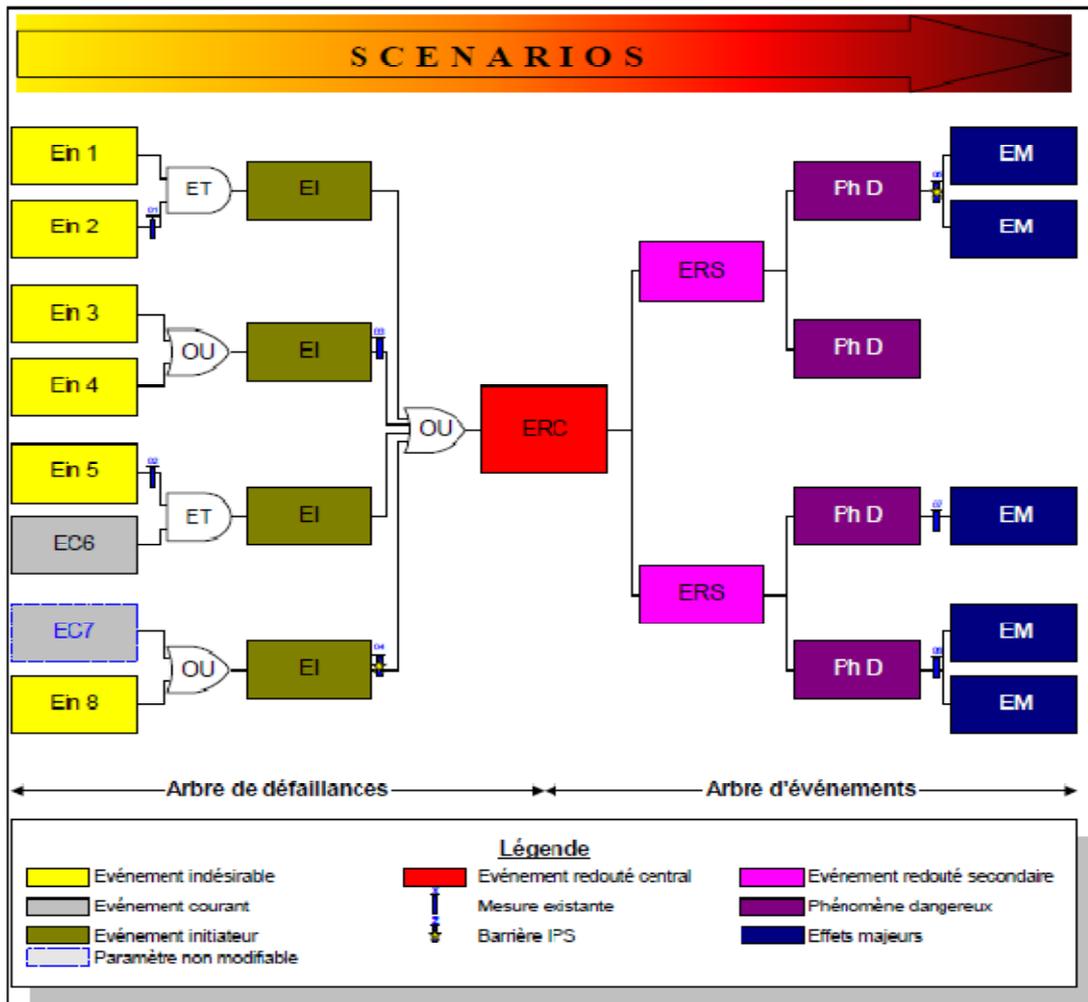


Figure III.4 : Schéma d'un Nœud-Papillon [1]

### III-6-5- Événements composant un Nœud-Papillon :

Le tableau ci-dessous présente les événements composant un Nœud-Papillon :

**Tableau III.5 : Evénements composant un Nœud-Papillon [16]**

<b>Désignation</b>	<b>Signification</b>	<b>Définition</b>	<b>Exemples</b>
<i>EIn</i>	<i>Evènement Indésirable</i>	<i>Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelles définies.</i>	<i>Le surremplissage ou un départ d'incendie à proximité d'un équipement dangereux peuvent être des évènements initiateurs</i>
<i>EC</i>	<i>Evènement Courant</i>	<i>Evènement admis survenant de façon récurrente dans la vie d'une installation.</i>	<i>Les actions de test, de maintenance ou la fatigue d'équipements sont généralement des évènements courants.</i>
<i>CI</i>	<i>Evènement Initiateur</i>	<i>Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique.</i>	<i>La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des évènements initiateurs</i>
<i>ERC</i>	<i>Evènement Redouté Central</i>	<b><i>Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse</i></b>	<b><i>Rupture, Brèche, Ruine ou Décomposition d'une substance dangereuse dans le cas d'une perte d'intégrité physique</i></b>
<i>ERS</i>	<i>Evènement Redouté Secondaire</i>	<i>Conséquence directe de l'évènement redouté central, l'évènement redouté secondaire caractérise le terme source de l'accident</i>	<i>Formation d'une flaque ou d'un nuage lors d'un rejet d'une substance diphasique</i>
<i>Ph D</i>	<i>Phénomène Dangereux</i>	<i>Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs</i>	<i>Incendie, Explosion, Dispersion d'un nuage toxique</i>
<i>EM</i>	<i>Effets Majeurs</i>	<i>Domages occasionnés au niveau des éléments vulnérables (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un phénomène dangereux</i>	<i>Effets létaux ou irréversibles sur la population Synergies d'accident</i>
<i>Barrières ou Mesures de Prévention</i>		<i>Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d'intégrité physique</i>	<i>Peinture anti-corrosion, Coupure automatique des opérations de dépotage sur détection d'un niveau très haut</i>
<i>Barrières ou Mesures de Protection</i>		<i>Barrières ou mesures visant à limiter les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique</i>	<i>Vannes de sectionnement automatiques asservies à une détection (gaz, pression, débit), Moyens d'intervention...</i>

### **III-6-6- Déroulement de Nœud-Papillon :**

Le Nœud Papillon, s'inspirant directement des arbres des défaillances et d'évènements, doit être élaboré avec les mêmes précautions.

S'agissant d'un outil relativement lourd à mettre en place, son utilisation est généralement réservée à des évènements jugés particulièrement critiques pour lesquels un niveau élevé de démonstration de la maîtrise des risques est indispensable.

En règle générale, un Nœud Papillon est construit à la suite d'une première analyse des risques menée à l'aide de méthodes plus simples comme l'APR ou l'HAZOP par exemple [18].

### **III-7- Conclusion :**

Les méthodes d'analyse des risques sont des outils d'aide à la réflexion et, leur qualité est fortement liée à leurs contexte et conditions de mise en œuvre. Il est donc indispensable de se pencher brièvement sur les raisons qui justifient l'utilisation de telles méthodes.

## **Chapitre IV**

# **Application des méthodes d'analyse sur le bac de stockage 81TK-103**

## **IV-1-Introduction :**

L'analyse des risques a pour objectif d'identifier et d'évaluer les risques génériques relatifs au stockage du GNL.

Pour cela, il convient d'évaluer pour chaque scénario susceptible, un niveau de gravité, qui représente l'étendue des conséquences du scénario en cas d'occurrence ; et un niveau de fréquence, qui correspond à la probabilité pour que le scénario identifié se réalise.

Le couple gravité - fréquence donne le niveau de criticité du scénario considéré.

## **IV-2- Application de l'APR :**

### **IV-2-1- Documents pré-requis :**

L'analyse préliminaire des risques a été réalisée sur la base des documents du complexe GL1K suivants :

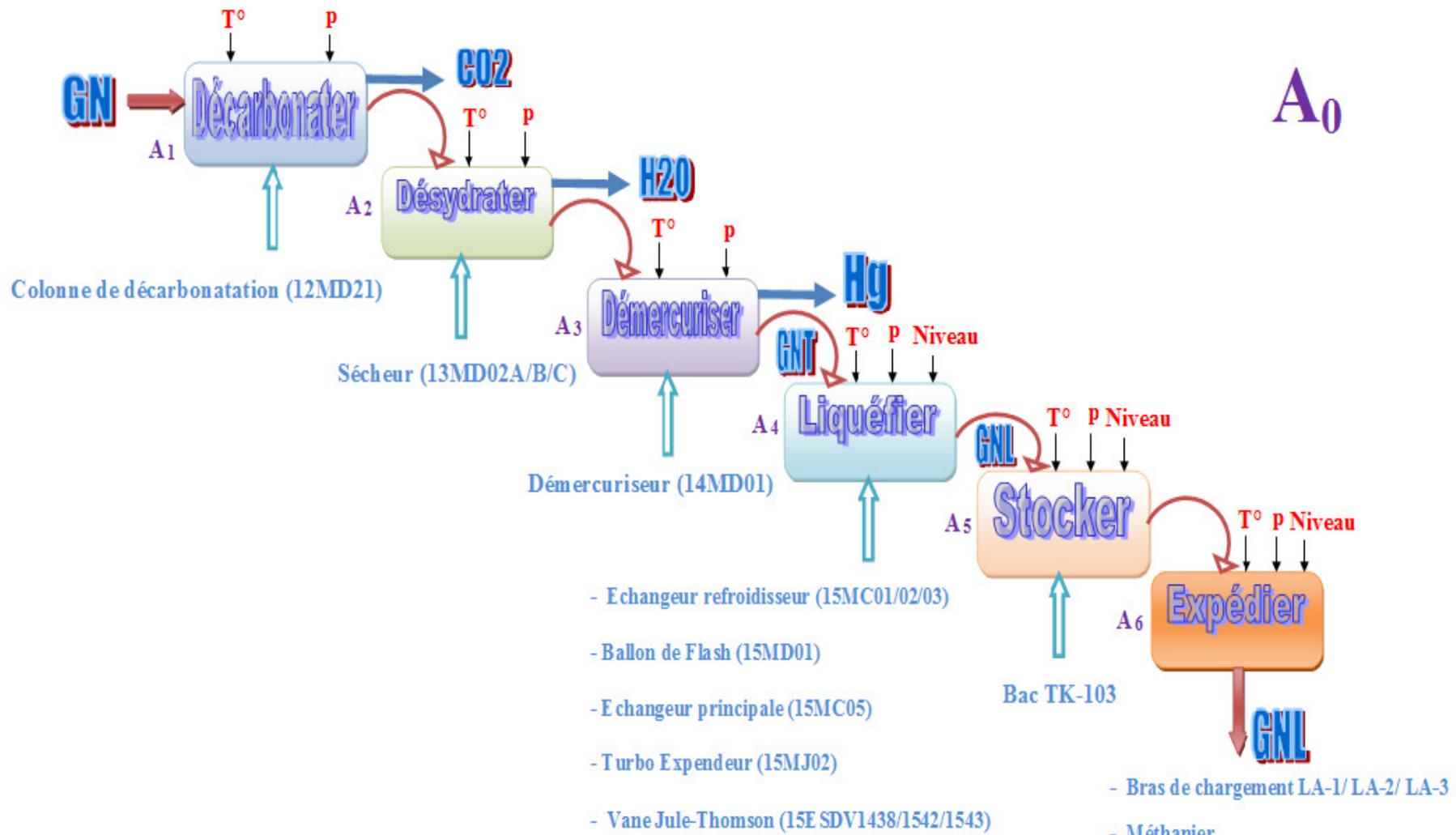
- Plan d'implantation du site.
- Description des installations.
- Informations sur le process (T°, débits, pression, produits, temps de fonctionnement...) en fonction des différents systèmes, Disponibilité exigée lors des analyses de risque.
- Schéma général du process.
- PCF et PID.
- Accidentologie des unités.
- Liste des produits présents dans l'unité et fiches de données de sécurité associées.

Le tableau de réalisation de l'APR est présenté dans l'annexe 1.

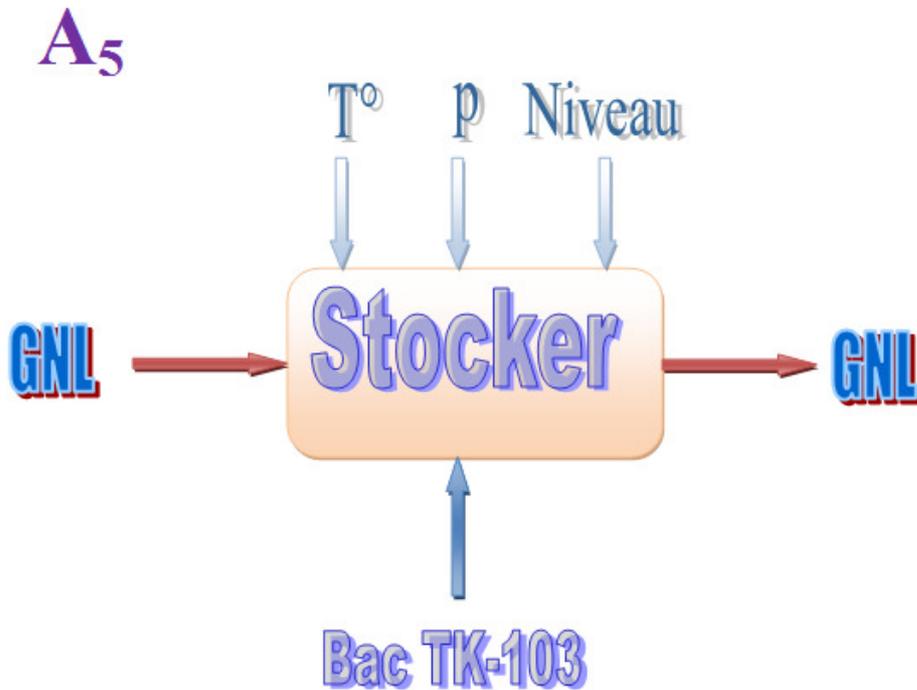
### **IV-2-2- Définition du système :**

Le système à étudier est sélectionné sur la base de la description fonctionnelle réalisée par la méthode SADT, et son environnement est décrit afin de réaliser un découpage fonctionnel des sous-systèmes. Notre sous système est « Stockage du GNL », c'est le niveau A<sub>5</sub>

(Figure IV.1) .



**Figure IV.1 :** Décomposition fonctionnelle par la SADT des activités de complexe GL1/K [2]



**Figure IV.2 :** Actigramme SADT du système stockage GNL [2]

#### IV-2-3-Synthèse de l'APR :

L'APR a été réalisée sur un seul bac (TK-103) et est applicable aux autres bacs. L'APR du système bac de stockage a permis de traiter 14 scénarios.

La répartition des risques est présentée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.1 :** Répartition des risques après l'application des mesures préventifs [1]

		Niveau De Gravité				
		Modéré (A)	Sérieux (B)	Important(C)	Catastrophique(D)	Désastreux (E)
Niveau De probabilité	Courant (5)	0	0	0	0	0
	Probable (4)	0	0	0	0	2
	Improbable (3)	0	1	1	0	3
	Très Improbable(2)	0	0	2	0	3
	Extrêmement Peu Probable (1)	0	0	0	0	2

Les résultats obtenus à partir de l'APR Sont représentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.2 : Résultats de l'APR après l'application des mesures préventifs**

Catégorie du risque	Nombre d'ER	Pourcentage (%)
Risques acceptables	<b>00</b>	<b>00,00</b>
Risques tolérables	<b>06</b>	<b>42,86</b>
Risques inacceptables	<b>08</b>	<b>57,14</b>
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>100</b>

L'analyse APR a permis de mettre en évidence 02 scénarios critiques à améliorer, c'est-à-dire le couple de probabilité et gravité (4, E).

