

## **Projet TDI RETE-GNL**

Technologies et dimensionnement des installations pour le RÉSEAU de distribution primaire de GNL dans les ports de la zone transfrontalière

### **Produit T2.4.2 “Base de données sur les accidents et les risques”<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Il est à noter que le BD sous-jacent au rapport T2.4.2 "Base de données sur les accidents et risques" a été créé par la société Enterprise Shipping Agency Srl qui avec D.D. n.356 / 2020 du 11/06/2020 s'est vu attribuer un «Service de conseil pour le développement des activités d'analyse économique et financière liées à la préparation des solutions technico-productives les plus adaptées au soutage de GNL dans le port et évaluation de l'impact environnemental dérivant des différents types de configurations de soutage », CIG ZB42CC3908 - CUP F21G17000020006 - Réf. Prof. Paolo Fadda, financé sur fonds FEDER dans le cadre du deuxième avis du programme Interreg Italia Francia Marittimo 2014-2020, à travers le visée à l'art. 36, paragraphe 2 lettre. a) Décret législatif 50/2016 par RdI sur Sardegna C.A.T. Pour l'attribution précise des parties par rapport à la formulation finale du rapport, veuillez-vous référer au premier chapitre de ce document.

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 “Base de données sur les accidents et les risques”  
Contribution du partenaire du projet

1

## Sommaire

1.	OBJET DU DOCUMENT ET CADRE DE L'ACTIVITÉ T2.4 ET DU PRODUIT T2.4.2 DU PROJET TDI RETE-GNL. ....	4
2.	LA CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE RISQUES ET DANGERS.....	6
2.1.	<b>Dangers associés au produit</b> .....	6
2.1.1.	<i>Plage d'inflammabilité</i> .....	9
2.1.2.	<i>Sensibilité à l'allumage</i> .....	10
2.1.3.	<i>Énergie libérée et taux de combustion</i> .....	12
2.2.	<b>Risques liés aux processus</b> .....	13
2.2.1.	<i>Risques liés aux transferts</i> .....	13
2.2.2.	<i>Dangers liés au stockage sous pression</i> .....	14
2.2.3.	<i>Dangers liés au stockage non pressurisé</i> .....	14
2.3.	<b>Risques environnementaux</b> .....	15
2.3.1.	<i>Risques dus aux conditions naturelles</i> .....	15
2.3.2.	<i>Risques liés aux activités humaines</i> .....	16
3.	LA CLASSIFICATION DES RISQUES ADOPTÉE DANS LA BASE DE DONNÉES ET D'AUTRES PROFILS MÉTHODOLOGIQUES. ....	17
4.	RÉSUMÉ DES PRINCIPAUX RÉSULTATS.....	25
5.	UN EXEMPLE D'APPLICATION DE L'ANALYSE DES RISQUES : LE CAS FRANÇAIS .....	32
5.1.	Aspects introductifs .....	32
5.2.	Gravité des phénomènes dangereux .....	34
5.2.1.	<i>Hypothèses et méthode de calcul</i> .....	34
5.2.2.	<i>Distances d'effet</i> .....	37
5.3.	Fréquence des événements dangereux .....	45
5.3.1.	<i>Approche, hypothèses et références</i> .....	45
5.3.2.	<i>Fréquence des événements dangereux</i> .....	49
5.4.	Résumé des risques .....	57
	ANNEXE 1 .....	62

## Index des tableaux

Tableau 1: Compositions typiques du GNL en fonction de l'origine .....	7
Tableau 2: Propriétés physiques du GNL par origine .....	8
Tableau 3: Plage d'inflammabilité du GNL .....	9
Tableau 4: Energie de combustion du GNL selon son origine .....	12
Tableau 5: Niveaux d'effet critique basés sur les expositions dangereuses .....	33
Tableau 6: Distances dues à la suppression de chaque centre du volume explosif.....	36
Tableau 7: Distances des effets pour BLEVE.....	38
Tableau 8: Distance d'effet thermique associée à la VCE.....	39
Tableau 9: Distances d'effet associées aux jets de feu .....	43
Tableau 10: Bases de données .....	47
Tableau 11: Fréquences de fuite génériques sur les conduites.....	48
Tableau 12: Fréquences de fuite génériques sur les bras et les tuyaux flexibles .....	48
Tableau 13: Probabilité d'allumage.....	49
Tableau 14: Fréquence des phénomènes dangereux .....	50
Tableau 15: Les risques associés à chaque cas .....	58

