

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Filière QHSE-GRI

Mémoire de Master

***Modélisation des effets des phénomènes
dangereux suite à une perte de confinement aux
niveaux des bacs de stockage du GNL***

-Cas de complexe GL1/Z-

Bilel Seif Eddine ZEDDAM

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2016

Composition du Jury :

Président	Mme. Chahrazed BOUTEKEDJIRET,	Professeur	ENP
Rapporteur1	M. Aboubakr KERTOUS,	MA-B	ENP
Rapporteur2	M. Mohamed BOUBAKEUR,	MA-A	ENP
Examineur1	M. Amin BENMOKHTAR,	MA-A	ENP
Examineur2	M. Mohamed Tarek ATTOUCHI,	MA-A	ENP

ENP 2016

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

Filière QHSE-GRI

Mémoire de Master

***Modélisation des effets des phénomènes
dangereux suite à une perte de confinement aux
niveaux des bacs de stockage du GNL***

-Cas de complexe GL1/Z-

Bilel Seif Eddine ZEDDAM

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2016

Composition du Jury :

Président	Mme. Chahrazed BOUTEKEDJIRET,	Professeur	ENP
Rapporteur1	M. Aboubakr KERTOUS,	MA-B	ENP
Rapporteur2	M. Mohamed BOUBAKEUR,	MA-A	ENP
Examineur1	M. Amin BENMOKHTAR,	MA-A	ENP
Examineur2	M. Mohamed Tarek ATTOUCHI,	MA-A	ENP

ENP 2016

DEDICACE

A mes parents à qui je dois tout,

A ma grande famille,

A toute personne ayant contribué à ma formation.

Bilel Seif Eddine ZEDDAM

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à Monsieur *A.KERTOUS*. Ses conseils ont été de grande valeur pour l'aboutissement de ce mémoire. Mes remerciements sont également adressés au Monsieur *M.BOUBAKEUR*

Je tiens à également remercier Madame *C.BOUTEKEDJIRET* de me faire l'honneur de présider mon jury, mes remerciement à Monsieur *A.BENMOKHTAR* et Monsieur *M.T.ATTOUCHI* d'avoir accepté d'évaluer mon travail et de participer à mon jury en tant que examinateurs.

Je tiens à remercier également toute l'équipe du complexe *GL1/Z* d'Arzew pour leur accueil, en particulier Monsieur Hakim *ZEDDAM* pour nous avoir accueillis au sein de son équipe et pour la confiance qu'il nous a accordée en suivant ce stage.

Je remercie tous mes amis, avec qui j'ai partagé mes moments de bonheur et aussi mes moments difficiles. Sans amitié solide et sans une bonne ambiance, je pense que le travail est voué à l'échec. C'est donc aussi grâce à vous mes amis que mes travaux de mémoire se sont bien déroulés.

Enfin, Je souhaiterais remercier tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

ملخص:

هذه الدراسة هدفها نمذجة تأثيرات الظواهر الخطرة الناجمة عن فقدان الاحتواء في خزانات الغاز الطبيعي المميع. المرحلة الاولى، تم تقديم عموميات حول الغاز الطبيعي المميع وخزاناته متبوعة بمعلومات حول المجمع GL1Z. المرحلة الثانية قمنا بنمذجة تأثيرات الظواهر الخطرة باستعمال برنامج PHAST لفقدان الاحتواء على مستوى الخزان I-901.

الكلمات الدالة:

الغاز الطبيعي المميع، PHAST، الظواهر الخطرة ، فقدان الإحتواء، خزان .

Abstract

This study has an objective to model the effects of dangerous phenomenon due to loss of containment in cryogenic storage tanks.

Firstly, we presented generalities of LNG and storage tanks, followed with a presentation of GL1Z complex.

Secondly, we modeled the effects of dangerous phenomenon by PHAST software, at a loss of containment in the storage tank I-901

Key words:

Liquefied Natural Gas, PHAST, dangerous phenomenon, loss of containment, storage tank.

Résumé

Cette étude a pour objective de modéliser les effets des phénomènes dangereux suite à une perte de confinement dans les bacs de stockages cryogéniques.

En premier temps, on a présenté des généralités sur le GNL et les bacs de stockages, suivies par une présentation du complexe GL1Z.

En deuxième temps, on a modélisé les effets des phénomènes dangereux par logiciel PHAST, lors d'une perte de confinement dans le bac de stockages I-901

Mots clés :

Gaz Naturel Liquéfié, PHAST, Phénomènes dangereux, perte de confinement, bac de stockage.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABREVIATIONS	
INTRODUCTION GENERALE.....	10
Chapitre I Présentation du complexe GL1/Z	11
I.1 Présentation de SONATRACH.....	12
I.2 Présentation du complexe GL1Z.....	12
I.2.1 Localisation et accès	12
I.2.2 Historique.....	13
I.2.3 Capacité de production.....	13
I.2.4 Organisation générale.....	13
I.3 Description de procès de liquéfaction de Gaz Naturel	14
I.3.1 Description générale.....	14
I.3.2 Trains de liquéfaction.....	15
I.3.3 Stockage et expédition	16
Chapitre II Généralités sur le Gaz Naturel Liquéfié et les bacs de stockages.....	19
II.1 Bref historique du GNL :	20
II.2 Caractéristique du GNL :	21
II.2.1 Intérêt du GNL.....	21
II.2.2 Propriété physique du GNL :	22
II.2.3 Dangers Lies au GNL	23
II.3 Différents types de stockage du GNL :	29
II.3.1 Réservoirs aériens à simple intégrité	29
II.3.2 Avantages et inconvénients	31
Chapitre III Modélisation des effets des phénomènes dangereux du bac I-901	32
III.1 Introduction	33
III.2 Condition métrologique.....	33
III.2.1 Humidité	33

III.2.2	Température.....	33
III.2.3	Vent	34
III.3	La population.....	35
III.4	Les scénarios de référence.....	36
III.4.1	Fréquence d'occurrence de l'événement	36
III.4.2	Fréquence d'occurrence des conséquences	36
III.5	Modélisation des conséquences d'événement	38
III.5.1	Critères retenus pour la détermination des zones de dangers.....	38
III.5.2	Donnée de modélisation	39
III.5.3	Résultats de la modélisation :	40
	Conclusion générale	45
	Bibliographie	46
	Annexes	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1: Distance des agglomérations par rapport au site.....	35
Tableau III-2: Personnels des trois complexes	35
Tableau III-3: Scénario retenu pour l'étude	36
Tableau III-4: Fréquence de défaillance pour les bacs atmosphériques.....	36
Tableau III-5: Probabilité d'ignition instantanée pour une installation fixe [6]	36
Tableau III-6: Probabilité d'ignition en une minute [6].....	37
Tableau III-7: Seuil des effets thermiques.....	38
Tableau III-8: Seuil des effets de surpression	39
Tableau III-9: Données de modélisation du scénario	39
Tableau III-10: Population exposée aux seuils des effets thermiques de feux de nappe ..	42
Tableau III-11: Population exposée aux flash-fire	43
Tableau III-12: population exposée aux seuils des effets de surpression.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Plan de masse du complexe GL1Z.....	14
Figure II-1: Volume du commerce mondial de GNL 1970-2014.....	21
Figure II-2: Chaîne du GNL.....	21
Figure II-3: Concentration à la limite du nuage visible de vapeurs de GNL en fonction de l'humidité relative atmosphérique.....	25
Figure II-4: Exemples de réservoirs à simple intégrité.....	30
Figure III-1: Variation interannuelle de températures sur Arzew.....	34
Figure III-2: Distribution fréquentielles des quatre classes de vitesse.....	34
Figure III-3: Distribution des classes de vent selon les directions.....	35
Figure III-4: Arbre d'événement de la rupture.....	37
Figure III-5: Courbe de concentration du gaz dispersé.....	40
Figure III-6: Distances des effets thermiques du feu de nappe.....	41
Figure III-7: Distance du feu d'un flash-fire.....	42
Figure III-8: Distances des effets de surpression du UVCE.....	43

LISTE DES A.BREVIATIONS

APCI	<i>Air Products and Chemicals Inc</i>
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i>
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de pétrole Liquéfié
LQS	Liquéfaction
MCR	Multi Composant Réfrigérant
MEA	Mono EthanolAmine
PDAT	Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire
PDAU	Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
PHAST	<i>Process Hazard Analysis Software Tool</i>
PNB	Produit National Brut
SEI	Seuil des effets irréversibles
SEL	Seuil des effets létaux
SELS	Seuil des effets létaux significatifs
TRP	Transition Rapide de Phase
UDM	<i>Unified Dispersion Model (modèle unifié de dispersion)</i>
UVCE	<i>Unconfined Vapour Cloud Explosion</i> (explosion de vapeur en milieu non confiné)

INTRODUCTION GENERALE

Flixborough, Seveso, Bhopal, Schweizerhalle: derrière ces noms et d'autres, autant de catastrophes industrielles qui ont conduit à dégager la notion d'accident majeur et à rechercher les moyens de prévenir ces accidents ou d'en limiter les conséquences s'il devait tout de même s'en produire.