❖ **Liste des EIPS**

La liste des EIPS choisis à l'issue de l'APR est fournie en annexe 2.

❖ **L'effet des mesures de maîtrise des risques**

Dans le tableau ci-dessous on prend en considération l'action des EIPS sur l'évolution des risques identifiés :

**Tableau IV.3 : Répartition des risques après l'action des EIPS**

		Niveau De Gravité				
		Modéré (A)	Sérieux (B)	Important (C)	Catastrophique(D)	Désastreux (E)
Niveau De probabilité	Courant (5)	0	0	0	0	0
	Probable (4)	0	0	0	0	0
	Improbable(3)	0	0	0	2	0
	Très Improbable (2)	0	2	0	3	0
	Extrêmement Peu Probable (1)	0	2	0	3	2

Les pourcentages de chaque niveau de risque étudiés dans l'APR sont donnés dans le Tableau IV. 4. Le résultat nous indique les composants qui présentent des risques critiques et cela même après mise en place des mesures de prévention et de protection.

**Tableau IV.4 : Résultats de l'APR après l'action des EIPS**

Catégorie du risque	Nombre d'ER	Pourcentage (%)
Risques acceptables	<b>04</b>	<b>28,57</b>
Risques tolérables	<b>08</b>	<b>57,15</b>
Risques inacceptables	<b>02</b>	<b>14,28</b>
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>100</b>

#### **IV-2-4-Interprétation de l'APR :**

Les scénarios de gravité désastreuse (E) ont été atténués en réduisant leur probabilité d'occurrence du fait de mesure de maîtrise de risque existant. La gravité des conséquences ne peut être changée. Ces scénarios restent critiques.

Il est bien apparent que 29% se trouve dans la catégorie des risques acceptables. Ceci est dû aux mesures de préventions et aux mesures de protection opérationnelles mises en place.

Les risques tolérables occupent 57% des risques recensés, ceci est lié à la complexité des équipements, Par contre les risques inacceptables occupent la plus petite proportion avec 14%.

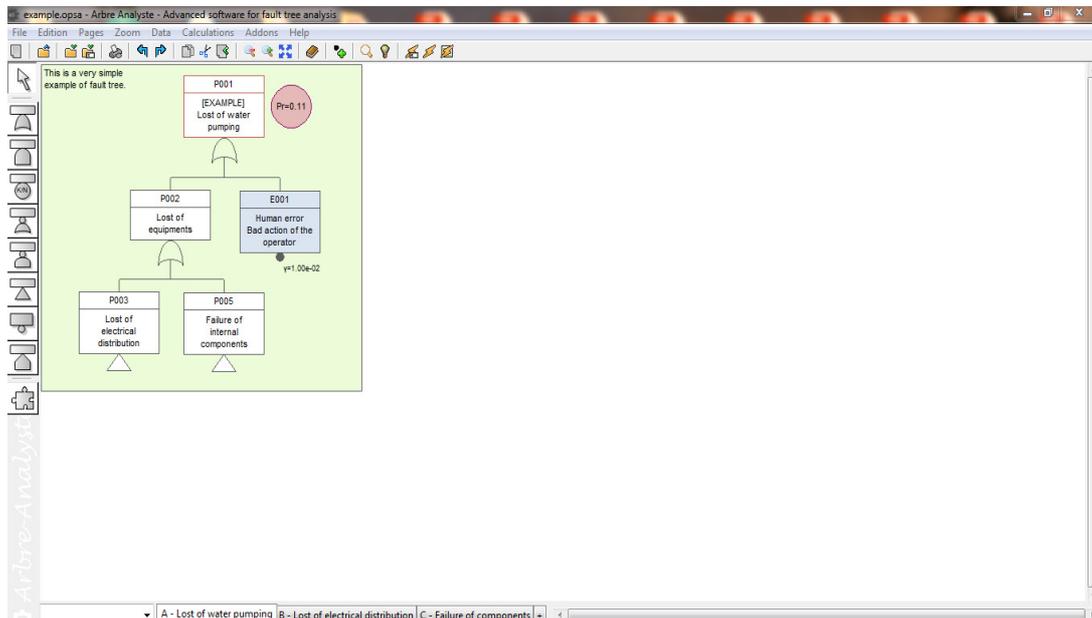
Cette étude nous a permis d'identifier plusieurs scénarios d'accident et de vérifier l'efficacité des EIPS qui les maîtrise. Elle a montrée aussi que la perte de confinement du bac est la conséquence commune entre les scénarios déterminé et qu'elle peut conduire à une catastrophe, et par le biais de ce problème on va réaliser une étude approfondie par l'utilisation de l'arbre de défaillance et Nœud-papillon pour déterminer l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à cette perte de confinement.

#### **IV-3- Application de l'Add :**

##### **IV-3-1-Présentation du logiciel Arbre-Analyste :**

Nous avons utilisé le logiciel Arbre-Analyste pour la construction de l'Add. Arbre-Analyste est un nouveau logiciel Open-Source dont le but est de standardiser et de pérenniser les modélisations par arbre de défaillances en s'appuyant sur deux piliers :

Le format Open-PSA et le moteur de calcul XFTA. On a utilisé la Version 2.3.0 Stable – 23/09/2015 (Figure IV.3).



**Figure IV.3 :** Interface du logiciel Arbres-Analyste

### **IV-3-2-Choix du système à étudier :**

On va appliquer l'Add sur le bac de stockage de GNL (TK-103).

### **IV-3-3-Choix de l'événement redouté :**

L'E.R. est porté sur la perte de confinement au niveau du bac du stockage de GNL (TK-103).

### **IV-3-4-Identification des événements intermédiaires :**

Nous avons identifié trois événements pouvant causer la perte de confinement au niveau du bac de stockage de GNL (TK-103) :

- Défaillance matérielle.
- Agression externe.
- Défaillance de procédé.

L'arbre de défaillance est donné dans la figure ci-dessous (Figure IV.4) :

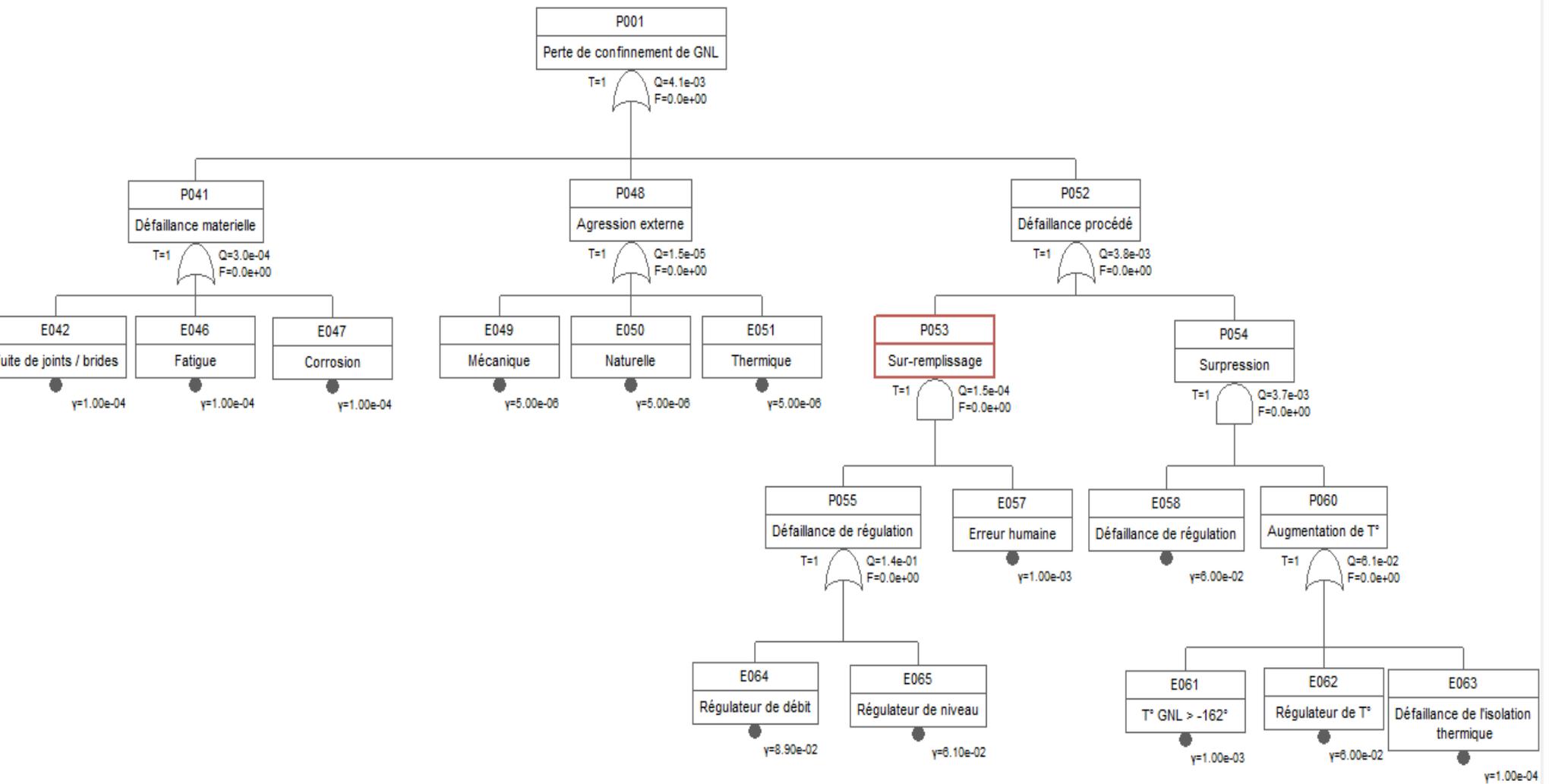


Figure IV.4 : Arbre de défaillance d'une perte de confinement de GNL

### IV-3-5-Analyse quantitative :

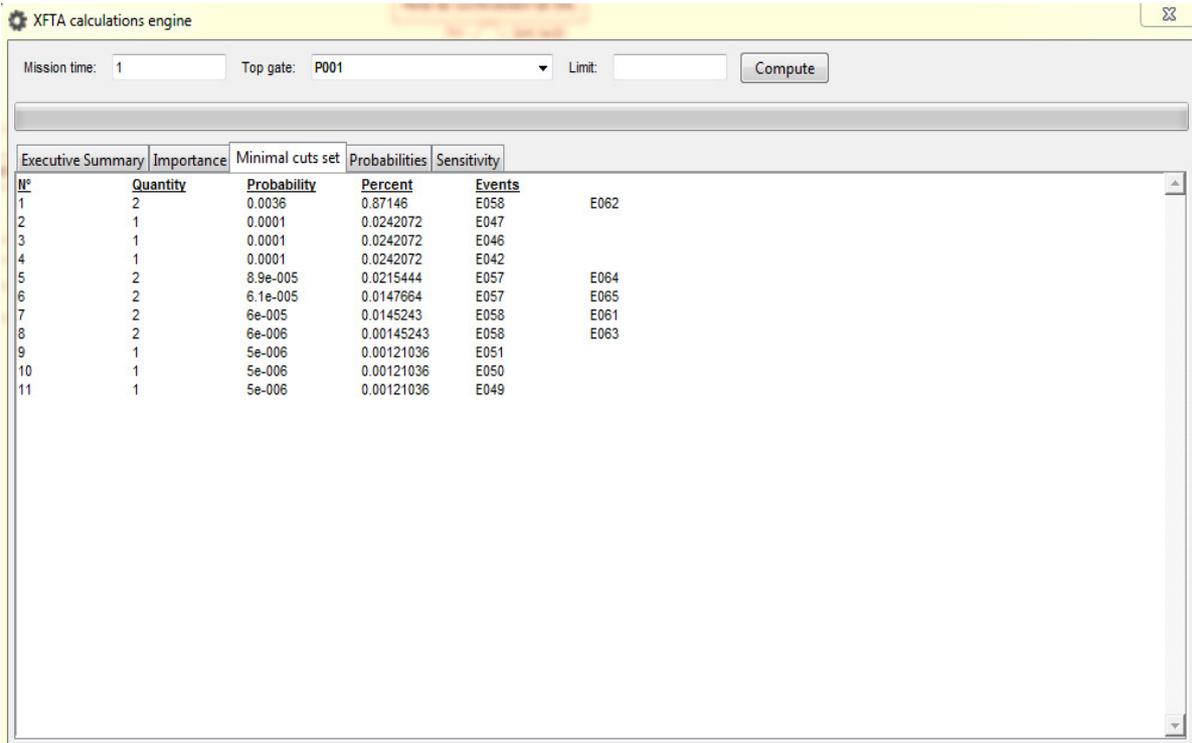
#### IV-3-5-1-Estimation des probabilités de la survenance des évènements de base :

Afin de tendre vers une estimation plus juste de la probabilité des évènements de bases, nous nous sommes inspirés des données contenues dans la documentation de SONATRACH annexe 3.

La probabilité de la perte de confinement résultante :  $4.1 \cdot 10^{-3}$

#### IV-3-5-2-Coupes minimales :

L'une des méthodes d'effectuer une coupe est de calculer les pourcentages de la contribution des évènements de base à la survenance de l'E.R (Figure IV.5).



The screenshot shows the 'XFTA calculations engine' window. At the top, there are input fields for 'Mission time: 1', 'Top gate: P001', and 'Limit:'. A 'Compute' button is visible. Below the inputs is a table with columns: 'Executive Summary', 'Importance', 'Minimal cuts set', 'Probabilities', and 'Sensitivity'. The table contains 11 rows of data, each representing an event (E042 to E062) with its corresponding importance, probability, and percentage contribution to the top gate.

№	Quantity	Probability	Percent	Events
1	2	0.0036	0.87146	E058
2	1	0.0001	0.0242072	E047
3	1	0.0001	0.0242072	E046
4	1	0.0001	0.0242072	E042
5	2	8.9e-005	0.0215444	E057
6	2	6.1e-005	0.0147664	E057
7	2	6e-005	0.0145243	E058
8	2	6e-006	0.00145243	E058
9	1	5e-006	0.00121036	E051
10	1	5e-006	0.00121036	E050
11	1	5e-006	0.00121036	E049

**Figure IV.5 :** Pourcentage de la contribution des évènements de base à la survenance de l'E.R .

On trouve que deux évènements de base (défaillance du régulateur de pression et du régulateur de température) contribuent à eux seuls avec 87,14 % à la survenance de l'E.R.

#### **IV-3-6- Recommandations :**

Afin de réduire la probabilité d'apparition de l'évènement redouté, on pourrait se suffire d'agir sur les coupes minimales. En agissant sur les deux événements ressortis, on réduira cette probabilité de 87%.

#### **IV-4- Application de l'ADE :**

##### **IV-4-1- Les scénarios de référence :**

A la suite de l'étude APR, il a été retenu que le scénario le plus dangereux est La perte de confinement dans le système de stockage (bride de pied du bac) qui va dissiper une quantité de gaz liquéfié provoquant l'un des phénomènes dangereux cité dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.5 : Scénario le plus probable**

Evénement redouté	conséquence
Fuite du GNL dans le système de stockage suite à une Fuite moyenne au niveau de la bride de pied bac du bac TK-103	Dispersion atmosphérique Feu de nappe UVCE Flash Fire

##### **IV-4-2- Fréquences d'occurrence de l'évènement :**

La fréquence d'occurrence de l'évènement redouté central est calculée par la méthode AdD en utilisant des données contenues dans la documentation de SONATRACH (Annexe 3).