## Index des figures

Figure 1: Composition du gaz naturel.....	7
Figure 2: Plage d'inflammabilité.....	9
Figure 3: Variation des limites d'inflammabilité à basse température .....	10
Figure 4: Énergie d'allumage minimale en fonction de la concentration.....	10
Figure 5: Énergie minimale d'allumage en fonction de la température.....	11
Figure 6: Énergie provenant de différentes sources d'inflammation.....	12
Figure 7: Catégorisation des risques/incidents liés au GNL utilisé dans le produit T.2.4.1.....	19
Figure 8: Le phénomène de roll-over.....	20
Figure 9: Arbre des événements liés à la libération du GNL .....	23
Figure 10: Observations des accidents et des risques de 1944 à 2020 dans la gestion des ports de GNL .....	25
Figure 11: Répartition des incidents/risques dans la gestion du GNL dans l'environnement portuaire .....	26
Figure 12: Degré d'intensité de risque des risques/incidents dans la gestion du GNL.....	26
Figure 13: Corrélation entre la classe de risque et le type de risques chimiques .....	27
Figure 14: Nombre d'échantillons de risques chimiques dans la gestion du GNL dans la zone portuaire .....	27
Figure 15: Phases opérationnelles Risque/accident GNL .....	28
Figure 16: Causes de risque / accident dans la gestion du GNL dans la zone portuaire .....	28
Figure 17: Classification des implications/conséquences des risques/incidents dans la gestion du GNL .....	29
Figure 18: Degré de gravité des implications/conséquences des risques/incidents liés à la gestion du GNL.....	29
Figure 19: Les victimes d'accidents/risques dans la gestion du GNL.....	30
Figure 20: Blessés par des accidents/risques dans la gestion du GNL.....	30
Figure 21: Dommages dus aux accidents/risques dans la gestion du GNL.....	30
Figure 22: Cas de déversements de GNL .....	31
Figure 23: Pays impliqués dans des risques/accidents causés par la gestion du GNL .....	31
Figure 24: Matrice dite "MMR" utilisée en France pour évaluer la criticité des risques d'une ICPE dans son environnement. ....	32
Figure 25: Approche générale du nœud papillon pour déterminer les fréquences de dispersion.....	46
Figure 26: Approche appliquée dans le cadre de l'étude.....	46

## **1. OBJET DU DOCUMENT ET CADRE DE L'ACTIVITÉ T2.4 ET DU PRODUIT T2.4.2 DU PROJET TDI RETE-GNL.**

L'objectif de ce document est d'arriver à la définition d'une base de données des accidents et des risques afin de classer les différents types d'événements survenant dans les installations de GNL dans l'environnement marin et portuaire. Le rapport fait partie du projet Interreg Italie-France Maritime 2014-2020 "Technologies et dimensionnement des installations de distribution primaire de GNL dans les ports de la zone transfrontalière" (TDI RETE-GNL) qui a parmi ses objectifs d'identifier des solutions technologiquement productives pour la distribution et le soutage de GNL dans les ports de la zone transfrontalière, basées sur des normes et des procédures opérationnelles communes.

Dans le cadre de la composante du projet T2 "Etude pour un plan d'action commun pour le GNL dans la zone portuaire", l'activité T2.4, qui est consacrée à l'identification des lignes directrices pour l'évaluation des externalités et de l'impact environnemental, est prévue sous forme de formulaire. En fait, cette activité prévoit une évaluation de l'impact environnemental résultant des différents types de configurations de soutage, l'évaluation des principaux risques et l'évaluation des externalités positives/négatives potentielles des investissements prévus dans le cadre d'un plan d'action conjoint pour le déploiement d'installations d'approvisionnement et de stockage de GNL dans les ports inclus dans le projet. Quatre produits sont prévus dans le cadre de l'activité mentionnée ci-dessus :

- T2.4.1 "Rapport sur la classification et l'examen des risques des installations de GNL dans l'environnement portuaire" ;
- T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques" ;
- T2.4.3 "Lignes directrices sur la méthodologie de l'ACV dans les systèmes d'évaluation des impacts environnementaux" ;
- T2.4.4 "Meilleures pratiques pour réduire les risques et les impacts du GNL".