Actuellement le monde industriel est devenu plus sensible à la maîtrise des accidents majeurs à cause des conséquences graves et même catastrophique matérielles, humaines et environnementales. Pour cela des efforts considérables sont fournies en matière de gestion des risques.

Le complexe GL1Z situé à Arzew avec une capacité de production de $7150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de GNL, comprend trois bacs de stockage d'une capacité de 100000 m^3 chacun. Ces bacs peuvent être remplis dans une durée de 42 heures.

Le risque lié au stockage de GNL est très important. En effet 11 accidents dans le monde concernant les stockages de GNL ont été recensés depuis 1944[7], sont :

- 5 sont dus à un défaut de matériau ou d'équipements,
- 4 sont directement liés à des opérations de maintenance ou de construction,
- 1 est dû à un phénomène de roll-over,
- 1 est dû à des effets dominos (suite à l'explosion d'une chaudière dans un complexe pétrochimique).

7 de ces accidents ont causé des victimes (morts ou blessés).

La direction de GL1Z veut connaître l'impact des effets des phénomènes dangereux qui peuvent apparaître lors d'une perte de confinement d'un bac de stockage, d'où l'objectif de ce mémoire

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres:

Dans Le premier chapitre on va présenter brièvement le complexe GL1/Z, le procédé de fabrication et de stockage.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique du Gaz Naturel Liquéfié, et aux différents types des bacs de stockages.

Dans Le troisième chapitre, on va procéder à la modélisation des effets des phénomènes dangereux des bacs de stockages par le programme PHAST.

Chapitre I *Présentation du complexe GL_1/\mathbb{Z}*

I.1 PRESENTATION DE SONATRACH

SONATRACH est la compagnie algérienne de recherche, d'exploitation, de transport par canalisation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Elle intervient également dans d'autres secteurs tels que la génération électrique, les énergies nouvelles et renouvelables et le dessalement d'eau de mer. Elle exerce ses métiers en Algérie et partout dans le monde où des opportunités se présentent.

SONATRACH est la première entreprise du continent africain. Elle est classée 12ème parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2ème exportateur de GNL et de GPL et 3ème exportateur de gaz naturel. Sa production globale (tous produits confondus) est de 230 millions de tep (tonne équivalent pétrole) en 2006. Ses activités constituent environ 30% du PNB de l'Algérie [1].

Elle emploie plus de 120 000 personnes dans l'ensemble du Groupe.

Aujourd'hui SONATRACH ne conçoit pas de développement économique sans un développement durable.

SONATRACH est divisée en 4 Activités : Amont ; Aval ; Transport par canalisation ; Commercialisation

I.2 PRESENTATION DU COMPLEXE GL1Z

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL1Z relève de l'activité Aval et de la branche LQS (Liquéfaction) de l'entreprise SONATRACH.

I.2.1 Localisation et accès

Le Complexe de liquéfaction de gaz naturel GL1Z est situé dans la commune de Bethioua, dans la zone industrielle d'Arzew, à environ 6 km au Sud -Est de la ville d'Arzew et à 35 km au Nord -Est d'Oran, wilaya d'Oran chef-lieu de la wilaya du même nom sur le golfe d'Oran (l'Oranais), située au Nord-Ouest de l'Algérie.

Les limites du complexe GL1Z sont :

- à l'Est, le Complexe GL2Z,
- à l'Ouest, le centre AVM NAFTAL et le projet HELIUM,
- la mer Méditerranée borde le site au Nord et à l'Est (port gazier El Djedid),
- au Sud se trouve la route d'accès principale de la Zone.

Le complexe GL1Z s'étend sur une superficie de 72 hectares. Le site s'étend sur une largeur (entre la route et la mer) d'environ 800 m et d'une longueur (le long du front de mer) d'environ 900 m. L'altitude moyenne est de 3 m.

I.2.2 Historique

Aucune activité industrielle n'a été enregistrée sur le site avant la construction de GL1Z.

La date de démarrage des travaux de construction du complexe GL1Z est 1973.

La mise en production a débuté le 20 février 1978.

I.2.3 Capacité de production

Le complexe traite $10,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ de gaz naturel par an avec production de Gaz Naturel Liquéfié et Gazoline.

Capacité de production :

GNL : 17 563 Millions m^3/an (contractuelle) 19 425 Millions m^3/an (installée).

Gazoline : 123 000 Tonnes/an (contractuelle) 136 000 Tonnes/an (installée).

Capacité totale de stockage :

3 bacs aériens de stockage GNL : $100\,000 \text{ m}^3$ chacun.

1 sphère de gazoline de 3280 m^3 .

Procédé utilisé

Le complexe comprend six trains de liquéfaction de gaz naturel.

Le procédé utilisé pour la liquéfaction du gaz naturel est le procédé Air-Product (APCI)

La construction du complexe a été réalisée par l'entrepreneur BECHTEL INC (USA)

I.2.4 Organisation générale

Le site peut être divisé en 4 grandes zones :

- Au Nord Est : la zone stockage et chargement de GNL.
- A l'Est, en partie médiane : la zone production et utilités (dessalement ...).
- A l'Ouest : zone occupée par les torches, le parc déchets et stockage produits chimiques et des installations annexes (école à feu, ...).
- Au Sud, les bâtiments des services administratifs et techniques et les locaux sociaux.

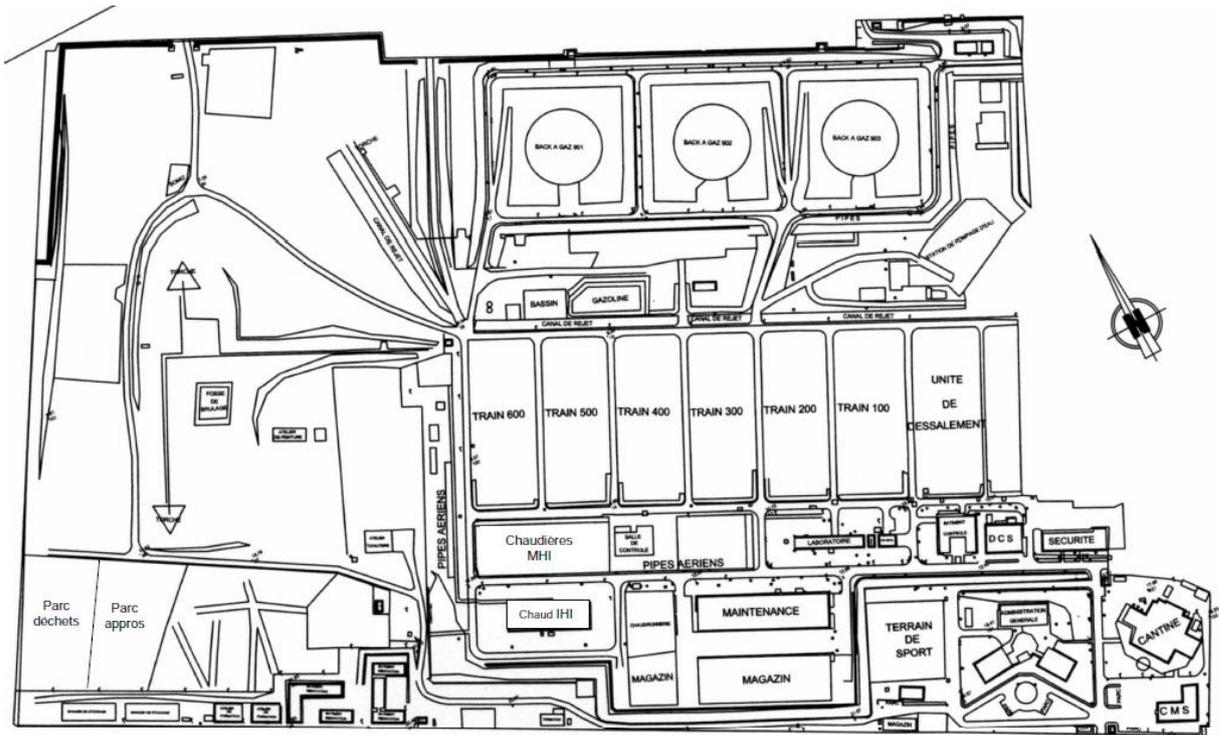


Figure I-1: Plan de masse du complexe GL1Z

I.3 DESCRIPTION DE PROCES DE LIQUEFACTION DE GAZ NATUREL

I.3.1 Description générale

Le complexe comprend les installations de réception du gaz naturel produit par les champs gaziers d'Hassi R'Mel qui se situent à 550 km au Sud d'Alger. Le gaz naturel qui alimente le complexe est transporté au moyen de deux pipelines interconnectés de 42'' de diamètre, à savoir GZ1 et GZ3. La capacité théorique totale de production du complexe est de l'ordre de 18 millions de m³ par an de GNL à partir de 6 trains de liquéfaction opérés pendant 335 jours.