##### **IV-4-3- Calcul de la probabilité moyenne de défaillance sur demande (PFD) du système instrumenté de sécurité (SIS) du bac TK-103 :**

###### **IV-4-3-1-Présentation de logiciel GRIF :**

Le logiciel GRIF est un logiciel d'analyse des systèmes qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement. Développée au sein de l'entreprise Total, GRIF bénéficie de plus de 25 ans de Recherche et Développement.

Le module que nous avons utilisé du logiciel GRIF est un module permettant de faire des calculs de PFD (Figure IV.6) [21].

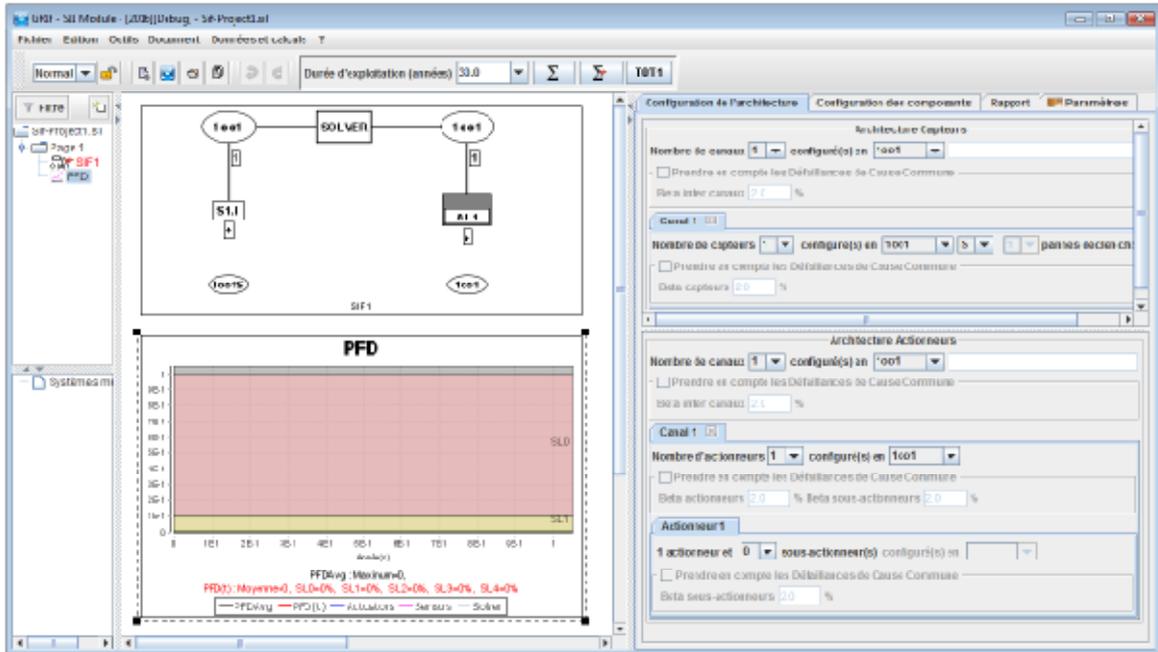


Figure IV.6 :Interface du logiciel GRIF [21]

#### IV-4-3-2-Les composants de SIS du bac TK-103:

Pour calculer le PFD du SIS du bac TK-103 on a utilisé le GRIF-2017.3, le SIS est composé de :

- 08 Capteurs fonctionnent en mode 2003 :
  - 03 Détecteurs de Gaz catalytiques fonctionnant en mode 1003.
  - 04 Détecteurs de Gaz Infrarouges fonctionnant en mode 1004.
  - 01 Détecteurs de température froide fonctionne en mode 1001.
- Un automate programmable.
- Un actionneur (Vanne d'arrêt d'urgence ESD).

La figure ci desous représente l'architecture du SIS (Figure IV.7) :

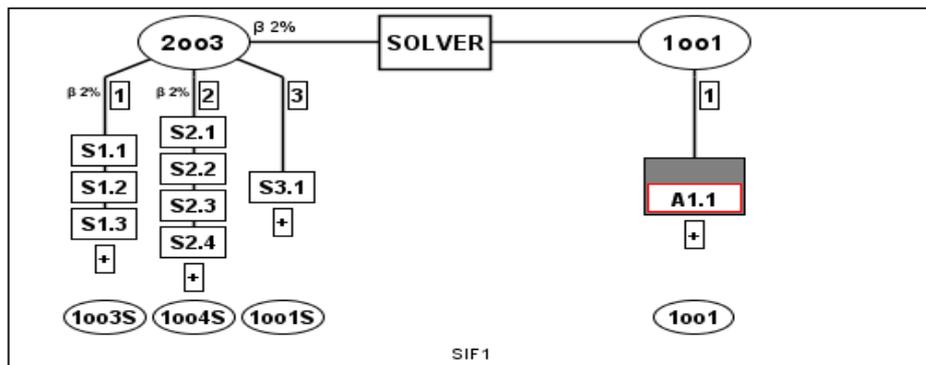


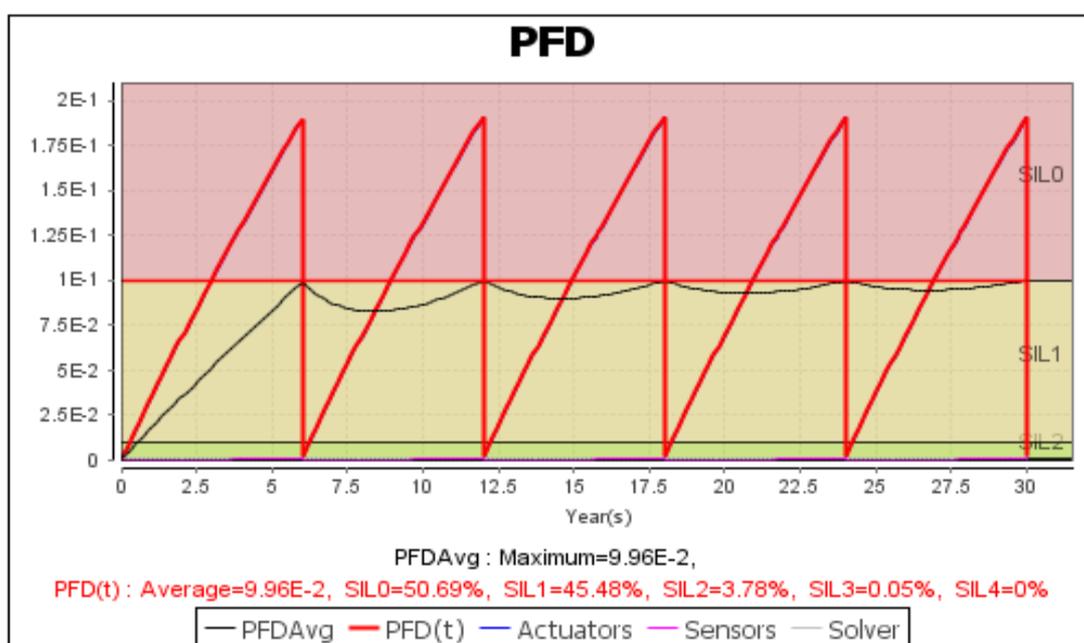
Figure IV.7 : Architecture du SIS

Les Taux de défaillance pour chaque type d'élément du SIS (les détecteurs de gaz, l'automate, et la vanne d'arrêt d'urgence) sont représentés dans le tableau suivant [19] :

**Tableau IV.6 :** Donnée de fiabilité relative des éléments constituant le SIS

	Mode de défaillance	$\lambda$ (h <sup>-1</sup> ) (Taux de défaillance)
Détecteur de Gaz catalytique	Non fonctionnement sur demande	$2,38 \cdot 10^{-6}$
Détecteur de Gaz infrarouge	Non fonctionnement sur demande	$3,64 \cdot 10^{-6}$
Détecteur de Température froide	Non fonctionnement sur demande	$2,57 \cdot 10^{-6}$
Automate	Défaut de l'automate	$5 \cdot 10^{-5}$
Vanne ESD	Non fermeture sur demande	$15,92 \cdot 10^{-6}$

Les résultats du PFD données par GRIF sont affichés sur la figure suivante :



**Figure IV.8 :** PFD du SIS

#### IV-4-4- Fréquence d'occurrence des conséquences :

L'estimation réaliste des probabilités d'ignition est un paramètre essentiel de l'évaluation des conséquences de l'accident et du niveau de risque qui leur est associé.

##### ➤ Probabilité d'ignition instantanée

Le « purple book » recommande les valeurs figurant dans le Tableau IV.7:

**Tableau IV.7:** Probabilité d'ignition instantanée pour une installation fixe [20]

Source		Substances		
Continué	Instantané	Liquide	Gaz (faible réactivité)	Gaz (moyenne/ fort réactivité)
< 10 kg/s	<1000 kg	0,065	0,02	0,2
10-100 kg/s	1000-10000 kg/s	0,065	0,04	0,5
> 100 kg/s	> 10000 kg/s	0,065	0,09	0,7

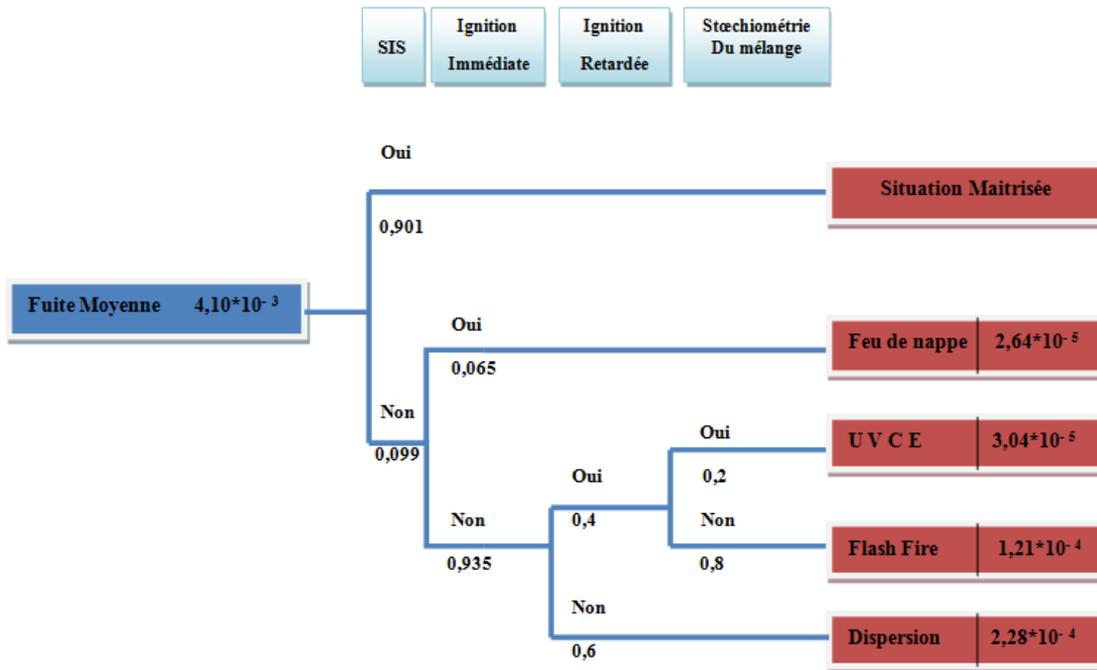
##### ➤ Probabilité d'ignition retardée

Le tableau IV.8 suivant représente les probabilités d'ignition en une minute cité dans (Purple book) avec un ajustement relative aux conditions de site.

**Tableau IV.8:** Probabilité d'ignition en une minute [20]

Source	Probabilité d'ignition dans une Minute
<b>Source Ponctuelle</b>	
Véhicule	0,40
Torche	1,00
Four à l'extérieur	0,90
Four à l'intérieur	0,45
Chaudière à l'extérieur	0,45
Chaudière à l'intérieur	0,23
<b>Source Linéaire</b>	
Source de transmission	0,2 par 100m
Route	0,06
Chemin de fer	0,011
<b>Source surfacique</b>	
Installation chimique	0,90 par site
Raffinerie de pétrole brut	0,90 par site
<b>Source de population</b>	
Résidentiel	0,01 par personne
Force (employées)	0,01 par personne

Les fréquences d'occurrence de chaque phénomène dangereux sont représentées sur l'arbre d'événement, dans la figure ci-dessous. Ces fréquences sont calculées à partir de la fréquence de la fuite et les probabilités d'ignition :



**Figure IV.9:** Arbre d'événement d'une fuite moyenne au niveau du bac TK-103

#### IV-4-5- Détermination des probabilités des phénomènes dangereux:

- La probabilité de l'événement redouté central (ERC) est calculée à partir de l'AdD, est de  $4,10 \cdot 10^{-3}$
- La probabilité d'ignition immédiate est de 0,065 pour un débit du gaz  $> 100$  kg/s
- La probabilité d'ignition retardée est de 0,4
- Les probabilités des phénomènes dangereux sont :
  - Feu de Nappe (FN) =  $(4,10 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,099 \cdot 0,065 = 2,64 \cdot 10^{-5}$
  - Unconfined Vapour cloud explosion (UVCE) =  $(4,10 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,099 \cdot 0,935 \cdot 0,4 \cdot 0,2 = 3,04 \cdot 10^{-5}$
  - Flash Fire (FF) =  $(4,10 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,099 \cdot 0,935 \cdot 0,4 \cdot 0,8 = 1,21 \cdot 10^{-4}$
  - Dispersion =  $(4,10 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,099 \cdot 0,935 \cdot 0,6 = 2,28 \cdot 10^{-4}$

#### IV-5- Application de Nœud-papillon :

Pour construire notre nœud-papillon, on a le point centrale, l'événement redouté central est la perte de confinement et de lui affecter du côté gauche un arbre de défaillance pour expliciter les causes, et du côté droit un arbre d'événements pour expliciter les conséquences

et les effets majeurs des phénomènes dangereux, après on met en place les barrières de sécurité suivantes :

- 1 Plan de circulation.
- 2 Plan de levage.
- 3 Système d'arrosage et refroidissement.
- 4 Déclenchement sur niveau très très haut (LAHH81-10/14/20) qui entraîne la fermeture automatique la vanne d'admission depuis les unités de liquéfaction et la vanne de transfert.
- 5 présence de soupapes de transfert (PSV8115 /8117) vers le bac, qui dirige le GNL vers la cuvette de rétention en cas de niveau trop haut.
- 6 présences de vanne de sécurité de pression (PCV8116)
- 7 présences de (PSV8104), bypass des PSV évacuant la pression vers la torche (FL101) en cas de montée en pression dans le bac.
- 8 Soupapes à l'atmosphère (PSV8113- A/B/C/D) tarée à 120 mbar relatif.
- 9 Event (PV8116).
- 10 Event manuel dôme de secours.
- 11 Maintenance.
- 12 Inspection périodique.
- 13 Maintien en froid en permanence des bacs de stockage (recirculation, brassage).
- 14 Peinture anticorrosive.
- 15 Détecteur de gaz (GG).
- 16 Détecteur de température froide(GT).
- 17 Camera de surveillance.
- 18 Procédure de transfert du contenu vers un autre bac (isolement du bac).
- 19 Détecteurs de flamme (GF).
- 20 Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de mousse.