Plus précisément, cette contribution représente le produit T2.4.2 qui vise à cartographier les principaux événements à risque et/ou accidents réels survenus au cours de l'histoire en rapport avec la gestion des infrastructures de GNL ou des véhicules fonctionnant au GNL, dans le but d'accroître le niveau de connaissance des risques possibles associés à ce type de technologie. Les activités de recherche susmentionnées permettent notamment d'apprécier les différences qui existent en ce qui concerne la manutention d'autres marchandises dangereuses, telles que le GPL, et de promouvoir une plus grande sensibilisation sociale de la part de la communauté et des groupes d'intérêt en ce qui concerne la problématique en question et les propriétés physiques et chimiques du GNL dans l'environnement portuaire maritime.

Les partenaires du projet ont contribué à la préparation du rapport final en question de la manière indiquée ci-dessous, conformément aux dispositions du formulaire :

- P1 / CF (UNIGE-CIELI) : coordination des activités des partenaires et de leurs consultants ; définition du modèle conceptuel, de la structure et du contenu de la BD sous-jacent au produit T2.4.2 ; préparation de la version finale intégrée du produit T2.4.2 à partir des documents indiqués ci-dessous ; préparation de la fiche récapitulative du produit T2.4.2 ;
- P3 (UNIQUE) : Assistance au P1/CF pour la définition du modèle conceptuel, de la structure et du contenu de la base de données sous-jacente au produit T2.4.2 ; Réalisation de la "Base de données des

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
Contribution du partenaire du projet

- incidents et des risques" et réalisation des chapitres 1, 3 et 4 du présent document final, par l'attribution d'un contrat spécifique à Enterprise Shipping Agency Srl avec le D.D. n.356/2020 du 11/06/2020 ; Validation du produit final T2.4.2.
- P2 (UNIFI) : Validation du produit final T2.4.2 ; Validation de la fiche récapitulative du produit final T2.4.2.
  - P4 (OTC) : validation du produit final T2.4.2 ; validation de la fiche récapitulative du produit final T2.4.2.
  - P5 (CCIVAR) : Mise en œuvre des chapitres 2 et 5 avec l'appui du consultant TechnipFMC ; Validation du produit final T2.4.2 ; Validation de la fiche de synthèse du produit final T2.4.2. Pour être complète, l'annexe 1 produite par le consultant externe de CCIVAR, TechnipFMC, est jointe au produit T2.4.2.

La préparation et la production des versions finales du produit T2.4.2 et de la fiche de synthèse du même produit ont également bénéficié d'une série d'autres documents et rapports préparés par les partenaires et leurs consultants.

## **2. LA CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE RISQUES ET DANGERS**

Comme on le sait, au niveau universitaire et dans la pratique, il existe de nombreuses approches conceptuelles possibles pour la classification des risques liés à l'utilisation du GNL. Dans le cadre des activités T.2.4. et pour les besoins de ce produit T2.4.2., la classification utilisée par la Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI) du VAR est d'abord proposée, puis, en complément, la taxonomie développée dans le cadre du projet TDI RETE-GNL déjà en relation avec le produit T2.4.1, telle que formulée par la CF UNIGE-CIELI, avec l'appui du consultant externe TECNOCREO Srl et telle que validée par la suite par le partenaire P5 CCIVAR et les autres partenaires du projet.