Après traitement dans les trains de liquéfaction, le gaz liquéfié est stocké à la température de -162°C dans trois bacs cryogéniques de 100 000 m³ de capacité unitaire avant d'être exporté. Le complexe comprend des installations portuaires permettant le chargement de méthaniers dont la capacité varie entre 50 000 et 145 000 m³.

Des installations portuaires dédiées à l'exportation du GNL se situent au nord du complexe. Elles sont constituées d'une jetée équipée de deux appontements permettant le chargement des navires, et sont équipées chacune de quatre bras de chargement (diamètre 16'') pour le GNL, un bras (diamètre 12'') pour la récupération vapeur et un autre bras de chargement (diamètre 8'') pour le fuel.

I.3.2 Trains de liquéfaction

Le complexe est équipé de six trains de liquéfaction identiques. Le gaz naturel qui assure la charge du complexe est transporté par pipeline à la pression de 42 barg et est distribué vers les différents trains au travers d'un collecteur de 42'' de diamètre.

Une vanne de sécurité équipée d'un système de commande électro-pneumatique est installée sur la ligne d'arrivée du gaz naturel. En cas d'urgence, cette vanne commandée à distance depuis la salle de contrôle centrale et connectée au système d'arrêt d'urgence coupe l'alimentation du gaz naturel.

Le gaz naturel est envoyé dans chacun des trains sous une pression de 42 bar pour être dirigé vers la section décarbonatation où il est purifié par une solution aqueuse de MEA (monoéthanolamine) afin d'enlever les traces de dioxyde de carbone. Le taux de dioxyde de carbone dans le gaz est réduit à une concentration inférieure à 90 ppm et la MEA est recyclée et régénérée par l'utilisation d'un courant de vapeur.

A la sortie de la colonne d'absorption MEA, le gaz est refroidi à travers un échangeur au propane avant d'être envoyé vers la section déshydratation à travers un lit de tamis moléculaires permettant d'éliminer l'eau contenue dans le gaz et réduire sa teneur en humidité à un taux inférieur à 1 ppm volume. Le gaz est ensuite envoyé vers la section de démercurisation à travers un lit de charbon actif permettant l'élimination du mercure (Hg) contenu dans le gaz. Après séchage, le gaz est refroidi au propane avant de passer au niveau de la section de lavage pour élimination des hydrocarbures lourds.

Le procédé APCI est utilisé pour la liquéfaction du gaz.

La première étape de refroidissement est réalisée à partir du propane qui est comprimé, refroidi, condensé et déchargé dans des échangeurs au propane. La température du gaz est alors réduite à -26°C à la pression de 40 barg (bar jauge).

Le gaz à cette pression et température pénètre dans la colonne de lavage où le produit de tête formé d'hydrocarbures légers contenant de l'azote, du méthane, de l'éthane est envoyé vers la section liquéfaction; le produit de fond, essentiellement constitué d'hydrocarbures plus lourds, est envoyé vers les sections de fractionnement.

Les hydrocarbures de fond de colonne de lavage sont fractionnés successivement au travers du dé-méthaniseur (31 bar), du dé-éthaniseur (20 bar), du dé-propaniseur (17 bar) et du dé-butaniseur (5,5 bar), dont le produit de fond est stocké dans une sphère de gazoline puis expédié vers le complexe mitoyen GL2Z.

Durant la phase de fractionnement, les produits de tête sont extraits et utilisés comme appoint vers les systèmes de refroidissement propane et MCR, sachant qu'une partie est réinjectée dans le gaz traité afin d'accroître sa capacité calorifique.

Le gaz produit de tête de la colonne de lavage est envoyé essentiellement vers l'échangeur principal pour être liquéfié. Une partie, de l'ordre de 4%, est envoyée vers un second échangeur, appelé échangeur de gaz de rejet, avant de rejoindre le ballon d'aspiration de la pompe de GNL.

La température du courant gazeux entrant dans l'échangeur principal est de -30°C à la pression de 39 bar. Le gaz est refroidi au niveau de l'échangeur principal par du MCR jusqu'à une température de -148°C à une pression de 25 bar. Le courant gazeux est alors dirigé vers une vanne de détente Joule - Thomson où la pression diminue jusqu'à 1,38 bar, entraînant une baisse de température jusqu'à -161°C et la liquéfaction du gaz.

L'azote et le gaz combustible sont extraits à partir d'un ballon de flash et envoyés vers les chaudières comme alimentation. Le gaz naturel liquide (GNL) est quant à lui envoyé vers la zone de stockage GNL par l'intermédiaire de pompes de transfert.

Le réfrigérant MCR circule dans une boucle de réfrigération au moyen de deux compresseurs centrifuges entraînés par des turbines à vapeur. La pression de sortie du premier étage de compression est de 11 bar et celle du second étage est de 42 bar.

Le contrôle et la régulation du procédé de liquéfaction sont assurés à distance par l'utilisation du système de contrôle digital DCS (Foxboro) et d'un système d'enregistrement des paramètres (Data Logger) dans une salle de contrôle centrale. Le contrôle de la détection incendie et de la détection gaz est également assuré à partir de la salle de contrôle centrale et le poste de veille de la sécurité.

I.3.3 Stockage et expédition

I.3.3.1 Stockage du GNL

Le GNL produit par les 6 trains de liquéfaction est envoyé au stockage de GL1Z. Là, il est conservé dans 3 réservoirs, 810-I-901/902/903, prêt à être expédié. Le GNL des réservoirs est pompé vers deux quais de chargement pour le transfert sur les méthaniers.

Le GNL produit, issu du ballon de flash d'azote (X06-G-07.83) est pompé par les pompes de GNL (X06-J-10.20/23) via une ligne de 20" GNL-81016 vers un collecteur commun de 24" GNL-71017 connecté aux trois réservoirs de stockage GNL (810-I-901/902/903).

Chacun des réservoirs de stockage GNL est à fond plat, à double paroi avec une capacité de stockage de 100 000 m³.

Les fondations sont constituées d'assises formées chacune d'une couronne en béton sur laquelle sont installés des piliers verticaux permettant de recevoir les bacs de stockage. Ce type de construction permet la libre circulation de l'air sous chacun des réservoirs.

La coque intérieure est constituée d'acier au nickel 9 % et a un diamètre de 65,8 mètres, avec une hauteur de 32,1 mètres. La coque extérieure est constituée d'acier au carbone et a un

diamètre de 67,6 mètres avec une hauteur au sommet du dôme de 44,8 mètres. Le toit est en acier au carbone et est protégé du contact direct avec les vapeurs froides par un toit suspendu, en aluminium isolé avec de la laine minérale et de la perlite. L'espace annulaire entre les parois est rempli d'une isolation en perlite, avec un revêtement en fibre de verre sur les parois du réservoir. Cela permet de prendre en compte l'expansion/contraction de la coque intérieure, sans compacter la perlite. L'espace annulaire contient du gaz plus chaud entre le dôme et le toit suspendu. Une couche d'isolation de fibre de verre est placée en plus de la perlite dans l'espace annulaire. Le réservoir intérieur repose sur une couche d'isolation en mousse de verre et des blocs de perlite, entre les fonds de réservoir intérieurs et extérieurs.

Les réservoirs comportent 4 connexions d'azote connectées à un anneau de purge de 3", implanté dans l'espace annulaire entre les coques intérieures et extérieures.

Le GNL est stocké dans les réservoirs à 1,034 bar absolu et -163°C.

Avec les six trains en production à 100%, le temps de remplissage d'un réservoir est environ 42 heures. Le niveau maximum de remplissage dans les réservoirs de stockage est 29,52 mètres.

Les réservoirs sont entourés par des digues protectrices, avec une capacité égale au volume du réservoir en cas d'un déversement et équipés avec un système d'extinction à la mousse et des canons incendie. Les réservoirs sont connectés à un collecteur de vapeur commun. La production de vapeur par ébullition représente approximativement 2-3 % du volume des réservoirs par jour ; elle est envoyée à l'aspiration du compresseur du fuel gaz. Ce système reçoit la vapeur d'ébullition des réservoirs de stockage et la vapeur produite pendant des opérations de chargement des navires.

Une ligne d'aspiration commune de 48"GNL-81039 amène le produit GNL des réservoirs vers cinq pompes de chargement GNL (820-J-901/912/903/904/905). Ces pompes refoulent dans des collecteurs 30" GNL vers les 2 quais de chargement.