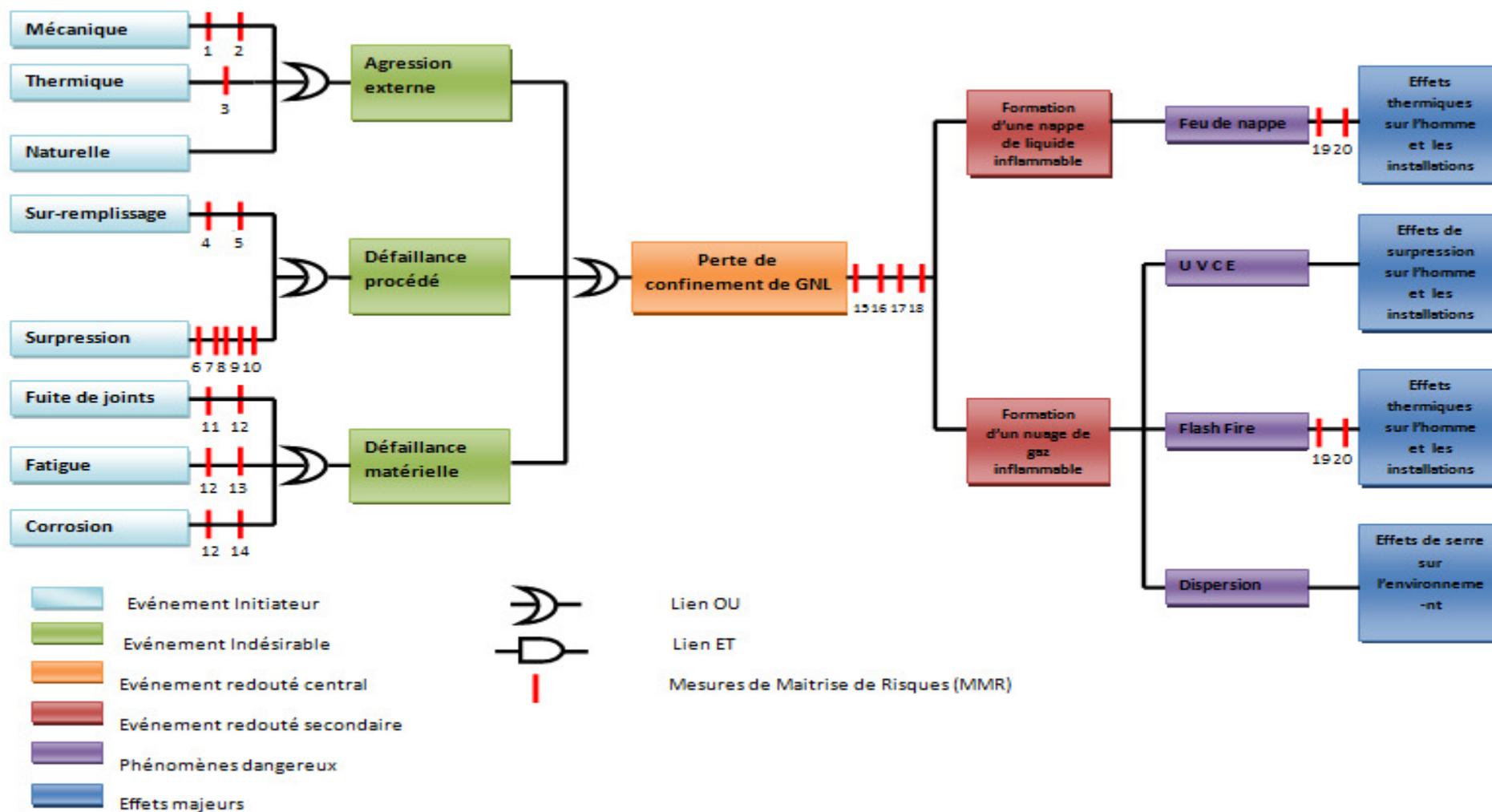


Figure IV.10 : Nœud-Papillon de perte de confinement au niveau du bac TK-103

#### **IV-6-Conclusion :**

L'application des méthodes d'analyse sur le bac de stockage de GNL, montre l'apparition de 4 phénomènes dangereux : la dispersion, feu de nappe, Flash-fire et l'UVCE.

Dans le chapitre V, nous procéderons à la simulation des effets de ces phénomènes.

# **Chapitre V**

## **Simulation des phénomènes dangereux**

## V-1-Introduction :

Les industriels et notamment le secteur pétrolier, présentent des risques de différentes natures dont les effets et les impacts peuvent être très graves sur les travailleurs, la population riveraine, les biens et l'environnement. Parmi ces risques, on peut citer les risques liés au stockage de GNL.

Dans cette partie on va simuler des effets des différents phénomènes dangereux qui peuvent apparaître suite à une perte de confinement au niveau du bac de stockage de GNL.

## V-2-Données météorologiques :

### V-2-1-Température :

Les températures moyennes enregistrées sont de l'ordre de 11°C en hiver et 24°C en été ; ce qui donne un hiver froid et un été chaud caractéristique du climat méditerranéen.

### V-2-2-Vent:

A l'échelle annuelle, les vents dominants sont de secteur Sud. La deuxième direction dominante est la direction Nord. Les vents sont généralement faibles à moyens (Figure V.1).

#### ➤ Rose de vent

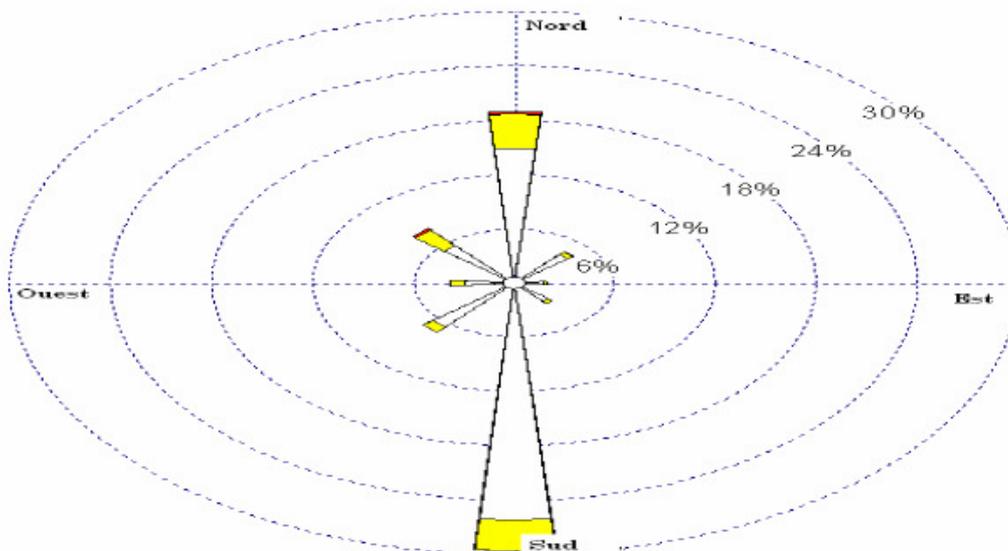
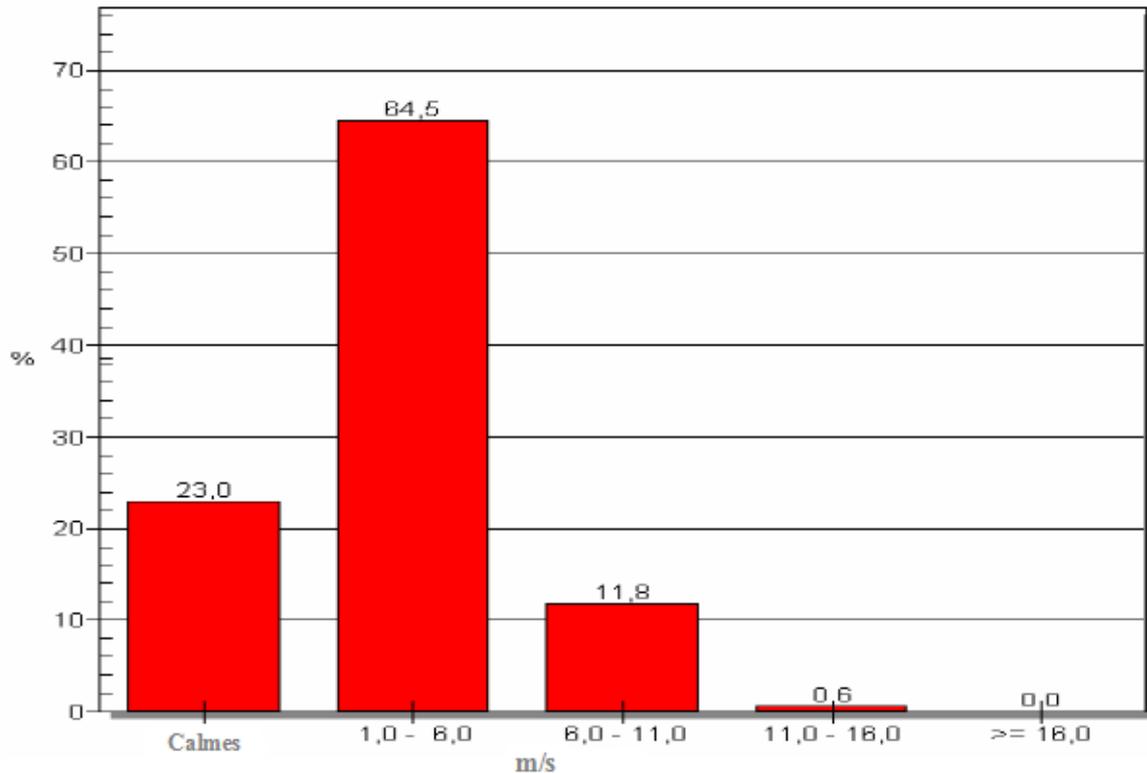


Figure V.1 : Rose des vents annuelle de SKIKDA [1]



**Figure V.2 :** Distribution fréquentielle de quatre classes de vents [1]

### **V-2-3-Humidité :**

La zone côtière de SKIKDA se caractérise par une humidité relative de plus de 60% tout le long de l'année. L'humidité annuelle moyenne de la zone industrielle de SKIKDA est de 74,25 %, avec une moyenne de minimums de 70 % et une moyenne des maximums de 80 % [1].

### **V-3- Description de l'environnement externe du bac TK-103:**

Le bac TK-103 est implanté dans l'unité de stockage 80p, dans le Nord du complexe GL1/K, l'environnement externe du bac est en présence de plusieurs bâtiments et installations industrielles qui sont citées dans le tableau ci-après.

**Tableau V.1:** Les installations les plus proches du bac TK-103 [1]

Installations	Distance par rapport au bac TK-103	Effectif
Pomperies GNL	60 m	02
Bac de stockage GNL TK-102 et 71MF-01	80 m	-
Bac de stockage d'eau	80 m	-
Unité d'intervention	120 m	60
Appontement GNL	200 m	30
Locaux de maintenance	280 m	30
Unité de liquéfaction	300 m	60
Unité GPL	360 m	50
Locaux administratifs	400 m	120
Infirmierie	400 m	05
Salle de contrôle	01 Km	15

#### **V-4- Simulation des conséquences d'événements :**

##### **V-4-1- Présentation de logiciel PHAST :**

L'analyse des conséquences relatives au scénario retenu est effectuée à l'aide du logiciel PHAST (version 7.2.72.0).

Le logiciel PHAST est un outil informatique de modélisation intégré au logiciel SAFETI. Il a été rigoureusement validé et vérifié. La théorie et la performance du modèle unifié de dispersion (UDM) développé par DNV ont également été analysées de façon indépendante dans le cadre des projets financés par la Communauté Européenne. Le modèle a excellé sur les plans de la théorie et de la performance et représente le standard pour l'évaluation des conséquences des accidents [10].

##### **V-4-2-Critères retenus pour la détermination des zones de dangers :**

###### **➤ Effets thermiques**

Les valeurs seuils des effets thermiques de référence retenues sont :

**Tableau V.2:** Seuil des effets thermiques [22]

Valeur	Effet sur l'homme	Effet sur les structures
8 kW/m <sup>2</sup>	Seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.	Seuil des effets dominos correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures.
5 kW/m <sup>2</sup>	Seuil des effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine.	Seuil des destructions de vitres significatives.
3 kW/m <sup>2</sup>	Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine.	Seuil des dégâts légers sur les structures

### ➤ Effets de surpression

Les valeurs seuils des effets de surpression de référence retenues sont :

**Tableau V.3:** Seuil des effets de surpression [22]

Valeur	Effet sur l'homme	Effet sur les structures
200 mbar	Seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.	Seuil des effets dominos
140 mbar	Seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine.	Seuil des dégâts graves sur les structures
50 mbar	Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine.	Seuil des dégâts légers sur les structures

### V-4-3-Donnée de simulation:

Les données de simulation du scénario Fuite moyenne au niveau du bac TK-103 sont représentées dans le Tableau V.6.

**Tableau V.4:** Données de simulation des scénarios [2]

	Paramètres	Données		
Conditions de stockage	Type de produits	Gaz Naturel Liquéfié		
	Etat du produit	Liquide		
	Température	-162°C		
	Pression	1,013 Bar		
Scénario	Scénario	Fuite		
	Lieu de décharge	En dehors du bac		
	Phase de décharge	Liquid		
Bac	Diamètre interne	54,43 m		
	Hauteur	34,6 m		
	Volume de liquide	56 000 m <sup>3</sup>		
Calcul d'effets	Seuil de référence de surpression	50 mbar	140 mbar	200mbar
	Seuil de référence de radiation	3 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	8 kW/m <sup>2</sup>
	Température moyenne	18°C		
	Vent	5 m/s _D		
	Humidité	74 %		

## V-5-Résultats de la simulation :

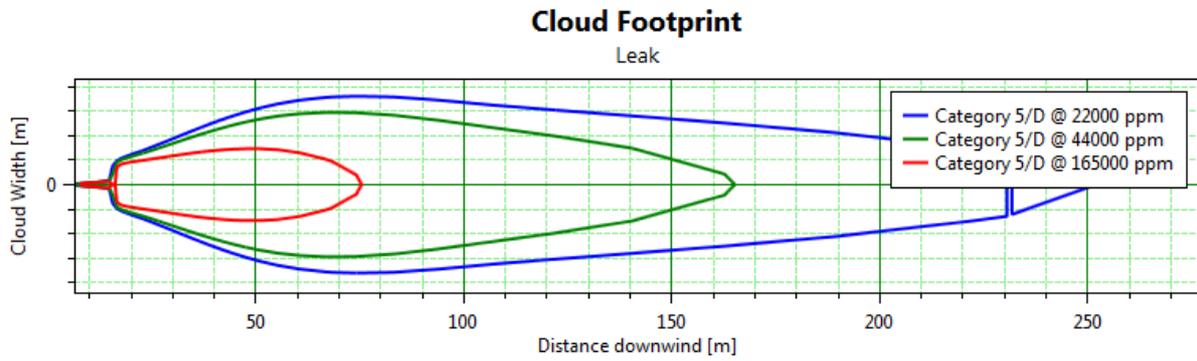
Le résultat de la simulation définit les différentes conséquences caractérisées par les distances de ses effets sur les personnes, les structures et l'environnement. Les plans des conséquences donnés par le PHAST comprennent en général deux types de courbes, la plume' qui représente la portée de l'événement en considérant la direction de vent la plus fréquente et l'effet qui représente la zone couverte en considérant les vents dans toutes les directions.