En particulier, à partir du contenu du chapitre 4 du document produit par le consultant TechinFMC pour le partenaire CCIVAR et remis le 05/03/2020, la classification des risques et dangers associés au GNL est décrite plus en détail ci-dessous :

- a) Dangers liés aux caractéristiques physico-chimiques du produit
- b) Risques opérationnels
- c) Risques environnementaux

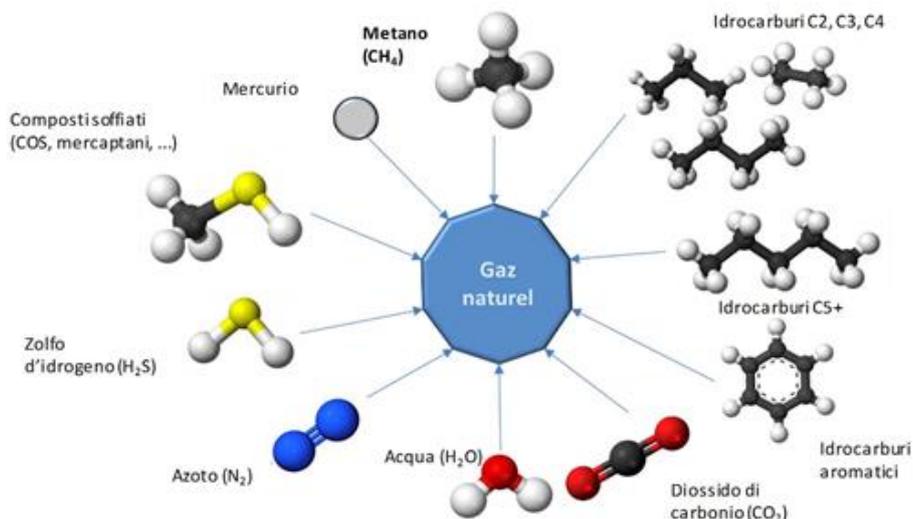
Le chapitre 3, d'autre part, fait référence à la classification détaillée des risques du GNL dans l'environnement maritime portuaire développée dans le cadre du projet et utilisée pour la construction de la base de données des risques du produit T.2.4.2. du projet lui-même.

### **2.1. Dangers associés au produit**

Comme on le sait, le gaz naturel est inodore, non corrosif et généralement non toxique par inhalation. Le GNL, en revanche, est l'état liquéfié du gaz naturel et ne peut exister qu'à la pression atmosphérique et s'il est maintenu en dessous de son point d'ébullition (environ -160°C). Les propriétés du GNL varient en fonction de sa composition, mais elles restent relativement proches de celles du méthane, qui est le composant majoritaire des différents types de gaz naturel.

Le GNL est un mélange de différents composés (voir Figure 1), dont la proportion varie en fonction des caractéristiques du réservoir de gaz naturel d'origine.

Figure 1: Composition du gaz naturel



Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Avant la liquéfaction, le gaz naturel est traité de telle sorte que les proportions des différents composants peuvent être modifiées.

À cette fin, l'eau est extraite pour empêcher le gel pendant la liquéfaction, tandis que le dioxyde de carbone est extrait pour empêcher le gel et la corrosion et pour augmenter la capacité de chauffage du gaz naturel. En outre, les composés du soufre sont extraits pour éviter les problèmes de corrosion et réduire la toxicité à des niveaux négligeables, l'azote est extrait pour augmenter la capacité de chauffage du gaz naturel et le mercure est extrait car il peut endommager certains équipements.

Le Tableau 1 présente des compositions typiques qui ne contiennent que les principaux constituants en fonction de l'origine du gaz naturel.

Tableau 1: Compositions typiques du GNL en fonction de l'origine

Componenti	Percentuale in volume secondo l'origine			
	Trinidad e Tobago	Algeria	Nigeria	Oman
Metano	96.9	87.93	91.692	87.876
Etano	2.7	7.73	4.605	7.515
Propano	0.3	2.51	2.402	3.006
Butano	0.1	1.22	1.301	1.603
C5+	-	0.61	-	-
Totale	100	100	100	100

Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

A titre indicatif uniquement, il est possible de distinguer le GNL :

- Léger, s'il a une composition avec environ 97% (vol.) de méthane
- Lourd, s'il a une composition avec environ 88% (vol.) de méthane

En analysant les propriétés physiques du GNL, Tableau 2 compare certaines des propriétés de différents GNL avec celles du méthane pur