Les vapeurs produites en chargeant le GNL dans le méthanier sont collectées par les bras de retour de vapeur, 830-R-908/Quai M2, 830-R-903/Quai M3 et sont jointes à la vapeur du réservoir de drainage, 831-G-904. Cette vapeur combinée est comprimée et est renvoyée vers la ligne commune de vapeur 36"FG-81014 des réservoirs de stockage où elle est utilisée pour compenser la baisse de volume de liquide dans les réservoirs de stockage. La vapeur d'excès est renvoyée à l'aspiration des compresseurs du fuel gaz et, en cas de haute pression, la vapeur est envoyée à la torche des stockages GNL (torche boil-off).

I.3.3.2 Expédition

Un collecteur commun d'aspiration de 48" fournit du GNL produit provenant des réservoirs de stockage aux cinq pompes de chargement de GNL 820-J901/902/903/904/905.

Ces pompes refoulent dans une conduite de chargement de GNL de 30". La conduite peut être utilisée pour charger un méthanier au niveau de n'importe lequel des deux quais de chargement (mais on ne peut charger qu'un méthanier à la fois), et aussi pour faire un transfert inter-complexe. Cela dépend de la fermeture ou de l'ouverture d'un jeu de vanne (trois vannes manuelle situées au niveau des lignes 30"LNG-81210-1939 et 30"LNG-81214-1939 et aussi la vanne HV-80078 située dans la ligne 30"LNG-81056-1939)

Le collecteur de transfert pour GL1Z 24"LNG-81017, est raccordé à un pipeline 30"LNG-81214 qui s'étend au-delà de la limite de GL1/Z. Dans le site GL2/Z, ce pipeline est désigné LNG-21005-30". Le pipeline 30"LNG-81214 est muni de deux vannes papillon ; la première vanne est verrouillée en position ouverte, tandis que la vanne à l'extérieur des limites de batteries de GL1Z et GL2Z est verrouillée en position fermé. D'autre part, il existe dans le site GL2Z deux vannes papillon sur la conduite LNG-21005-30", l'une des vannes est verrouillée en position ouverte, tandis que l'autre vanne est verrouillée en position fermée. La conduite LNG-21005-30" aboutit dans la conduite de chargement LNG-21030-32", qui vient des pompes de chargement.

Sur le site GL1Z, un pipeline d'interconnexion (30"LNG-81210) est installé entre la conduite d'interconnexion de GNL partant de GL2Z et la conduite de chargement (30"LNG-81056). Une vanne verrouillée en position fermée (C) est installée dans cette conduite.

Sur le site GL2/Z, un pipeline d'interconnexion LNG-21139-20" est installé entre la conduite d'interconnexion de GNL partant du site GL1Z et la conduite de transfert LNG-21000-20".

Chapitre II *Généralités sur le Gaz Naturel*
Liquéfié et les bacs de stockages

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est du gaz naturel (composé essentiellement de méthane) condensé à l'état liquide. il jouera un rôle de plus en plus important dans l'industrie mondiale de l'énergie, car les réserves mondiales de gaz naturel sont abondantes et son état condensé rend possible son transport sur de longues distances par les voies maritimes, donnant naissance à de véritables chaînes d'approvisionnement incluant les puits producteurs, les usines de traitement, les réseaux de gazoducs, les usines de liquéfaction, les terminaux de chargement des méthaniers.

Toute manipulation du GNL dans les différentes phases (production, stockage, transport) peut engendrer des catastrophes liées au fait qu'il est explosif et inflammable. Pour modéliser les il nous faut connaître les caractéristiques du GNL. Dans ce qui va suivre, nous allons traiter les propriétés physiques et chimiques du composé, et de voir où consiste sa dangerosité.

II.1 BREF HISTORIQUE DU GNL :

En 1941, une première usine commerciale de liquéfaction de gaz naturel ouvrit à Cleveland dans l'Ohio. A cette époque, il n'était question ni de terminaux de GNL, ni de transport transocéanique. Elle servait au stockage temporaire du gaz, pour lisser la consommation sur le réseau (station d'écêtement de pointe – i.e « peak shaving »). Après 4 années d'opération sans problème apparent, un nouveau réservoir de stockage s'effondra pratiquement instantanément à cause d'un acier inadapté aux températures cryogéniques.

Le transport maritime du gaz naturel liquéfié commença à titre expérimental en janvier 1959. Le premier navire de transport de GNL au monde fut le « Methane Pioneer », un navire de la seconde guerre mondiale reconverti, qui transporta du gaz naturel liquéfié de Lake Charles, en Louisiane, à Canvey Island au Royaume-Uni. Ceci démontra que de grandes quantités de GNL pouvaient être transportées par voie maritime.

Le premier terminal d'exportation commercial, CHAMEL, fut ouvert en Algérie à Arzew en 1964. Il exporta du gaz vers la Grande-Bretagne, puis vers la France et les Etats-Unis. En 1969, l'exportation de gaz naturel commença de Kenai en Alaska vers le Japon.

Depuis, le commerce du gaz naturel liquéfié a connu une croissance ininterrompue, marquée par la diversification progressive des fournisseurs et des clients.

Le graphe suivant représente une statistique de volume du commerce mondial du GNL de 1970 à 2014. En 1975, le volume du commerce mondial de GNL est venu à 13 milliards de mètres cubes. En 2013, le volume du commerce de GNL ont totalisé 325 milliards de mètres cubes. [2]

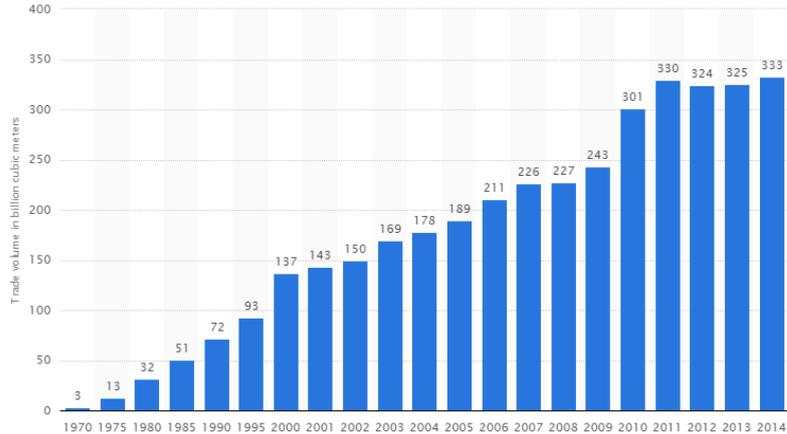


Figure II-1: Volume du commerce mondial de GNL 1970-2014
(Source : statista.com)

II.2 CARACTERISTIQUE 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.2.1 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 de 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.

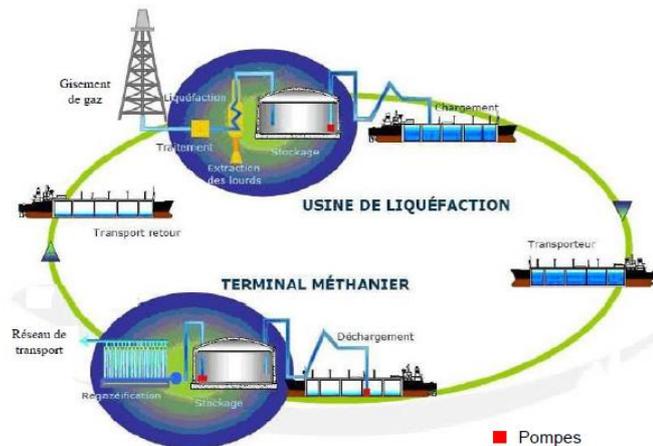


Figure II-2: Chaîne du GNL
(Source : Bureau de l'Environnement Canadien – BAPE)

II.2.2 Propriété physique du GNL :

II.2.2.1 Généralité sur le 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°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. [2]

II.2.2.2 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^3 , 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.[3]

II.2.2.3 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. [3]

II.2.2.4 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.[3]

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.

II.2.3 Dangers Lies au GNL

II.2.3.1 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 (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[3].

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 d'Arzew/Bethioua sont plutôt exposées aux vapeurs de GNL réchauffées par l'air ambiant.

II.2.3.2 Dangers liés à un épandage de GNL

II.2.3.2.1 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[4].

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 créé induit 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.

II.2.3.2.2 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.

La taille du nuage est la plus grande par temps calme et décroît si la vitesse du vent augmente, le vent ayant pour rôle de disperser le gaz. Des études ont essayé de déterminer la

concentration atteinte à la frontière du nuage visible. La figure II-3 montre que cette concentration dépend de l'humidité de l'atmosphère [4].