### V-5-1-La dispersion atmosphérique:

Si les vapeurs de GNL issues de l'évaporation d'une nappe ou directement dégagées par un rejet depuis Le bac ne sont pas immédiatement enflammées, le GNL continue de s'évaporer et crée un nuage très froid.

Vu la densité de vapeurs du GNL qui est supérieure à celle de l'air, Le nuage de vapeurs de GNL créé par une nappe de GNL a donc une densité initialement plus importante que celle de l'air. Peu à peu, les vapeurs vont d'une part se réchauffer et d'autre part se mélanger

avec l'air ambiant, en se refroidissant, l'effet de la gravitation va être plus important. Ce mélange va se précipiter près du sol.



**Figure V.3 :** Variation des concentrations du gaz dispersé en fonction de la distance.



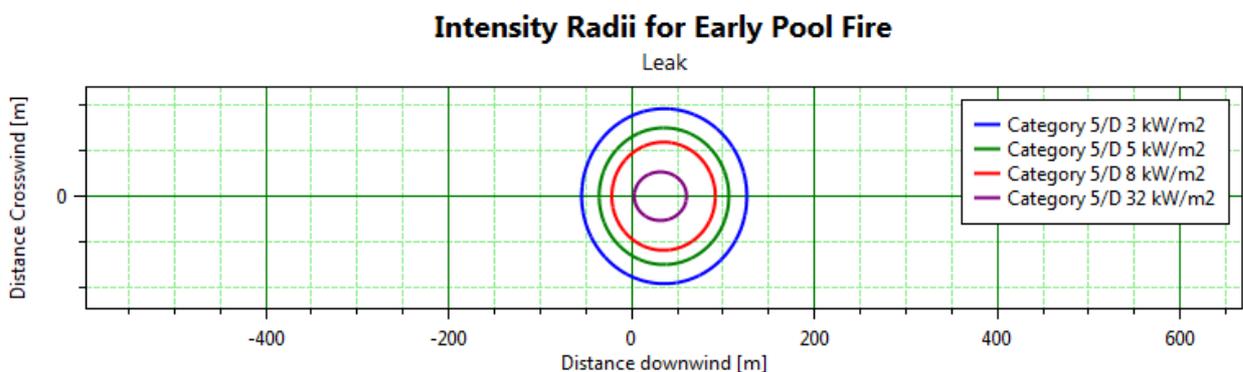
**Figure V.4 :** Image de variation des concentrations du gaz dispersé.

Il y a trois concentrations de gaz dispersés qui peuvent être dangereuse sur des distances déterminées comme le montre la figure V.3.:

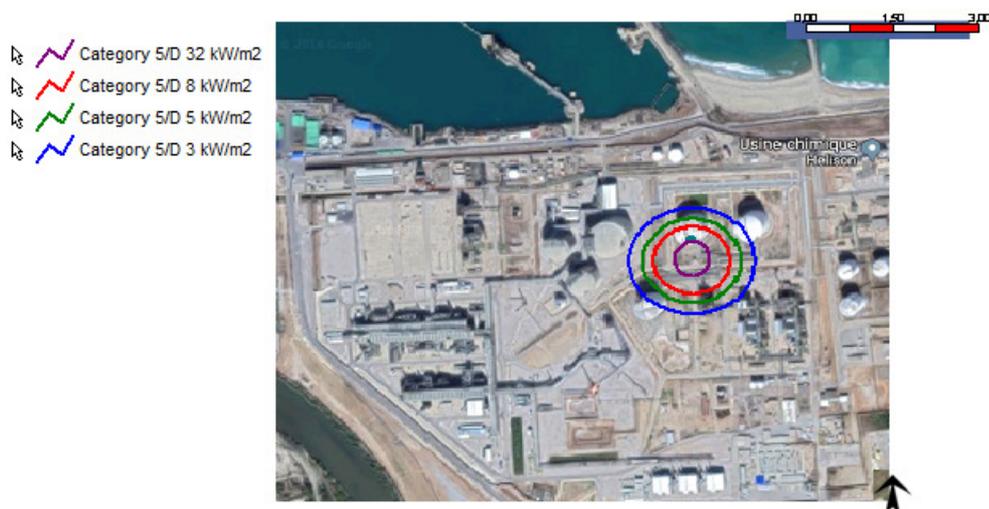
- Une Zone en rouge riche en méthane où on dépasse la limite supérieure d'inflammabilité qui s'étend sur une distance de 75m, dans ce cas, le risque d'inflammabilité est minime.
- Une Zone en vert qui va jusqu'à 165m de distance. Dans cette zone, les concentrations du gaz et l'oxygène se trouvent dans une proportionnalité qui peut donner naissance à un incendie si une étincelle se présente.
- Une Zone en bleu qui à 260m, pauvre en méthane d'où sa concentration en mélange avec l'oxygène, ne présente aucun risque d'inflammabilité.

### V-5-2-Effets thermiques du Feu de Nappe :

Lorsque du GNL se répand sur le sol, il forme une nappe. Si une source d'inflammation se trouve à proximité immédiate de la nappe, les vapeurs mélangées à l'air dans les limites d'inflammabilité s'enflammeront. Ce phénomène émet des radiations dangereuses qui détermineront la distance de ses effets dangereux.



**Figure V.5 :** Variation des radiations thermiques immédiates du feu de nappe en fonction de la distance.



**Figure V.6 :** Image de variation des radiations thermiques immédiates du feu de nappe.

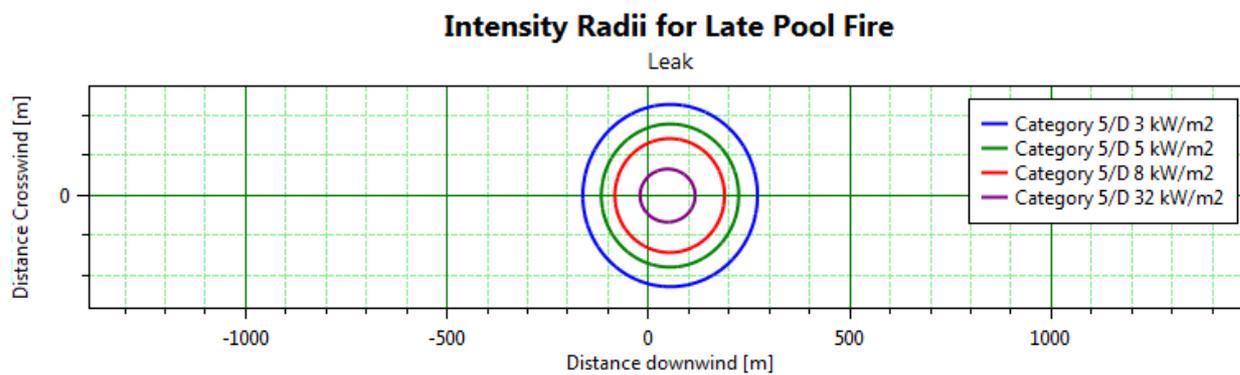
La figure V.6 montre les rayons relatifs aux valeurs du seuil des effets thermiques :

- Un rayon de 150 m pour la valeur de 3 kW/m<sup>2</sup>
- Un rayon de 110 m pour la valeur de 5 kW/m<sup>2</sup>
- Un rayon de 90 m pour la valeur de 8 kW/m<sup>2</sup>

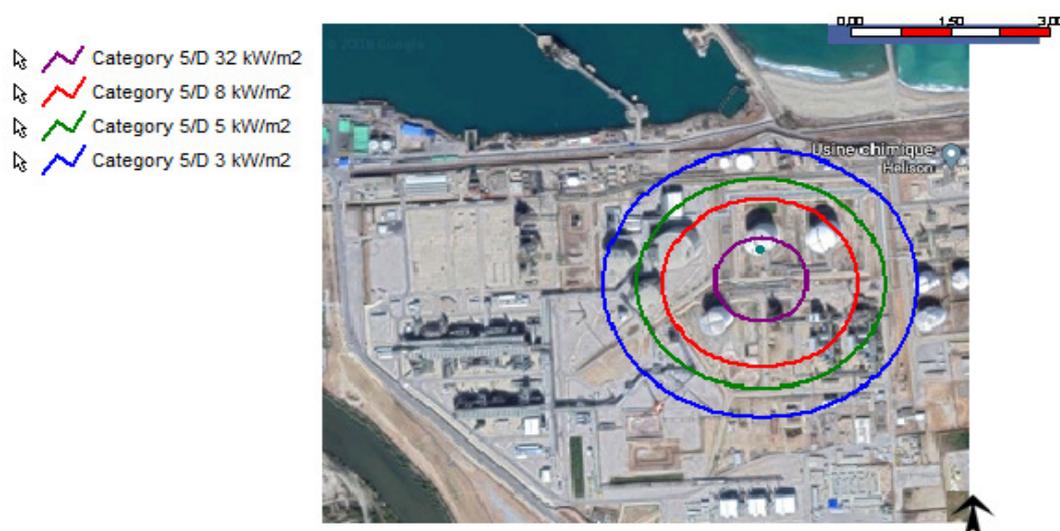
Les effets de ces radiations thermiques immédiates sur l'homme et sur les installations sont représentés dans le tableau V.5.

**Tableau V.5:** Installations et population exposées aux seuils des effets thermiques immédiats du feu de nappe.

Radiation	Distance	Population exposé (complexes)				Population totale
		Pomperie GNL	Bacs de stockage GNL	Bac de stockage d'eau	Unité d'intervention	
3 kW/m <sup>2</sup>	150 m	02	00	00	60	62
5 kW/m <sup>2</sup>	110 m	02	00	00	-	02
8 kW/m <sup>2</sup>	90 m	02	00	00	-	02



**Figure V.7 :** Variation des radiations thermiques retardées du feu de nappe en fonction de la distance.



**Figure V.8 :** Image de variation des radiations thermiques retardées du feu de nappe.

La figure V.8 montre les rayons relatifs aux valeurs du seuil des effets thermiques :

- Un rayon de 290 m pour la valeur de 3 KW/M<sup>2</sup>
- Un rayon de 240 m pour la valeur de 5 KW/M<sup>2</sup>
- Un rayon de 200 m pour la valeur de 8 KW/M<sup>2</sup>

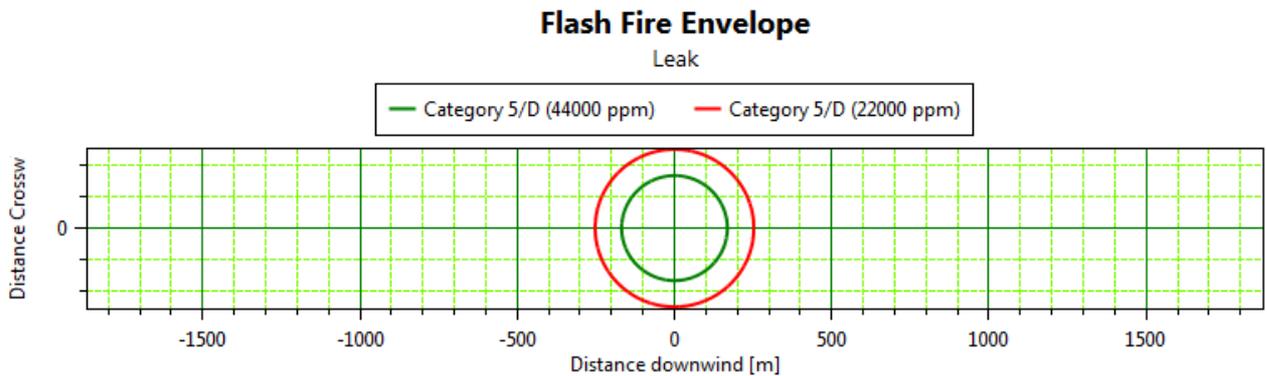
Les effets de ces radiations thermiques retardés sur l'homme et sur les installations sont représentés dans le tableau le tableau V.6.

**Tableau V.6:** Installations et population exposées aux seuils des effets thermiques retardés du feu de nappe.

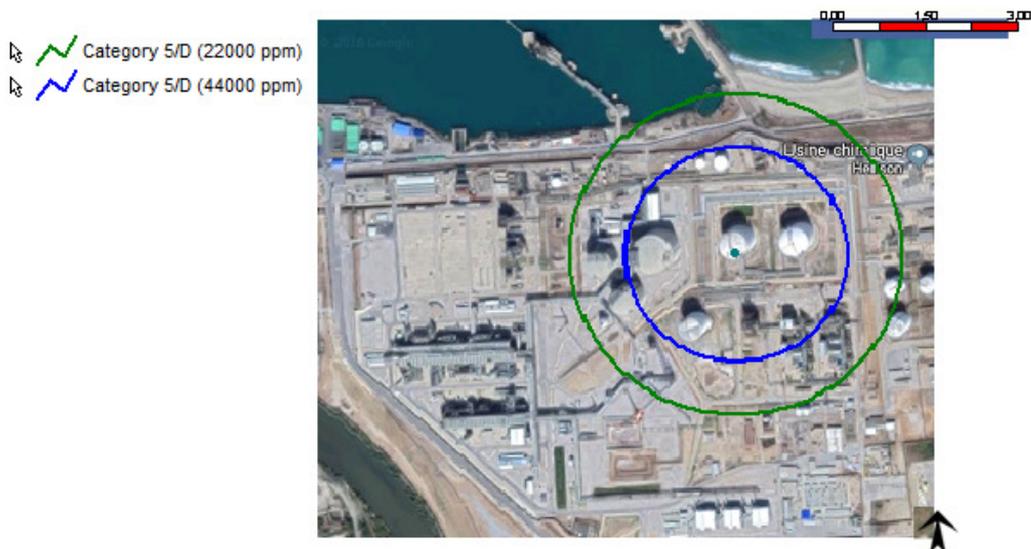
Radiation	Distance	Population exposé (complexes)						Population totale
		Pomperie GNL	Bacs de stockage GNL	Bac de stockage d'eau	Unité d'intervention	Appontement GNL	Locaux de maintenance	
3 kW/m <sup>2</sup>	290 m	02	00	00	60	30	30	122
5 kW/m <sup>2</sup>	240 m	02	00	00	60	30	30	122
8 kW/m <sup>2</sup>	200 m	02	00	00	60	30	-	92

### V-5-3-Flash-Fire :

Le flash fire est un phénomène très sensible à la dispersion et à l'inflammabilité des gaz qui est le feu de flash.



**Figure V.9 :** Courbe de variation des concentrations et la plage d'inflammabilité du gaz dispersé en fonction de la distance.