Tableau 2: Propriétés physiques du GNL par origine

	Metano	GNL (Trinidad e Tobago)	GNL (Algeria)	GNL (Nigeria)	GNL (Oman)
Massa molare (g/mol)	16.043	16.55	18.77	17.91	18.615
Temperatura di ebollizione a pressione atmosferica (°C)	-161.5	-161.05	-159.9	-160.4	-159.9
Densità del liquido a temperatura di ebollizione (kg/m <sup>3</sup> )	422.5	430.9	452.9	452.8	463.6
Densità di vapore a temperatura di ebollizione (kg/m <sup>3</sup> )	1.81	1.799	1.783	1.776	1.763
Densità di vapore a 20°C	0.6685	0.6894	0.7829	0.7459	0.7751

Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Les propriétés physiques du GNL par origine prennent une importance supplémentaire du fait que la norme ISO 20765-2 : 2015 permet le calcul des propriétés thermodynamiques en fonction de la composition du gaz naturel, si nécessaire.

De l'analyse des données rapportées, certaines considérations pertinentes émergent en référence aux implications potentielles en termes de risques et dangers associés à la manipulation du GNL, à savoir :

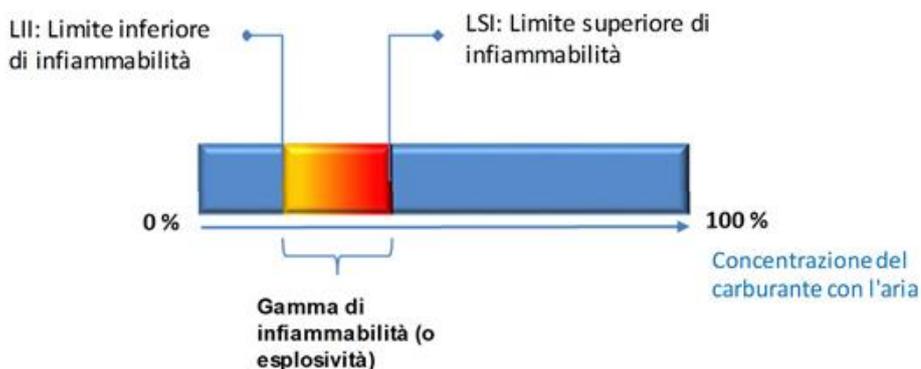
- les propriétés physiques restent sensiblement comparables à celles du méthane (avec des différences inférieures à 20%) ;
- la basse température d'ébullition (~ -160 °C) classe le GNL comme fluide «cryogénique» s'il est stocké à pression atmosphérique ;
- Les vapeurs de GNL à température ambiante sont plus légères que l'air ;
- à température d'ébullition, les vapeurs de GNL sont plus lourdes que l'air ; il est important de prendre en compte que ce facteur a une influence sur le mélange du produit avec l'air en cas de perte de confinement (voir ci-dessous)

En plus des propriétés physiques énumérées ci-dessus, le GNL se caractérise également par son inflammabilité. Cette caractéristique peut manifester des phénomènes dangereux, c'est pourquoi il est nécessaire de se concentrer sur certaines propriétés liées à la combustibilité du GNL.

### 2.1.1. Plage d'inflammabilité

Le gaz naturel ou les vapeurs de GNL sont des gaz inflammables en raison de leurs principaux constituants. Toutefois, un mélange de ces gaz avec l'oxygène de l'air n'est susceptible de s'enflammer que si la concentration de gaz naturel se situe dans la plage d'inflammabilité indiquée à la Figure 2.

Figure 2: Plage d'inflammabilité



Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

En détail, la plage d'inflammabilité d'un gaz naturel ou d'un GNL dépend de sa composition, mais reste relativement proche de celle du méthane, comme le montre Tableau 3.

Tableau 3: Plage d'inflammabilité du GNL

	Metano	GNL “leggero”	GNL “pesante”
<b>Campo di infiammabilità</b>	5% - 15% (in volume)	4,9% - 14,9% (in volume)	4,4% - 14,4% (in volume)