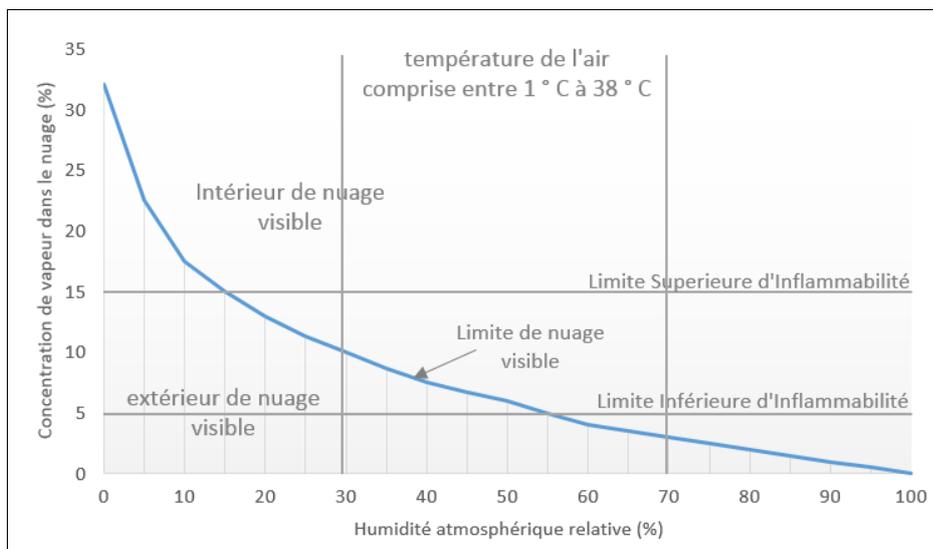


Figure II-3: Concentration à la limite du nuage visible de vapeurs de GNL en fonction de l'humidité relative atmosphérique

Ainsi, pour un taux d'humidité supérieur à 55%, la Limite Supérieure d'Inflammabilité et la Limite Inférieure d'Inflammabilité se trouvent dans le nuage visible. Cela signifie que le nuage inflammable est totalement inclus dans le nuage visible.

Dans le cas contraire, si le taux d'humidité est inférieur à 55%, le nuage inflammable peut être en partie ou en intégralité en dehors du nuage visible, donc les vapeurs peuvent être enflammées même si la source d'inflammation est éloignée du nuage visible.

Dans un environnement côtier comme l'est celui du complexe de Arzew / Bethioua, l'humidité relative est bien supérieure à la valeur de 55%. Le nuage visible représente donc une information fiable pour localiser les vapeurs inflammables de GNL.

II.2.3.2.3 Transition Rapide de Phase[3]

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 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 convertissant 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.2.3.3 Dangers liés au caractère inflammable du GNL

II.2.3.3.1 Feux de flaque / Feu de nappe

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.

II.2.3.3.2 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 écrite lorsque l'on équilibre la réaction de combustion. C'est le mélange donnant le meilleur rendement. Ce phénomène est une explosion Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE), de type déflagration. Il peut mener à des pics de surpression de l'ordre de 4 à 10 bars.

II.2.3.3.3 *Feu torche*

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

II.2.3.3.4 *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 à proximité d'une capacité, qui réchauffe le gaz liquéfié stocké à l'intérieur, augmente sa pression, et affaiblit dans le même temps l'enceinte du réservoir. Arrivé à un certain point, celui-ci est trop affaibli, le gaz liquéfié est relâché et un BLEVE peut survenir.

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 cédera 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 de rassembler 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.2.3.4 *Autres types de dangers liés au GNL*

II.2.3.4.1 *Anoxie*

Les vapeurs de GNL ne sont pas toxiques pour l'homme, mais peuvent être cause d'asphyxie si la proportion d'oxygène n'est plus assez importante dans l'air respiré [9].

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 de réponse aux situations d'urgence, qui seraient amenées à intervenir au plus près d'un rejet de GNL. Ce phénomène relève donc du risque professionnel.

II.2.3.4.2 *Roll-over*

Le GNL est majoritairement composé de méthane (souvent 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 (ex : 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 ». A 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 identique 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.3 DIFFERENTS TYPES DE STOCKAGE DU GNL :

Il existe plusieurs types de réservoirs qui sont couramment utilisés dans l'industrie mondiale. Les principaux sont présentés ci-après[2]:

- 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.3.1 Réservoirs aériens à simple intégrité

Les premiers réservoirs conçus pour le stockage de GNL étaient issus des pratiques des industries pétrolières, adaptées aux conditions cryogéniques particulières.

Un réservoir simple intégrité est composé de (Figure II-4) :

- 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 l'isolation haute,
 - 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).

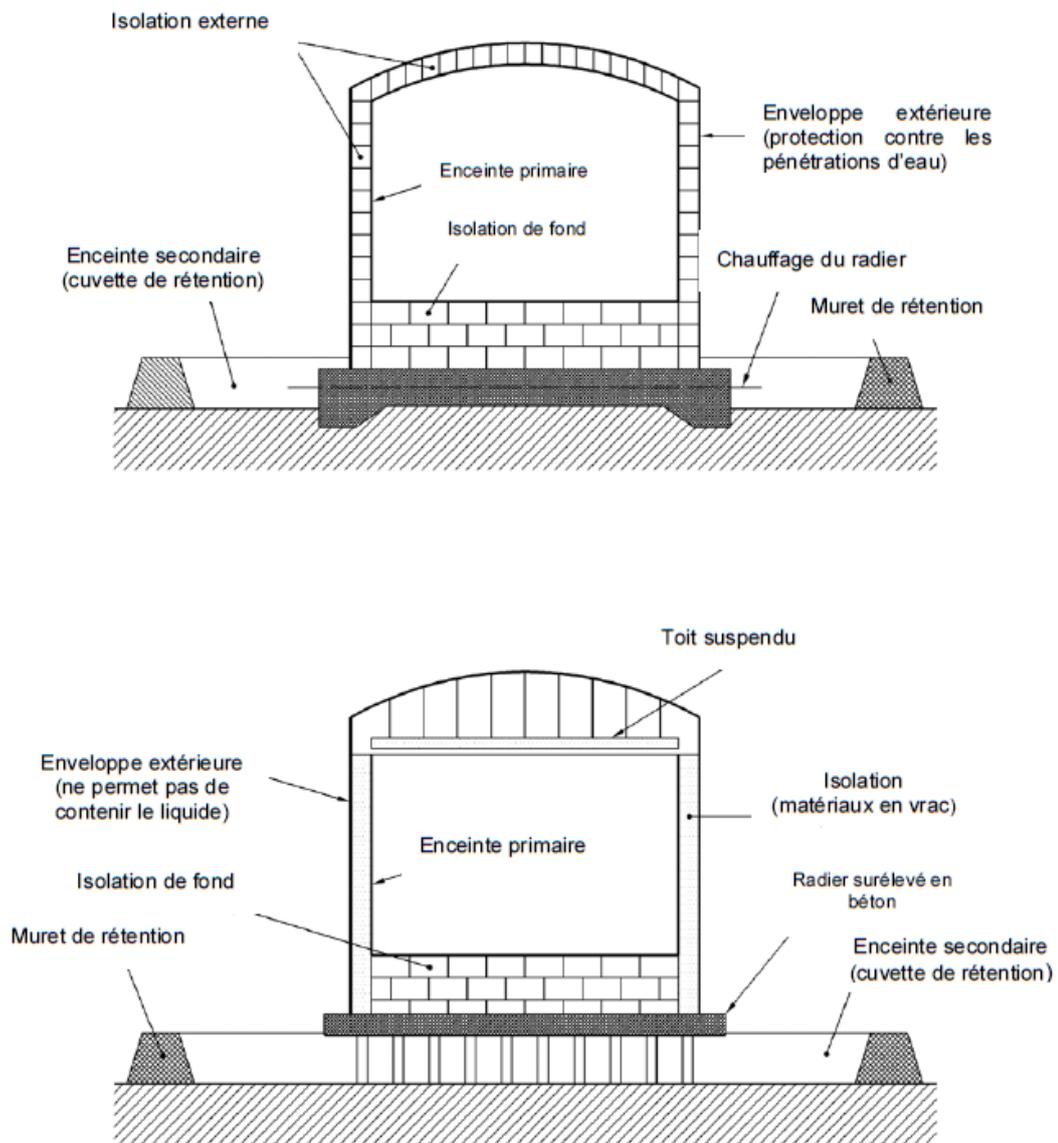


Figure II-4: Exemples de réservoirs à simple intégrité

II.3.2 Avantages et inconvénients

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.

Chapitre III *Modélisation des effets des
phénomènes dangereux du bac I-901*

III.1 INTRODUCTION

Dans le monde, les pays ont obligé, par le biais de la réglementation, les entreprises qui présentent un risque majeur potentiel, d'élaborer une étude de danger.

Avec l'évolution des exigences réglementaire algériennes, le complexe GL1/Z est obligé d'élaborer une étude de danger pour se conformer aux exigences, et de déterminer le niveau du risque sur l'agglomération qui entoure le stockage de GNL.