**Figure V.10 :** Image de variation des concentrations et la plage d’inflammabilité du gaz dispersé (Flash-Fire).

La boule de feu atteint des distances selon la limite d’inflammabilité, comme montré dans la figure V.10, ce phénomène est caractérisé par les limites :

- Limite supérieure d’Inflammabilité, LSI (en bleu) : peut atteindre une distance de 180m.
- Limite Inférieure d’Inflammabilité, LII (en vert) : peut atteindre une distance de 250m.

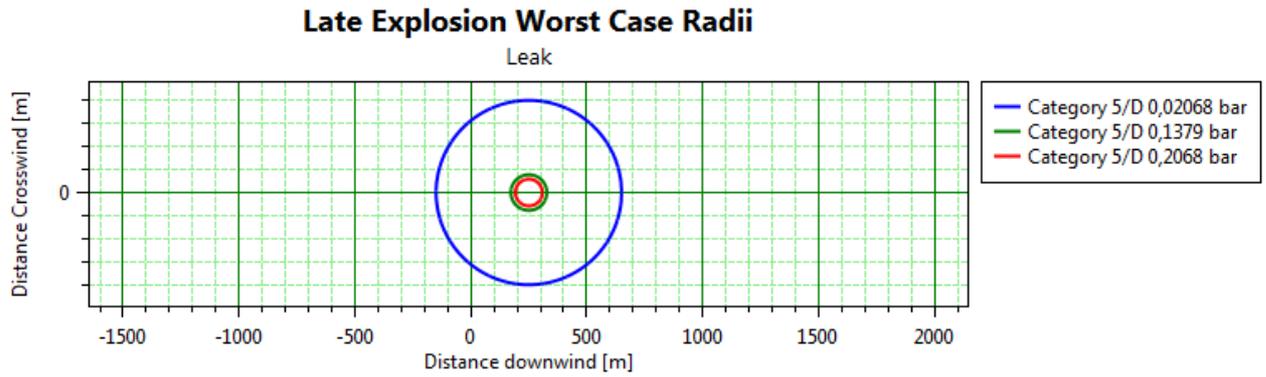
Le tableau V.9 représente les installations et la population exposée aux Flash-Fire selon les limites d’inflammabilités

**Tableau V.7 :** Installations et Population exposée aux Flash-Fire.

Limite	Distance	Population exposé (complexes)					Population totale
		Pomperie GNL	Bacs de stockage GNL	Bac de stockage d’eau	Unité d’intervention	Appontement GNL	
LSI	180 m	02	00	00	60	-	62
LII	250 m	02	00	00	60	30	122

#### V-5-4-Effets de surpression de l’UVCE :

Un autre phénomène résulte de l’inflammabilité de la vapeur de GNL est l’UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion). Ce dernier, vient de l’effet de souffle lié à la vitesse du front de la flamme et ceci peut atteindre des distances considérables, car, il est le résultat d’une ignition retardée d’un mélange stœchiométrique.



**Figure V.11 :** Variation des effets de surpression de l’UVCE en fonction de la distance.



**Figure V.12 :** Image de variation des effets de surpression de l’UVCE.

Les distances des effets de l’onde de pression sont montrées dans la figure V.12 :

- Un rayon de 400 m pour une pression de 50 mbar.
- Un rayon de 100 m pour une pression de 140 mbar.
- Un rayon de 130 m pour une pression de 200 mbar.

Le tableau V.8 représente les installations et la population exposée aux seuils des effets de surpression de l’UVCE.

**Tableau V.8:** Installations et population exposées aux seuils des effets de surpression.

Surpression	Distance	Population exposé (complexes)										Population totale
		Pomperie GNL	Bacs de stockage GNL	Bac de stockage d'eau	Unité d'intervention	Appontemet GNL	Locaux de maintenance	Unité de liquéfaction	Unité GPL	Locaux administratifs	Infirmierie	
50 mbar	400 m	02	00	00	60	30	30	60	50	120	05	357
140 mbar	100 m	02	00	00	-	-	-	-	-	-	-	02
200 mbar	130 m	02	00	00	60	-	-	-	-	-	-	62

### V-5-5-Interprétation des résultats :

Les résultats de la simulation par PHAST montrent qu'une fuite moyenne (100kg/s) au niveau des bacs de stockage remplie à 80 %, a des effets thermiques et de surpression qui se limite à seulement à territoire du complexe GL1/K.

Après avoir terminé cette étude, nous avons tirés les résultats suivants:

**Tableau V.9** : Résultats finals de la simulation.

	Feu de nappe			UVCE			Flash-fire	
	SELS	SEL	SEI	SELS	SEL	SEI	LSI	LII
Distances (m)	290	240	200	400	100	130	180	250
Population touchée	122	122	92	357	02	62	62	122

D'après ces résultats, la distance qui doit séparer entre les bacs de stockage et les autres installations et bâtiments est de 400 m au minimum.

### V-6- Conclusion :

La simulation des phénomènes dangereux donne une idée très détaillée sur le danger potentiel existant dans une installation industrielle. L'utilisation de logiciel PHAST facilite la simulation et donne des résultats réels sur les risques présentés par l'installation.

## **Chapitre VI**

**Procédures d'intervention pour le bac de**

**Stockage 81TK-103**

## **VI-1-Introduction :**

Dans le but de réduire la probabilité de la survenance de situation d'urgence il est nécessaire d'établir des procédures d'urgence pour faire face aux accidents, et d'autre part éviter que d'autres accidents arrivent.

## **VI-2- Procédure d'intervention pour Fuite de GNL :**

En cas de fuite de GNL le chef d'incendie va suivre les consignes de sécurité suivantes :

- 1-Evaluer la sévérité de la fuite (importance, débit, emplacement).
  - 2- Décider si le rassemblement est nécessaire.
  - 3-Prendre des mesures urgentes d'isolement.
  - 4- Secourir les personnes bloqués/blessés s'il est possible de le faire en toute sécurité.
  - 5- Aviser de l'arrêt de l'unité si nécessaire.
  - 6- Aviser de l'évolution de l'événement et les effets sur s les riverains.
  - 7- Arrêter toute source potentielle d'inflammation.
  - 8- Maintenir une distance de sécurité pour empêcher toute inflammation, ou en cas d'incendie ou explosion.
  - 7- Cordonner les activités des équipes d'intervention si elles ont été déployées.
- La démarche à suivre pour fuite de GNL est présentée dans la figure VI.1.

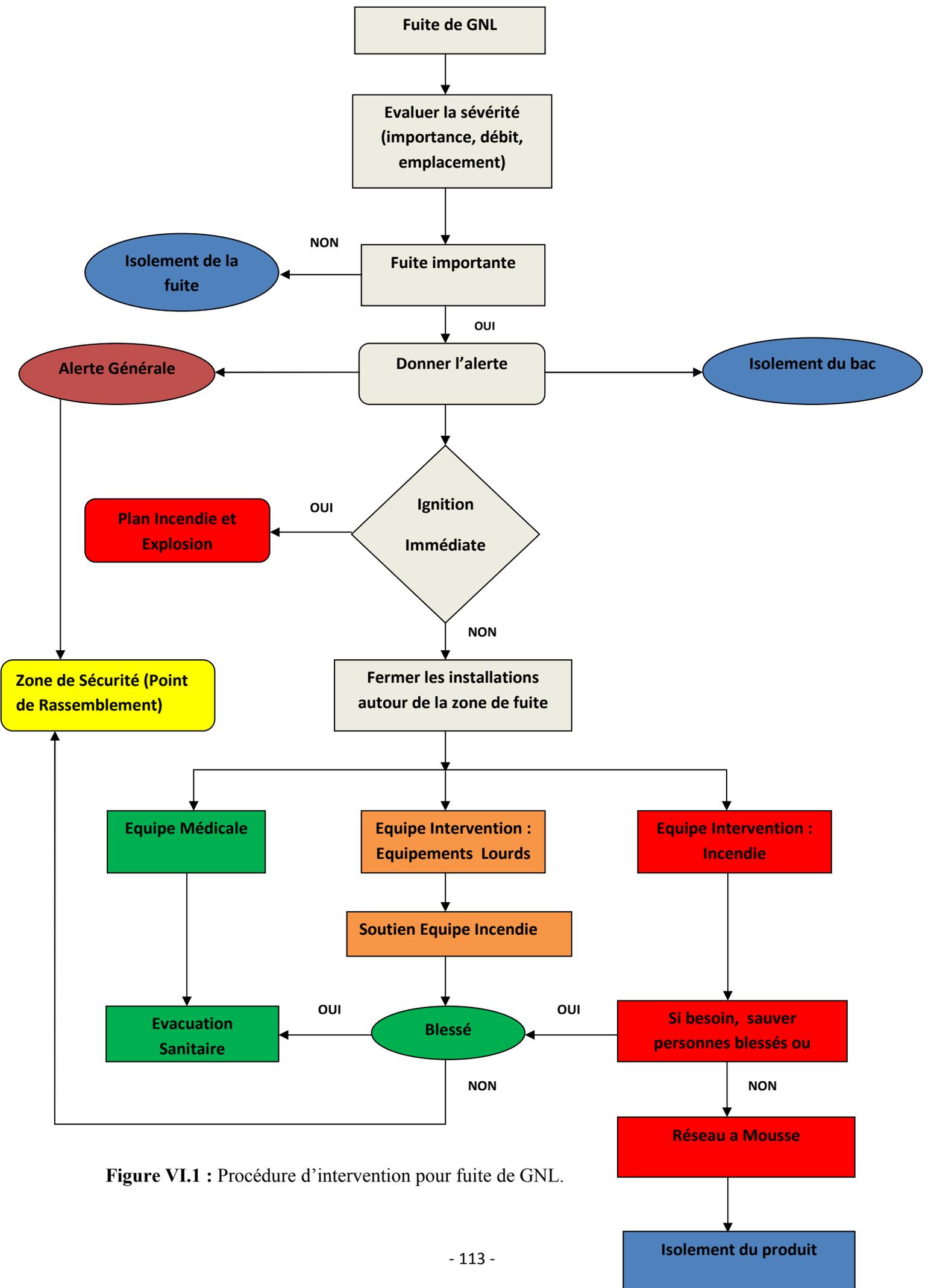
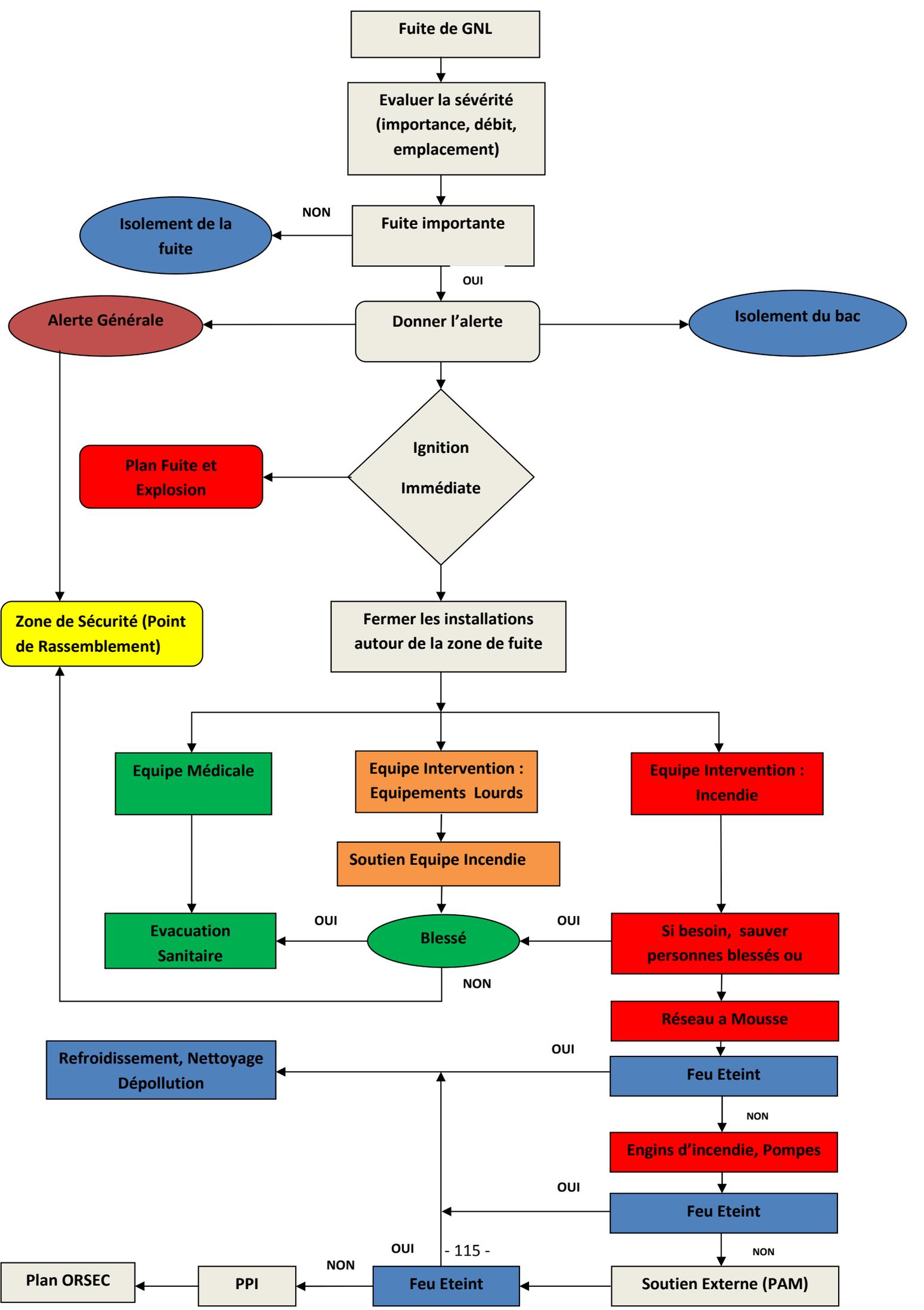


Figure VI.1 : Procédure d'intervention pour fuite de GNL.

### **VI-3- Procédure d'intervention pour feu de nappe :**

En cas de feu de nappe le chef incendie va suivre les consignes de sécurité suivantes :

- 1-Evaluer l'ampleur du feu.
  - 2- Rassemblement du personnel au point de rassemblement.
  - 3-Prendre des mesures urgentes d'isolement.
  - 4- Secourir les personnes bloqués/blessés s'il est possible de le faire en toute sécurité.
  - 5- Aviser de l'arrêt de l'unité si nécessaire.
  - 6- Mettre en ouvre le plan d'attaque préétabli pour contenir l'incendie, en gardant les unités d'intervention en dehors de la cuvette de rétention.
  - 7- Avoir la disposition des ressources en émulseur et en eau suffisantes et efficaces pour éteindre le feu.
  - 8- Aviser de l'évolution de l'événement et les effets sur les riverains.
  - 9- Arrêter toute source potentielle d'inflammation.
  - 10- Maintenir une distance de sécurité pour empêcher toute inflammation, ou en cas d'incendie ou explosion.
  - 11- S'assurer que les alentours du feu soient refroidis afin d'empêcher toute ré-inflammation.
  - 12- Procéder au refroidissement même après l'extinction complète du feu.
  - 13- Cordonner les activités des équipes d'intervention.
  - 14- demander le soutien externe dans le cas de non maîtrise de la situation.
- La démarche à suivre pour Feu de nappe est présentée dans la figure VI.2.