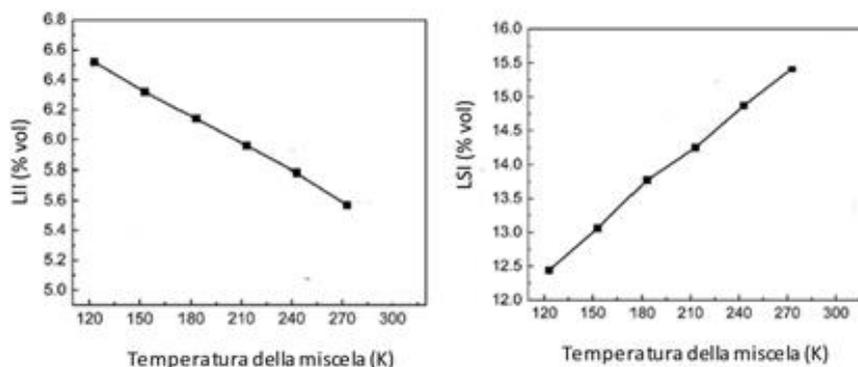
Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Dans la plage d'inflammabilité, il existe ce qu'on appelle la concentration stoechiométrique, c'est-à-dire la proportion optimale en cas d'inflammation : dans ce cas, tout le carburant sera brûlé, sans excès ni défaut d'air ; en d'autres termes, la réaction de la totalité de l'air initialement contenu dans le mélange aura lieu.

C'est généralement à cette concentration que les effets de la combustion accidentelle sont les plus dangereux. Pour le méthane, la concentration stoechiométrique est de 9,5% (en volume).

Toutefois, il convient de souligner que les valeurs indiquées dans le Tableau 3 correspondent aux plages d'inflammabilité dans les conditions ambiantes ; cette plage d'inflammabilité dépend en fait des conditions de pression et de température : les variations typiques de la pression et de la température ambiantes ne sont pas suffisantes pour modifier sensiblement la plage d'inflammabilité. Cependant, en cas de perte de GNL, la température du mélange gaz naturel (provenant de la vaporisation du GNL) / air peut être beaucoup plus basse que la température ambiante. Les changements des limites d'inflammabilité à basse température sont indiqués dans la Figure 3.

Figure 3: Variation des limites d'inflammabilité à basse température



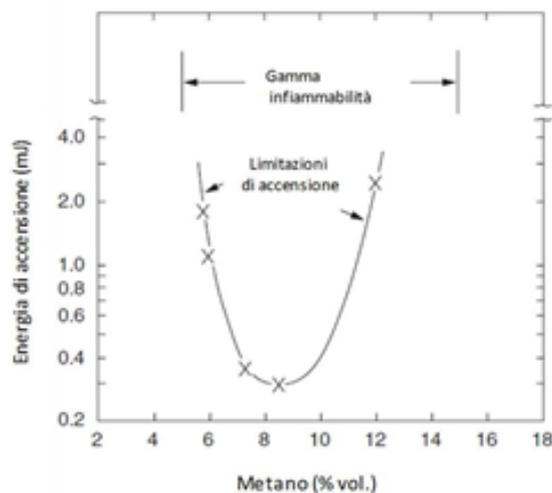
Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Les données montrent que lorsque la température du mélange méthane/air diminue, la limite inférieure augmente et la limite supérieure diminue par rapport à la plage d'inflammabilité. En d'autres termes, plus la température du mélange est basse, plus la plage d'inflammabilité est faible. Ainsi, à 120 K (ou -153°C), la plage d'inflammabilité du méthane est réduite entre 6,5% et 12,5% (vol.).

### 2.1.2. Sensibilité à l'allumage

Les données indiquées à la figure 4 font référence aux spécificités du méthane, mais peuvent également être appliquées comme première approche d'évaluation du gaz naturel. L'énergie nécessaire pour enflammer un nuage de méthane / air dépend de la concentration de méthane dans le mélange.

Figure 4: Énergie d'allumage minimale en fonction de la concentration

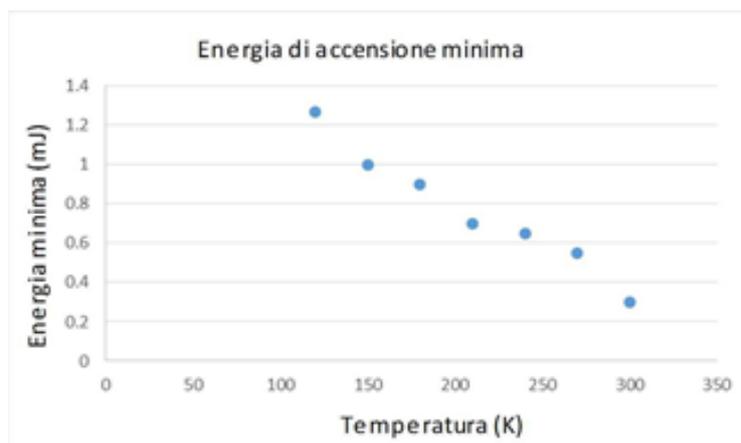


Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Plus la concentration de méthane est proche de la concentration stoechiométrique (de l'ordre de 0,3 mJ), plus l'énergie nécessaire à l'allumage est faible ; cette énergie minimale peut également varier en fonction de la température.