Lors de l'élaboration d'une étude de danger, on s'intéresse aux phénomènes dangereux, pour les évaluer et modéliser leurs effets.

Dans cette partie de travail, on va nous intéresser à modéliser les effets thermiques et de suppression des phénomènes dangereux pouvant apparaître à cause d'une perte de confinement au niveau du bac de stockage de GNL.

III.2 CONDITION METEOROLOGIQUE

Etant donné la proximité de la mer, sa topographie et son altitude, l'Algérie littorale a un climat tempéré, subtropical méditerranéen. Il se caractérise par un été sec qui dure de trois à quatre mois, et des hivers doux et humides.

Les données météorologiques (statistiques climatologiques pour la période : 1985-2007) sont fournies par le Centre Climatologique National; elles proviennent de la station d'Arzew dont les coordonnées sont : [4]

Latitude : 35°49'N Longitude : 00°16'W Altitude : 3 mètres

Les précipitations moyennes mensuelles peuvent varier de 1 mm d'eau en saison sèche à environ 80 mm en période hivernale, Les conditions météorologiques nécessaires pour la modélisation sont l'Humidité, la température et le vent.

III.2.1 Humidité

La zone côtière d'Oran se caractérise par une humidité relative de plus de 60% tout le long de l'année. L'humidité annuelle moyenne de la zone d'industrielle d'Arzew est de 76%, avec une moyenne de minimums de 70 % et une moyenne des maximums de 80 % [4].

III.2.2 Température

A Arzew, la moyenne de température annuelle est de 19,0°C entre 1985 et 2006.

La Figure III-1 représente la variation interannuelle de la température moyenne, une hausse significative de la température moyenne est à signaler à partir des années 90.

La température minimale la plus basse enregistrée au cours de cette période à la station d'Arzew est de 0,6°C alors que le maximum observé est de 42,5°C.

Les températures moyennes mensuelles peuvent osciller entre 1,8°C en janvier et 37°C en août [4].

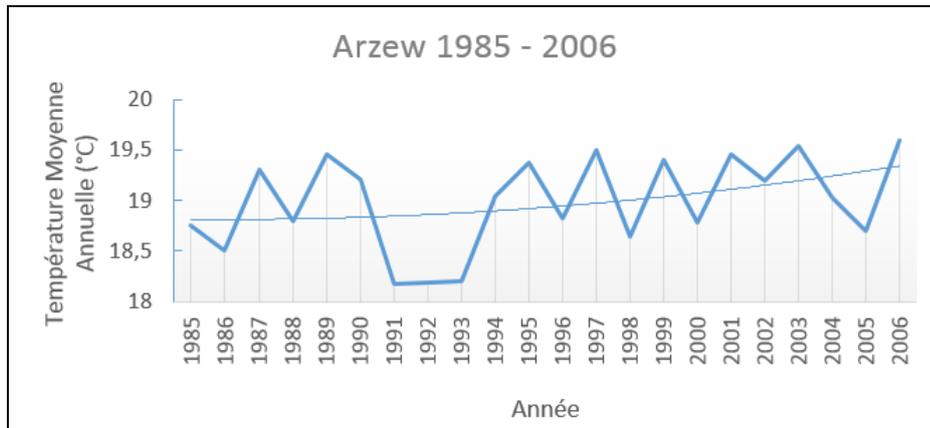


Figure III-1: Variation interannuelle de températures sur Arzew

III.2.3 Vent

A l'échelle annuelle, on peut dire que les vents dominants sont de secteur Ouest. Environ 2% des vents sont compris entre 11 et 16 m/s, 10% sont compris entre 6 et 11 m/s et 8% sont compris entre 1 à 6 m/s. les vitesses du vent les plus fréquentes sont celles qui sont comprises entre 1 et 6 m/s. les vitesses comprises entre 6 et 11 m/s occupent la deuxième position.

La figure III-2 suivante représente la distribution fréquentielles des quatre classes de vitesse [4].

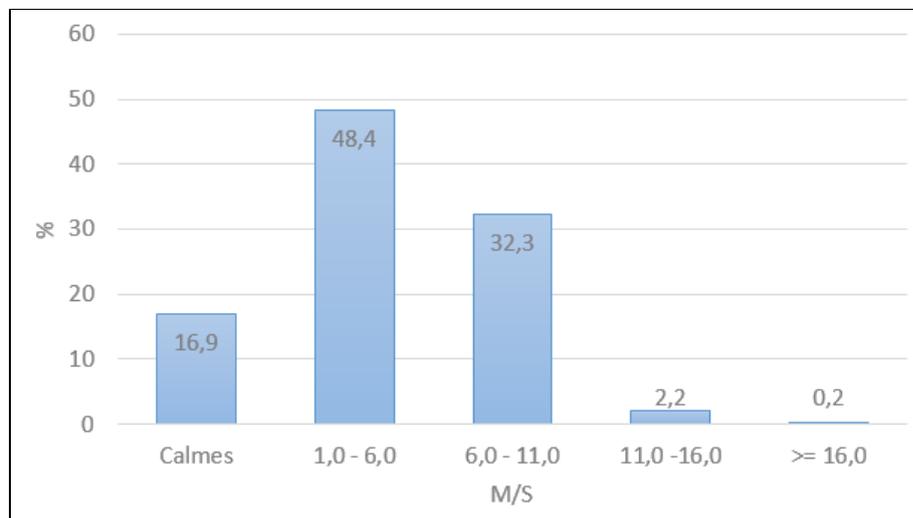


Figure III-2: Distribution fréquentielles des quatre classes de vitesse

La figure III-3 suivante représente la distribution de quatre classes de vent selon huit directions [4].

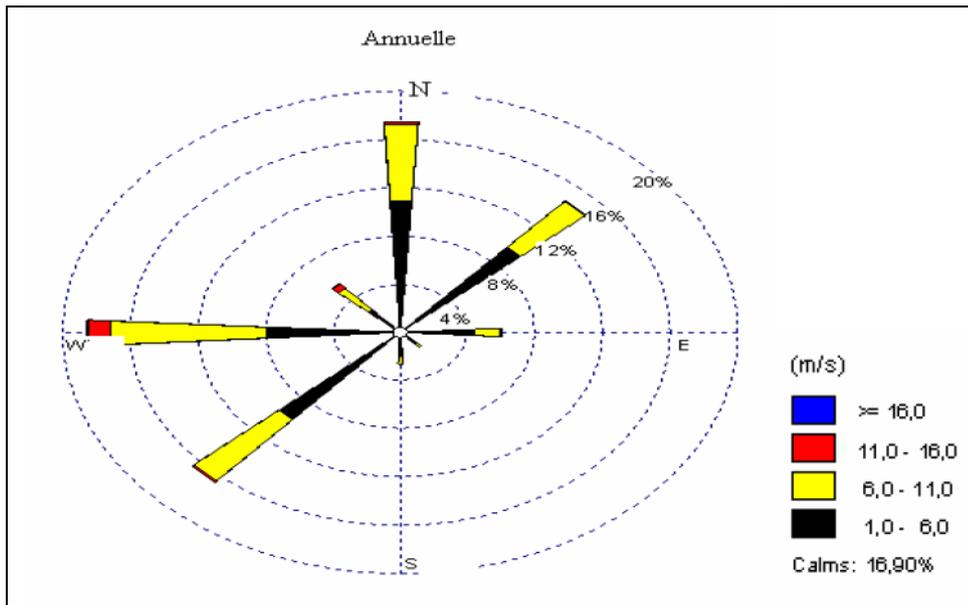


Figure III-3: Distribution des classes de vent selon les directions

III.3 LA POPULATION

D'après le PDAU de la commune d'Arzew, le complexe GL1Z se trouve dans la zone SI-9, soit le pôle industriel pétrochimique qui s'étend sur une superficie de 2592 ha et comprend deux ports spécialisés et une plateforme industrielle. Le pôle industriel d'Arzew est situé à 42 km au nord d'Oran. Il s'étend sur environ 12 km et englobe les communes d'Arzew, d'Ain El Biya, de Bethioua et de Mers El Hadjadj.

Le tableau suivant présente la démographie des agglomérations les plus proches du site ainsi que leur distance par rapport au site [4].