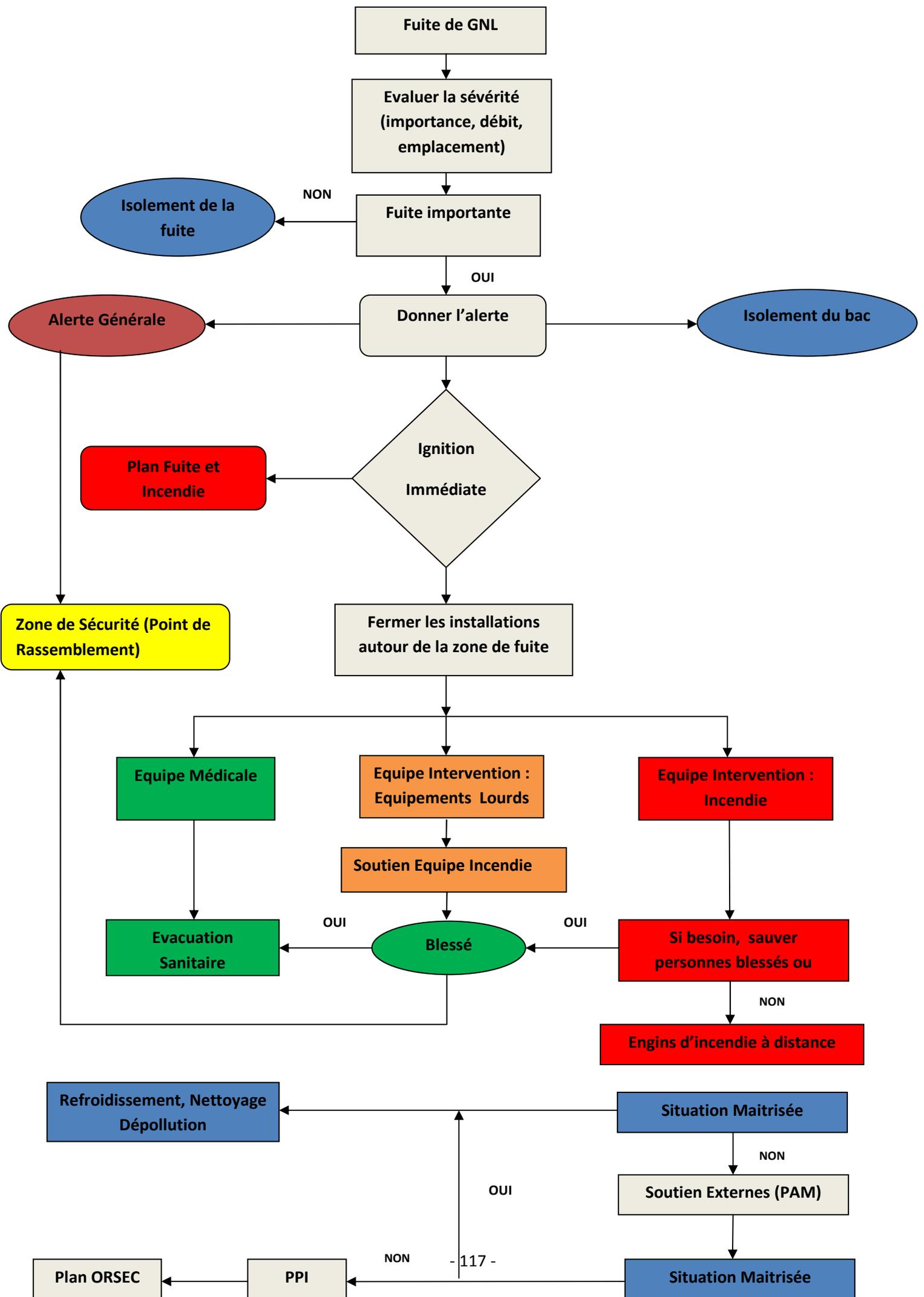


**Figure VI.2 :** Procédure d'intervention pour feu de nappe.

#### **VI-4- Procédure d'intervention pour une explosion :**

En cas d'explosion le chef incendie va suivre les consignes de sécurité suivantes :

- 1-Evaluer l'ampleur et la limite de l'explosion.
  - 2- Rassemblement du personnel au point de rassemblement.
  - 3-Prendre des mesures urgentes d'isolement.
  - 4- Secourir les personnes bloqués/blessés s'il est possible de le faire en toute sécurité.
  - 5- Aviser l'arrêt des unités voisines.
  - 6- Mettre en ouvre le plan d'attaque préétabli pour contenir les incendies causés par l'explosion, en gardant les unités d'intervention en dehors de danger.
  - 7- Avoir la disposition des ressources en émulseur et en eau suffisantes et efficaces pour éteindre les feux.
  - 8- Aviser de l'évolution de l'événement et les effets sur les riverains.
  - 9- Arrêter toute source potentielle d'inflammation.
  - 10- Maintenir une distance de sécurité pour empêcher toute inflammation.
  - 11- Procéder au refroidissement total du site.
  - 12- Cordonner les activités des équipes d'intervention.
  - 13- demander le soutien externe dans le cas de non maîtrise de la situation.
- La démarche à suivre pour une explosion est présentée dans la figure VI.3.



**Figure VI.3 :** Procédure d'intervention pour une explosion.

### **VI-5-Besoins en eau et en émulseur pour la réalisation d'un tapis de mousse préventif en cas de fuite de GNL :**

Soit une fuite de GNL qui s'étale sur la cuvette de rétention, sur une surface de 3000 m<sup>2</sup>, l'épaisseur du tapis a réalisé est de 20Cm.

Taux de concentration de l'émulseur (3L d'émulseur pour 100 L d'eau) est  $C = 3\%$ .

Un canon à mousse de débit de  $Q = 4 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Un Foisonnement (Volume de la mousse/ Volume de la solution moussante) est  $F = 7$ .

#### **VI-5-1-Calcul du volume de la mousse (l'émulseur+l'eau+l'air):**

Volume de la mousse = Surface (3000 m<sup>2</sup>) \* Hauteur de mousse (0,2m) = 600 m<sup>3</sup>.

#### **VI-5-2-Calcul du volume de la solution moussante (l'émulseur+l'eau) :**

Volume de la solution moussante = Volume de la mousse (600 m<sup>3</sup>) / Foisonnement (7) = 86 m<sup>3</sup>.

#### **VI-5-3-Calcul du taux de réalisation :**

Taux de réalisation = Volume de la solution moussante (86 m<sup>3</sup>) / Débit du canon (4 m<sup>3</sup>/min) = 22 minutes.

#### **VI-5-4-Calcul du volume de l'émulseur :**

Volume de l'émulseur = Volume de la solution moussante (86 m<sup>3</sup>) \* Taux de concentration de l'émulseur (3%) = 2,6 m<sup>3</sup>.

#### **VI-5-5-Calcul du volume de l'eau :**

Volume de l'eau = (Volume de l'émulseur (26 00 L) \* Taux de concentration de l'émulseur (3%)) / 100 = 86 600 L d'eau.

### **VI-6-Conclusion :**

La mise en place des procédures d'urgences dans les accidents industriels demande les moyens d'intervention nécessaires, personnel compétant et formé, et une bonne coordination des équipes.

## ***CONCLUSION GENERALE***

Le travail présenté dans ce mémoire donne un aperçu sur les grands axes relevant les différents risques liés au stockage de GNL au niveau du complexe GL1/K de SKIKDA.

Ce travail avait un double objectif. Au premier plan, il était question d'analyser les risques liés au stockage du GNL, puis de modéliser les effets des différents phénomènes dangereux qui peuvent apparaître.

Après ce travail on a abouti à des résultats suivant :

- L'analyse préliminaire des risques sur le bac de stockage nous a permis de traiter 14 scénarios dont 8 scénarios critiques, la mise en place des moyens de prévention et de protection nous a réduit les scénarios critiques de 8 à 2 scénarios critiques à améliorer.
- l'événement redouté centrale est La perte de confinement dans le bac.
- La probabilité de la perte de confinement est de  $4.1 \cdot 10^{-3}$ , la défaillance du régulateur de pression et régulateur de température contribuent à eux seuls avec 87,14 % à la survenance de l'E.R.
- On a pu faire ressortir 4 scénarios d'accident a savoir :
  - Dispersion avec une probabilité de  $2,28 \cdot 10^{-4}$
  - Flash Fire avec une probabilité de  $1,21 \cdot 10^{-4}$
  - UVCE avec une probabilité de  $3,04 \cdot 10^{-5}$
  - Feu de Nappe avec une probabilité de  $2,64 \cdot 10^{-5}$

A la fin, nous avons proposé des procédures d'intervention pour faire face à ces scénarios d'accidents et la meilleure procédure, est d'agir très rapidement sur la fuite avec un tapis de mousse pour éviter la survenance de ces scénarios dont on a calculé les besoins en eau et en mousse pour une fuite moyenne du GNL.

Nous avons l'intention des développer ces procédures à l'avenir pour assurer la sécurité dans les installations industriels.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] BRAZIER, Etude de Danger, SONATRACH AVAL Complexe GL1/K, Bureau VERITAS, 2006.
- [2] Manuel Opérateur SOFREGAZ - Stockage et chargement GNL-GL1/K 2000.
- [3] Manuel Opérateur SOFREGAZ –Procédé de liquéfaction-GL1/K 2000.
- [4] PIERRE PETIT, Liquéfaction du gaz naturel : Techniques de l'ingénieur [article J-3601, 2005.
- [5] BENHABYLES Kaili, Etude d'amélioration de la boucle cryogénique par refroidissement du gaz d'alimentation : Mémoire de projet de fin d'étude, Génie de procédé, USTHB 2008.
- [6] Document SNC-LAVALIN, Initiation au Gaz naturel Liquéfié, été 2016.
- [7] M. FLESCHE ; Gaz naturel liquéfié, Procédés et Technologie, révision 1992.
- [8] VALERIE de DIANOUS, Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour le stockage de Gaz Naturel Liquéfié- Installations fixes, INERIS, 2011.
- [9] SAEID, M., JOHN, M. , JALEEL, V. and David, A. W., Handbook of Liquefied Natural Gas, Gulf Professional Publishing, 2014.
- [10] L.BRAZIER, Etude de Danger, SONATRACH AVAL Complexe GL1/K, Bureau VERITAS, 2011.
- [11] Base de données ARIA.Accident-GNL, en ligne disponible sur :<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>.
- [12] Cours IAP-SKIKDA/ Réservoirs de stockage/AVRIL 2015.
- [13] LAURENT DUCOUP - SAIPEM S.A TECHNIGAZ-Juillet 2005.
- [14] IGL Technologie, SADT, un langage pour communiquer, 3<sup>ème</sup> édition , Eyrolles, 1993
- [15] Cours SADT-Méthode fonctionnelles-Bernard ESPINASSE- Université d'Aix Marseille.
- [16] INERIS - DRA - 2006-P46055-CL47569 : Q7: Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle.

- [17] Cours formation PGS-PC, Dr. Rachid N'AIT SAID, La méthode de l'Arbre de Défaillance. Octobre 2009.
- [18] Technique de l'ingénieur-Méthodes d'analyse des risques 3<sup>ème</sup> édition.
- [19] AUTOR, O. and S.I.M. OTOR, Offshore Reliability Data Handbook, SINTEF Industrial Management, 4<sup>th</sup> Edition, 2002.
- [20] De HAAG, U. and dr. B.J.M. Ale, Guideline for quantitative risk assessment 'Purple book' CPR18E, Third edition, Gevaarlijke Stoffen, 2005.
- [21] TOTAL, Manuelle d'utilisation : Logiciel GRIF - MODUL SIL, 31 janvier 2011.
- [22] Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement (BAPE), Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées, 2004.
- [23] Standard plan d'organisation POI- AVAL-SONATRACH, 2006.

## **Annexes**

Annexe 1 : Tableau APR.

Annexe 2 : Liste des EIPS.

Annexe 3 : Tableau de probabilités.

Annexe 4 : Plan de masse du complexe GL1/K.

# ANNEXE 1

N°	Evénement Redouté	Détails	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesures de Prévention	P'	Mesures de Protection	G'	C'
<b>Bac de Stockage 81-TK-103</b>												
1	Perte d'étanchéité externe	1-Agression externe	Choc mécanique, thermique, naturelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de confinement</li> <li>-Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash</li> <li>Fire ; Feu torche</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>	1	5	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plan de levage</li> <li>- Plan de circulation</li> <li>- Consignes de sécurités</li> </ul>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs de flamme (GF), de gaz (GG) et de température froide(GT)</li> <li>- Camera de surveillance</li> <li>- Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de mousse</li> <li>- Transfert du contenu vers un autre bac (81-TK104, 71-MF01), isolement du bac</li> </ul>	5	5

		2-Fatigue	Contractions, dilatations thermiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de confinement</li> <li>-Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>	2	3	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintien en froid en permanence des bacs de stockage (recirculation, brassage)</li> <li>- Inspection périodique</li> </ul>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs de flamme (GF), de gaz (GG) et de température froide (GT)</li> <li>- Camera de surveillance</li> <li>- Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de mousse</li> <li>-Transfert du contenu vers un autre bac (81-TK104, 71-MF01), isolement du bac</li> </ul>	2	2
		3-Corrosion externe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taux de l'humidité élevé (Le complexe se trouve au bord de la mer)</li> <li>- Arrosage du réservoir par l'eau de mer</li> </ul>	Corrosion de la paroi externe	3	2	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix de Matériaux</li> <li>- Limiter l'utilisation de l'eau de mère</li> <li>- Inspection périodique</li> <li>- Peinture anticorrosive</li> </ul>	2		2	4

2	Fuite de joint (pieds bacs)	Défaillance de joint	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vieillesse</li> <li>- Mauvais serrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de confinement</li> <li>- Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>	4	5	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance</li> <li>- Inspection périodique</li> </ul>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs de flamme (GF), de gaz (GG) et de température froide (GT)</li> <li>- Camera de surveillance</li> <li>- Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de mousse</li> <li>- Isolement de la ligne</li> </ul>	4	12
3	Débordement du bac	Sur-remplissage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erreur humaine</li> <li>- Défaillance de régulateur de niveau (LI81-10/18/20)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déversement dans l'inter-paroi Rupture de la paroi externe suivi de la rupture de la paroi interne</li> <li>- Perte de confinement</li> <li>- Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash</li> </ul>	2	5	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déclenchement sur niveau très très haut LAHH81-10/14/20 qui entraîne la fermeture automatique :</li> <li>- de la vanne d'admission (UV-8123) depuis les unités de liquéfaction</li> </ul>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs de flamme(GF), de gaz(GG) et de température froide(GT)</li> <li>- Camera de surveillance</li> <li>- Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de</li> </ul>	4	4