La Figure 5 montre donc que plus la température du mélange est basse, plus l'énergie nécessaire pour l'enflammer est importante.

Figure 5: Énergie minimale d'allumage en fonction de la température



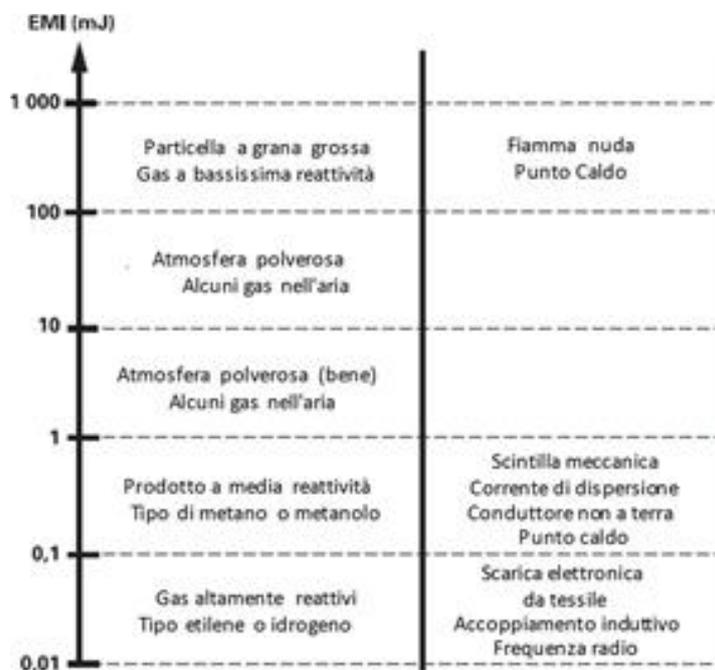
Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

Il est nécessaire de préciser qu'au-delà des valeurs mentionnées ci-dessus, le méthane n'est pas considéré comme le gaz le plus sensible à l'inflammation ; les gaz tels que l'éthylène ou l'hydrogène sont beaucoup plus sensibles, c'est pourquoi la réactivité du méthane est classée comme «moyenne» selon la figure suivante. Dans le Manuel de référence Bevi Risk Assessments (RIVM, 2009), le méthane est classé avec un niveau «faible» en termes d'inflammabilité.

En pratique, ce dernier est relativement facile à allumer, puisque les intensités d'énergie d'allumage mentionnées sont en fait des sources telles que des étincelles mécaniques, des courants parasites ou des points chauds.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Lorsqu'un mélange inflammable est chauffé à une certaine température, il n'a plus besoin d'une source d'inflammation pour démarrer la combustion. Cette température dite d'auto-inflammation est de 535 ° C pour un mélange méthane / air stoechiométrique. Ces conditions ne sont pas probables dans les structures étudiées, sauf dans le cas d'une situation qui ne l'est pas et qui est déjà accidentelle.

Figure 6: *Énergie provenant de différentes sources d'inflammation*



Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

### 2.1.3. *Énergie libérée et taux de combustion*

En ce qui concerne les situations d'accident, outre les limites d'explosivité (synonyme d'inflammabilité dans ce contexte), deux propriétés sont importantes : la quantité d'énergie libérée par la combustion et la vitesse à laquelle cette énergie est libérée.