Tableau III-1: Distance des agglomérations par rapport au site

Agglomérations	Nb d'habitants	Distance par rapport au site
Bethioua	17 660	<200m
Ain El Biya	31595	2 km
Arzew	82590	5,5 km
Mers El Hadjadj	12689	7,8 km

Source : Direction de la Planification et de l'aménagement du Territoire (DPAT) 2008

Le nombre des personnels des trois complexes GL1Z, GL2Z, GL3Z, sont représenté dans Le tableau III-2

Tableau III-2: Personnels des trois complexes

	GL1Z	GL2Z	GL3Z
personnels	1045	1050	850

La distribution des personnels du complexe GL1Z se trouve dans l'annexe 1

III.4 LES SCENARIOS DE REFERENCE

On a retenu que le scénario le plus dangereux est la perte de confinement du bac I-901 provoquant l'un des phénomènes dangereux cité dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-3: Scénario retenu pour l'étude

<i>Evénement redouté</i>	<i>conséquence</i>
Perte de confinement du bac 810-I-901 suite à l'augmentation brusque de pression due au phénomène de roll-over	Dispersion atmosphérique ; Feu de nappe ; UVCE ; Flash Fire (feu de nuage).

III.4.1 Fréquence d'occurrence de l'événement

Les calculs des fréquences génériques de défaillances des canalisations sont basés sur des données extraites du Handbook failure frequencies[5]

Tableau III-4: Fréquence de défaillance pour les bacs atmosphériques

Type de défaillance	Fréquences de défaillances (/an)
Petite fuite $D_{eq}= 10\text{mm}$	$2,4*10^{-3}$
Fuite moyenne $D_{eq}= 25\text{mm}$	$2,2*10^{-4}$
Grande fuite $D_{eq}> 50\text{mm}$	$2,2*10^{-4}$
Rupture	$5,0*10^{-6}$

III.4.2 Fréquence d'occurrence des conséquences

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

III.4.2.1 Probabilité d'ignition instantanée

Le « purple book » recommande les valeurs figurant dans le Tableau (III-4) ci-dessous :

Tableau III-5: Probabilité d'ignition instantanée pour une installation fixe [6]

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

III.4.2.2 Probabilité d'ignition retardé

Le tableau (III-5) suivant représente les probabilités d'ignition dans une minute cité dans (Purple book) avec un ajustement relative aux conditions de site.

Tableau III-6: Probabilité d'ignition en une minute [6]

Source	Probabilité d'ignition dans une minute
Source Ponctuelle	
Véhicule	0,4
Torche	1,0
Four à l'extérieur	0,9
Four à l'intérieur	0,45
Chaudière à l'extérieur	0,45
Chaudière à l'intérieur	0,23
Source Linéaire :	
Source de transmission	0,2 par 100m
Route	0,06
Chemin de fer	0,011
Source surfacique :	
Installation chimique	0,9 par site
Raffinerie de pétrole brut	0,9 par site
Source de population	
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 rupture et les probabilités d'ignition :

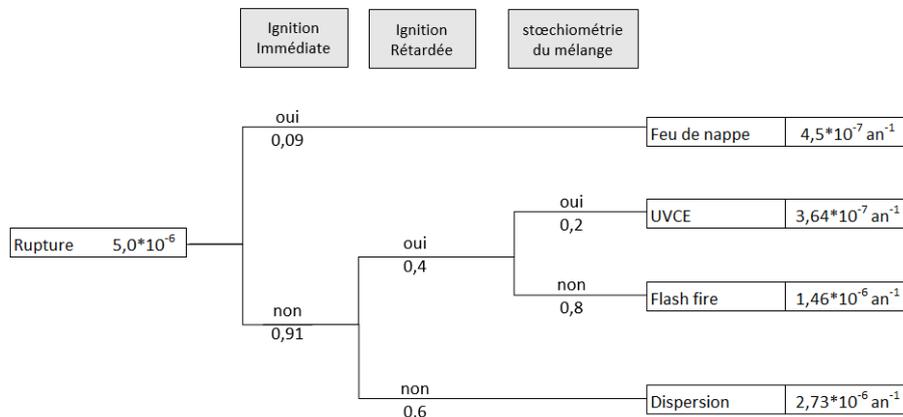


Figure III-4: Arbre d'événement de la rupture

Le calcul des fréquences finales :

- Feu de Nappe (FN) = $(5,0 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,09$
- Unconfined Vapour Cloud explosion (UVCE) = $(5,0 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,91 \cdot 0,4 \cdot 0,2$
- Flash Fire (FF) = $(5,0 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,91 \cdot 0,4 \cdot 0,8$
- Dispersion = $(5,0 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,91 \cdot 0,6$

III.5 MODELISATION DES CONSEQUENCES D'EVENEMENT

L'analyse des conséquences relatives au scénario retenu sera effectuée à l'aide du logiciel PHAST (version 7.11.33.0).

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 d'accidents [4].

III.5.1 Critères retenus pour la détermination des zones de dangers

III.5.1.1 Effets thermiques

Les valeurs seuils des effets thermiques de référence retenues sont [8]:

Tableau III-7: Seuil des effets thermiques

Valeur	Effet sur l'homme	Effet sur les structures
8 kW/m ²	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 ²	Seuil des effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine.	Seuil des destructions de vitres significatives.
3 kW/m ²	Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine.	

III.5.1.2 Effets de surpression

Les valeurs seuils des effets de surpression de référence retenues sont [8] :

Tableau III-8: Seuil des effets de surpression

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

III.5.2 Donnée de modélisation

Les données de modélisation du scénario rupture catastrophique de la ligne 30"LNG-81214-1939 sont représentées dans le tableau III-9

Tableau III-9: Données de modélisation du scénario

	Paramètre	Donnée		
Condition de stockage	Type de produits	Gaz Naturel Liquéfié		
	Etat du produit	Liquide		
	Température	-163°C		
	Pression	1,034 Bar		
Scénario	Scénario	Rupture		
	Lieu de décharge	En dehors des bâtiments		
	Phase de décharge	Gaz		
Bac	Diamètre interne	25,8m		
	Hauteur	32,1 m		
	Volume de liquide	42000 m ³		
Calcul d'effets	Seuil de référence de surpression	50 mbar	140 mbar	200 mbar
	Seuil de référence de radiation	3 kW/m ²	5 kW/m ²	8 kW/m ²
	Température moyenne	19°C		
	Vent	6 m/s _D		
	Humidité	76 %		

III.5.3 Résultats de la modélisation :

Le résultat de la modélisation 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.

III.5.3.1 La dispersion atmosphérique

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

Vu la densité de vapeurs du GNL ($d=1,5$) supérieure à celle de l'air ($d=1,29$), 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, qui, lui, va alors se refroidir donc s'alourdir. Ce mélange va s'accumuler près du sol.



Figure III-5: Courbe de concentration du gaz dispersé

Comme montrée dans la figure III-5. Il y a trois concentrations de gaz dispersé qui peuvent être dangereuse sur des distances déterminées :

- Une Zone en rouge riche en méthane où on dépasse la limite supérieure d'inflammabilité qui s'étend sur une distance de 740 m, dans ce cas, le risque d'inflammabilité est minime.
- Une Zone en vert qui va jusqu'à 2981 m 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 4904 m, pauvre en méthane d'où sa concentration en mélange avec l'oxygène ne présente aucun risque d'inflammabilité.

III.5.3.2 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 III-6: Distances des effets thermiques du feu de nappe

La figure III-6 montre les rayons relatifs aux valeurs du seuil des effets thermiques:

- Un rayon de 2675 m pour la valeur de 3 KW/M²
- Un rayon de 1666 m pour la valeur de 5 KW/M²
- Un rayon de 1013 m pour la valeur de 8 KW/M²

Pour voir les effets de ces radiations thermiques sur l'homme et les installations, le tableau III-6 est à consulter

Le tableau III-10 représente la population exposée aux seuils des effets thermiques de feux de nappe

Tableau III-10: Population exposée aux seuils des effets thermiques de feux de nappe

Radiation	Distance	Population exposé (Ville)		Population exposé (complexes)			Population totale
		Bethioua	Ain El Biya	GL1Z	GL2Z	GL3Z	
3 KW/M ²	2675 m	17660	31595	1045	1050	850	52200
5 KW/M ²	1666 m	17660	0	1045	1050	0	19755
8 KW/M ²	1013 m	5000	0	1045	1050	0	7095

III.5.3.3 Flash Fire

Le résultat concerne un phénomène aussi caractéristique à la dispersion et à l'inflammabilité des gaz qui est le feu de flash.



Figure III-7: Distance du feu d'un flash-fire

La boule de feu atteint des distances selon la limite d'inflammabilité, comme montré dans La figure III-7, ce phénomène est caractérisé par les limites :

- Limite supérieure d'Inflammabilité, LSI (en bleu) : peut atteindre une distance de 3000m.
- Limite Inférieure d'Inflammabilité, LII (en vert) : peut atteindre une distance de 4986m.