				<p>Fire ; Feu torche</p> <p>Feu de nappe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>- de la vanne de transfert (UV-8125) depuis les bacs 81-TK104 et 71-MF01</li> <li>- Ouverture des vannes de transfert PSV8115 /8117, qui dirige le GNL vers la cuvette de rétention</li> </ul>	<p>mousse</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Transfert du contenu vers un autre bac avec l'ouverture des vannes UV8115/8118/8119, isolement du bac</li> </ul>			
4	Perte d'étanchéité interne	1-Rupture totale	Choc mécanique, thermique, naturelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de confinement</li> <li>-Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash</li> <li>Fire ; Feu torche</li> <li>- BLEVE</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à</li> </ul>	1	5	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fermeture automatique de la vanne d'admission (UV-8123) depuis les unités de liquéfaction</li> <li>- Fermeture de la vanne de transfert (UV-8125) depuis les bacs 81-TK104 et 71-MF01</li> <li>- Ouverture des vannes de transfert PSV8115 /8117, qui dirige le GNL vers la</li> </ul>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs de flamme(GF), de gaz(GG) et de température froide(GT)</li> <li>- Camera de surveillance</li> <li>- Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de mousse</li> <li>-Transfert du contenu vers un autre bac avec</li> </ul>	5	5

				la température cryogénique du GNL			cuvette de rétention		l'ouverture des vannes UV8115/8118/8119 isolement du bac			
		2-Fissure	Mauvaise composition des parois du réservoir	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déversement dans l'inter-paroi Rupture de la paroi externe suivi de la rupture de la paroi interne</li> <li>- Perte de confinement</li> <li>- Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche ;</li> <li>- BLEVE</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>	2	5	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fermeture automatique de la vanne d'admission (UV-8123) depuis les unités de liquéfaction</li> <li>- Fermeture de la vanne de transfert (UV-8125) depuis les bacs 81-TK104 et 71-MF01</li> <li>- Ouverture des vannes de transfert PSV8115 /8117, qui dirige le GNL vers la cuvette de rétention</li> </ul>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs de flamme(GF), de gaz(GG) et de température froide(GT)</li> <li>- Camera de surveillance</li> <li>- Cuvette de rétention équipée d'injecteurs de mousse</li> <li>-Transfert du contenu vers un autre bac avec l'ouverture des vannes UV8115/8118/8119, isolement du bac</li> </ul>	4	4

5	Supression	1- Evaporation Du GNL dans le bac	- Défaillance du régulateur de pression PIC8116	- Perte de confinement  - Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche  - Feu de nappe  - Brûlures par le froid  - Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL	4	5	20	- Alarme PAH8110  - vanne de sécurité de pression PCV8116  - Action opérateur PIC8104 régule la vanne PV8104 vers torche FL101  - Soupapes à l'atmosphère PSV8113- A/B/C/D tarée à 120 mbar relatif  - Event PV8116  - Event manuel dôme de secours	3	- Sonde de température haute au niveau des événements  - Dispositif d'extinction par l'azote à la sortie des événements et des soupapes  -Transfert du contenu vers un autre bac avec l'ouverture des vannes UV8115/8118/8119, isolement du bac	4	12
		2- Augmentation de température	faible isolation du bac (transfert thermique)	- Evaporation  - Perte de confinement  - Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche  - Feu de nappe	2	5	10	- Brassage du GNL par les pompes de maintien en froid des lignes de chargement  - Alarme PAH8110  - vanne de sécurité de pression PCV8116  - Action opérateur PIC8104 régule la vanne	1	- Sonde de température haute au niveau des événements  - Dispositif d'extinction par l'azote à la sortie des événements et des soupapes  -Transfert du contenu vers un autre bac avec	4	4

				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>PV8104 vers torche FL101</li> <li>- Soupapes à l'atmosphère PSV8113- A/B/C/D tarée à 120 mbar relatif</li> <li>- Event PV8116</li> <li>- Event manuel dôme de secours</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>l'ouverture des vannes UV8115/8118/8119, isolement du bac</li> </ul>		
	3-Défaillance au niveau du procédé	Arrivée du GNL à une température supérieure a -162°C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaporation</li> <li>- Perte de confinement</li> <li>- Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>	4	5	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brassage du GNL par les pompes de maintien en froid des lignes de chargement</li> <li>- Alarme PAH8110</li> <li>- vanne de sécurité de pression PCV8116</li> <li>- Action opérateur PIC8104 régule la vanne PV8104 vers torche FL101</li> <li>- Soupapes à l'atmosphère PSV8113- A/B/C/D tarée à 120 mbar relatif</li> <li>- Event PV8116</li> </ul>	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sonde de température haute au niveau des événements</li> <li>- Dispositif d'extinction par l'azote à la sortie des événements et des soupapes</li> </ul>	4	16	

							Event manuel dôme de secours				
	4-Différence de composition du GNL	Arrivée du GNL a partir du bac TK-104 et 71-MF01	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Roll-over</li> <li>- Evaporation soudaine</li> <li>- Perte de confinement</li> <li>- Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>	3	5	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alarme PAH8110</li> <li>- vanne de sécurité de pression PCV8116</li> <li>- Action opérateur PIC8104 régule la vanne PV8104 vers torche FL101</li> <li>- Soupapes à l'atmosphère PSV8113- A/B/C/D tarée à 120 mbar relatif</li> <li>- Event PV8116</li> <li>- Event manuel dôme de secours</li> </ul>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédure de transfert pour homogénéiser le produit</li> <li>- Sonde de température haute au niveau des événements</li> <li>- Dispositif d'extinction par l'azote à la sortie des événements et des soupapes</li> </ul>	4	8
	5-Long durée de stockage du GNL		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Roll-over</li> <li>- Evaporation</li> <li>- Perte de confinement</li> </ul>	3	5	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alarme PAH8110</li> <li>- vanne de sécurité de pression PCV8116</li> <li>- Action opérateur</li> </ul>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédure de transfert pour recirculer le produit</li> <li>- Sonde de température</li> </ul>	4	8

				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispersion d'un nuage inflammable : Explosion / Flash Fire ; Feu torche</li> <li>- Feu de nappe</li> <li>- Brûlures par le froid</li> <li>- Dommages sur les structures environnantes, dus à la température cryogénique du GNL</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>PIC8104 régule la vanne PV8104 vers torche FL101</li> <li>- Soupapes à l'atmosphère PSV8113- A/B/C/D tarée à 120 mbar relatif</li> <li>- Event PV8116</li> <li>- Event manuel dôme de secours</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>haute au niveau des événements</li> <li>- Dispositif d'extinction par l'azote à la sortie des événements et des soupapes</li> </ul>		
6	Diminution de pression	1-Aspiration par compresseur au cours de l'opération de déchargement	Soutirage trop rapide lors chargement de Navire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Création de vide</li> <li>-Collapse du réservoir de stockage</li> <li>-Perte de la paroi interne</li> </ul>	3	3	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alarme PAL8114</li> <li>- Soupapes casse-vide VSV8102-A/B/C/D tarée à -2 mbar relatif</li> </ul>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Injecter du GNT en pluie dans le bac</li> </ul>	2	4

		2-Niveau bas du GNL dans le bac	- Arrêt de production - Défaillance de la ligne de coulée	- Création de vide Collapse du réservoir de stockage - Perte de la paroi interne	2	3	6	- Alarme PAL8114 - Soupapes casse-vide VSV8102-A/B/C/D tarée à -2 mbar relatif	1	- Injecter du GNT en pluie dans le bac	2	2
--	--	---------------------------------------	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---

## ANNEXE 2

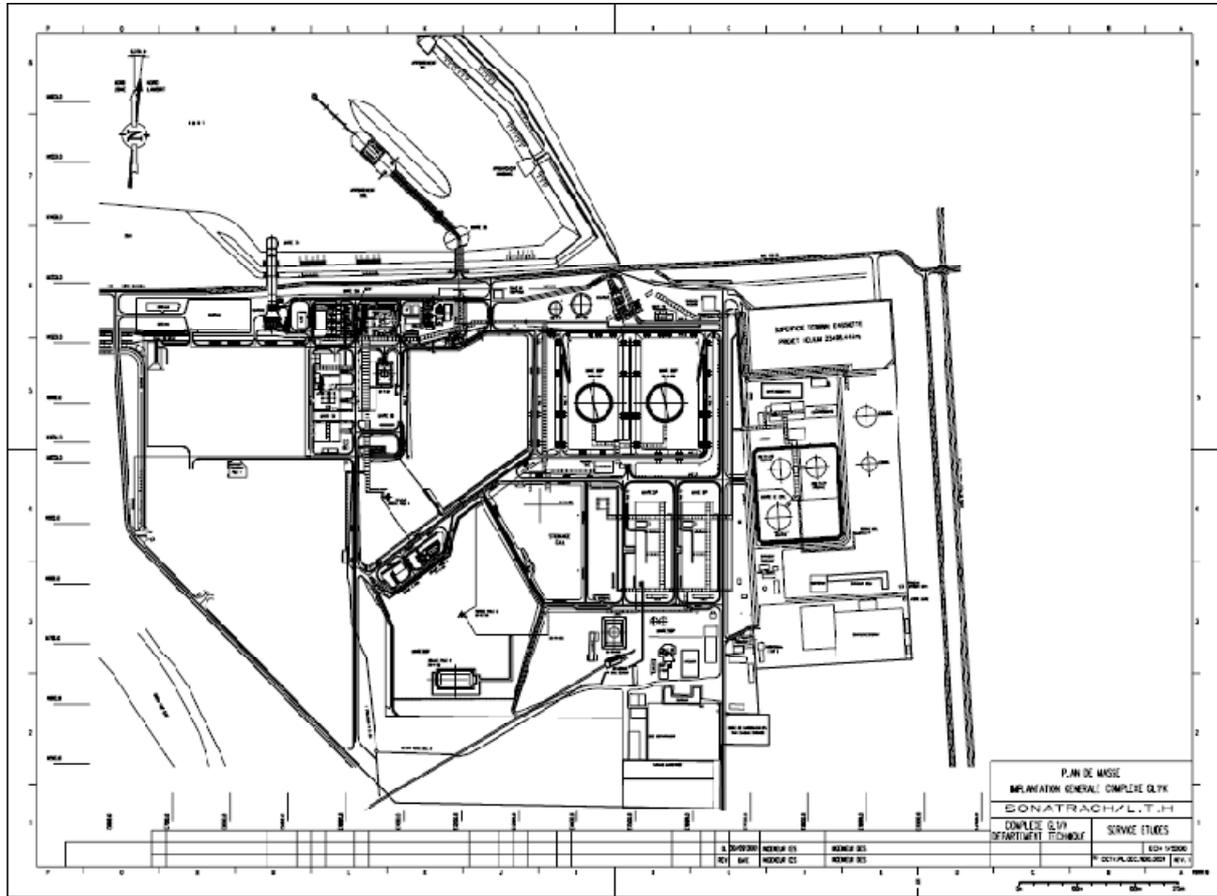
EIPS	Description
DéTECTEURS de Gaz (GG)	DéTECTEURS de gaz du bac de GNL 81TK-103
DéTECTEURS de Température (GT)	DéTECTEURS de température du bac de GNL 81TK-103
DéTECTEURS de Flame (GF)	DéTECTEURS de flame du bac de GNL 81TK-103
LAH-8110	Alarme niveau haut du bac de GNL 81TK-103
LAH-8114	Alarme niveau haut du bac de GNL 81TK-103
LAH-8120	Alarme niveau haut du bac de GNL 81TK-103
LI-8110	Régulateur de niveau du bac de GNL 81TK-103
LI-8118	Régulateur de niveau du bac de GNL 81TK-103
LI-8120	Régulateur de niveau du bac de GNL 81TK-103
PIC-8116	Régulateur de pression du bac de GNL 81TK-103
PAH-8110	Alarme pression haute du bac de GNL 81TK-103
PSV-8113- A	Soupape de sécurité du bac de GNL 81TK-103 (120 mbar).
PSV-8113- B	Soupape de sécurité du bac de GNL 81TK-103 (120 mbar).
PSV-8113- C	Soupape de sécurité du bac de GNL 81TK-103 (120 mbar).
PSV-8113- D	Soupape de sécurité du bac de GNL 81TK-103 (120 mbar).
PV-8116	Event
Event manuel dôme de secours	
PAL-8114	Alarme pression basse du bac de GNL 81TK-103 81T (-2 mbar)
VSV-8102-A	Soupape casse –vide tarée à -2 mbar du bac de GNL 81TK-103
VSV-8102-B	Soupape casse –vide tarée à -2 mbar du bac de GNL 81TK-103

VSV-8102-C	Soupape casse –vide tarée à -2 mbar du bac de GNL 81TK-103
VSV-8102-D	Soupape casse –vide tarée à -2 mbar du bac de GNL 81TK-103
PCV8116	vanne de sécurité de pression du bac de GNL 81TK-103
FL-101	La torche
PV-8104	Vanne de dégazage vers torche
UV-8123	vanne d'admission depuis les unités de liquéfaction vers le bac 81TK-103
UV-8125	vanne de transfert depuis les bacs 81-TK104 et 71-MF01 vers le bac 81TK-103
PSV-8115	vannes de transfert, qui dirige le GNL à partir du bac 81TK-103 vers la cuvette de rétention
PSV-8117	vannes de transfert, qui dirige le GNL à partir du bac 81TK-103 vers la cuvette de rétention

## ANNEXE 3

Type de cause	Cause	Fréquence d'occurrence (/an)	NP retenu	Source
Défaillance de régulation	Régulation de pression	$6.0 \cdot 10^{-2}$	5	<i>TNO Purple book</i>
	Régulation de température	$6.3 \cdot 10^{-2}$	5	
	Régulation de débit	$8.9 \cdot 10^{-2}$	5	
	Régulation de niveau	$6.1 \cdot 10^{-2}$	5	
	Séquence automatique	$2 \cdot 10^{-2}$	5	
Défaillance d'équipement	Vanne manuelle fermée	$3 \cdot 10^{-2}$	5	
	Vanne de sécurité (MOV) fermée	$5 \cdot 10^{-2}$	5	
	Défaillance de pompe centrifuge électrique	$2.1 \cdot 10^{-1}$	5	<i>TNO Purple book</i>
	Défaillance de pompe centrifuge entraînée par une turbine	$7.8 \cdot 10^{-1}$	5	<i>Guidelines for Process Equipment Reliability Data (Ccps of AIChE)</i>
	Compresseur centrifuge entraînée par une turbine	$1.3 \cdot 10^{-1}$	5	
	Défaillance d'aérocondenseur électrique	$8.0 \cdot 10^{-2}$	5	
	Rupture de tube	$2.5 \cdot 10^{-3}$	4	
	Fuite sur bride	$10^{-4}$	3	
Défaillance de flexible ou bras de chargement	$3 \cdot 10^{-4}$ / op			
Erreur humaine	Opération de routine (opération quasi réflexe à la suite d'une formation et d'une pratique intensive) 1fois /jour	$10^{-3}$ / op	5	
	Opération avec procédure (exécution des tâches en suivant des procédures écrites et connues) 1fois/mois	$10^{-2}$ / op	5	
	Opération avec procédure (exécution des tâches en suivant des procédures écrites et connues) 1fois/an	$5 \cdot 10^{-3}$	4	
	Opération exceptionnelle (diagnostic d'une procédure complexe et élaboration d'une stratégie) 1fois/mois	$10^{-1}$ /op	5	
	Opération exceptionnelle (diagnostic d'une procédure complexe et élaboration d'une stratégie) 1fois/an	$5 \cdot 10^{-2}$	5	
Agressions externes	Corrosion		2 à 3	
	Agression externe	$5 \cdot 10^{-6}$	1	<i>TNO Purple book</i>
	Incendie en zone de stockage	$10^{-4}$	3	
	Incendie en zone de procédé	$10^{-3}$	4	

# ANNEXE 4



...:\sursite\g\14 plan rev.dgn 01/12/2008 09:55:38