Le tableau III-11 représente la population exposée aux flash-fire selon les limites d'inflammabilités

Tableau III-11: Population exposée aux flash-fire

Limite	Distance	Population exposé (Ville)		Population exposé (complexes)			Population totale
		Bethioua	Ain El Biya	GL1Z	GL2Z	GL3Z	
LSI	3000 m	17660	31595	1045	1050	850	52200
LII	4986 m	17660	31595	1045	1050	850	>52200

III.5.3.4 Effets de surpression du UVCE

Un autre phénomène qui résulte de l'inflammabilité de 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 III-8: Distances des effets de surpression du UVCE

Les distances des effets de l'onde de pression sont montrées dans la figure III-8 :

- Un rayon de 2536 m pour une pression de 50 mbar.
- Un rayon de 937 m pour une pression de 140 mbar.
- Un rayon de 697 m pour une pression de 200 mbar.

Pour voir les effets de ces ondes de pression sur l'homme et les installations, le tableau III-7 est à consulter.

Le tableau III-12 représente la population exposée aux seuils des effets de surpression du UVCE.

Tableau III-12: population exposée aux seuils des effets de surpression

Surpression	Distance	Population exposé (Ville)		Population exposé (complexes)			Population totale
		Bethioua	Ain El Biya	GL1Z	GL2Z	GL3Z	
50 mbar	2536 m	17660	31595	1045	1050	850	52200
140 mbar	937 m	0	0	500	0	0	500
200 mbar	697 m	0	0	74	0	0	74

En conclusion, Les résultats de la modélisation par PHAST montrent qu'un perte de confinement dans les bacs de stockage remplie à 40%, a des effets thermiques et de surpression non seulement sur le complexe GL1Z, mais aussi sur les autre complexes et sur l'agglomérations proches du complexe, on peut citer Bethioua, et Ain El Biya.

L'effet domino du feu de nappe atteint les complexes GL1Z et GL2Z, alors que l'effet domino de l'UVCE atteint les bacs de stockages GL1Z.

Conclusion générale

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.

Le travail présent est la modélisation des effets des différents phénomènes dangereux qui peuvent apparaître suite à une perte de confinement au niveau du bac de stockage de GNL.

Après avoir fini cette étude, nous avons tirés des résultats suivants :

	Feu de nappe			UVCE			Flash-fire	
	SELS	SEL	SEI	SELS	SEL	SEI	LSI	LII
Distances (m)	2675	1666	1013	2536	937	697	3000	4986
Population touché	52200	19755	7095	52200	500	74	52200	>52200

Les zones de Béthioua et d'Ain El Biya sont touchées par les effets de surpression d'un UVCE et les effets thermiques d'un feu de nappe.

D'après ces résultats, la distance qui doit séparer entre les bacs stockage et la zone urbaine, est de 5 km au minimum.

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

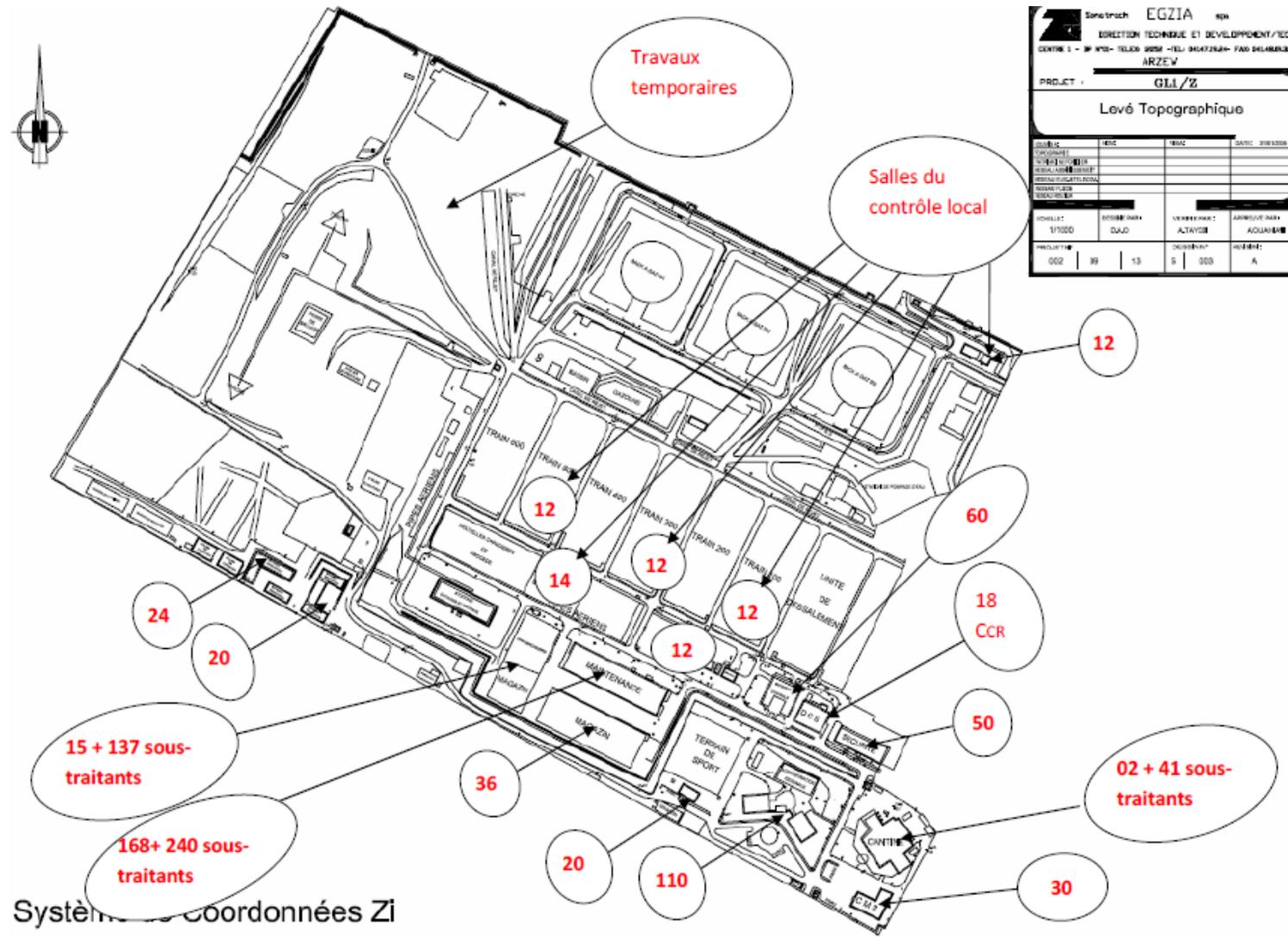
BIBLIOGRAPHIE

- [1] World gas conference, *World LNG Report*, International Gas Union, 2014.
- [2] Valérie de DIANOUS, *Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour le stockage de Gaz Naturel Liquéfié (GNL)-Installations fixes*, INERIS, 2011.
- [3] Saeid, M. and John, M. and Jaleel, V. and David, A.W., *Handbook of Liquefied Natural Gas* », Gulf Professional Publishing, 2014.
- [4] L. BRAZIER, *Etude de Danger, SONATRACH AVAL Complexe GL1/Z*, Bureau VERITAS, 2011.
- [5] HEIRMAN, J.P. *Handbook failure frequencies for drawing up a safety report*, Brussels: The Flemish Government Environment, Nature and Energy Department Environment, 2009.
- [6] De Haag, U. and dr. B.J.M. Ale, *Guideline for quantitative risk assessment 'Purple book' CPRI8E*, Third edition, Gevaarlijke Stoffen, 2005.
- [7] Base de données ARIA. Accidents-GNL [en ligne]. Consulté le 20/04/2016 disponible sur : <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>
- [8] 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.
- [9] Emmanuelle, Q.B., *Fiche Simdut du GNL*, GazMétroUsin LSR ,2015

ANNEXES

ANNEXE 1

Annexe 1 : distribution des personnels GLIZ



ANNEXE 2

Annexes 2 : Volume de GNL dans les bacs pendant le mois de novembre 2015

Novembre 2015	Volume (m3)			
	bac I-901	bac I-902	bac I-903	Total
1	58922	58864	60970	178756
2	65650	65657	67770	199077
3	24800	24663	26838	76301
4	31935	31847	33970	97752
5	40979	41012	43336	125327
6	50474	50345	50409	151228
7	39277	39664	39470	118411
8	21124	20944	21034	63102
9	30536	30368	30452	91356
10	39869	39784	39827	119480
11	49155	48976	49065	147196
12	57390	57532	57461	172383
13	40795	40372	40582	121749
14	22394	22188	22291	66873
15	28847	28688	28767	86302
16	34865	34715	34790	104370
17	33861	33773	33817	101451
18	40169	40053	40111	120333
19	47413	47147	47280	141840
20	56684	56644	56664	169992
21	64121	64397	64259	192777
22	30750	30664	30707	92121
23	39975	39978	39976	119929
24	49346	49255	49300	147901
25	34386	34324	34355	103065
26	43859	43789	43824	131472
27	53320	53360	53300	159980
moyenne	41885,04	41814,93	42245,37	41981,78