Tableau 4: *Energie de combustion du GNL selon son origine*

	<b>Metano</b>	<b>GNL “leggero”</b>	<b>GNL “pesante”</b>
<b>Energia di combustione (MJ/kg)</b>	50.04	49.86	49.2

Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

L'énergie de combustion du GNL est fixée globalement par la teneur en méthane. La différence en termes d'énergie n'est pas significative du point de vue des phénomènes accidentels. Le taux de combustion du méthane reflète sa réactivité lorsqu'il est allumé et a donc une influence si les conditions d'une explosion sont réunies. Le taux de combustion laminaire du méthane avec l'air est d'environ 0,45 m/s ; en comparaison, le propane a un taux laminaire de 0,52 m/s et l'hydrogène de 1,2 m/s.

En ce qui concerne le dangereux phénomène d'explosion, le méthane est considéré comme un gaz de "faible" réactivité. Dans le détail et à titre d'exemple, on peut considérer que, toutes choses égales par ailleurs, elle donnera une surpression inférieure d'environ 40% à celle d'une explosion similaire de propane.

## 2.2. Risques liés aux processus

Sans entrer dans les détails de toutes les opérations qui ont lieu lors du soutage et du stockage du GNL dans l'environnement maritime portuaire, les processus auxquels il est fait référence dans le cadre du projet consistent principalement en des opérations de transfert ou de stockage du combustible rappelé.

Les principaux dangers liés aux opérations de transfert sont d'abord examinés, tandis que ceux liés aux différents types de stockage (pressurisé ou non) sont analysés. Le rapport préparé par le partenaire P5, dont le contenu est rapporté ici, ne prévoit pas l'étude des dangers liés aux fuites de soupapes (défectueuses), aux fuites entre deux équipements, etc., bien qu'ils soient réels, comme le souligne le produit T2.4.1. du projet TDI RETE-GNL.

Le GNL, comme tous les gaz liquéfiés, ne doit pas être contenu dans une section de pipeline qui peut être complètement fermée et exposée à la chaleur ambiante, sinon la pression augmentera jusqu'à ce que la section elle-même se rompe. Comme pour les fuites, ce point - bien qu'important - n'a pas été développé davantage dans le document mentionné à plusieurs reprises.

### 2.2.1. Risques liés aux transferts

En général, les transferts de GNL entre l'unité d'approvisionnement et l'unité de réception comportent le risque de surcharger cette dernière. Le surremplissage peut conduire à plusieurs scénarios :

- une fuite de liquide dans les conduites dédiées à la phase de retour des vapeurs lorsque les vapeurs des deux unités (alimentation et réception) sont connectées ; ce type d'événement peut être sans conséquence
- le liquide déborde par les vannes si les phases vapeur n'ont pas été raccordées et qu'il y a donc un risque d'incendie ou de VCE
- le cas extrême implique une détérioration de l'unité de réception qui peut également entraîner sa défaillance ; les dangers sont donc ceux indiqués dans les paragraphes suivants, en fonction de la nature du stockage.

La particularité des débordements est que les rejets accidentels sont alors soulevés et dirigés verticalement par les vannes ou les événements.

Deuxièmement, de nombreuses opérations de transfert impliquent au moins une unité mobile (camion-citerne, navire ravitailleur, etc.) : avec ce type de configuration, il existe donc un risque important de rupture du bras de transfert ou du tuyau en raison du mouvement incontrôlé d'une unité mobile, comme dans le cas des transferts impliquant des navires. En conséquence, si le bras ou le tuyau se casse, le GNL accidentellement libéré peut tomber dans l'eau et une CVE peut être observée après que le mélange vapeur/air ait été enflammé et qu'une flaque d'eau ait pris feu. Toutefois, un autre danger, décrit ci-dessous, doit être pris en compte à l'avance dans ce type de situation. En effet, le GNL est généralement à une température de  $-160^{\circ}\text{C}$  ; par conséquent, lorsqu'il entre en contact avec de l'eau à température ambiante, il subit un transfert de chaleur intense qui peut provoquer une vaporisation "soudaine" du GNL. Le changement de phase et l'expansion ultérieure des vapeurs dans l'atmosphère peuvent alors repousser l'air avec une force suffisante pour générer des ondes de pression (ou chocs) et ainsi ressembler à une explosion. Ce phénomène est souvent appelé RPT (Rapid Phase Transition).

### ***2.2.2. Dangers liés au stockage sous pression***

Les conditions de pression et de température en cas de stockage sous pression sont :

- peu de bars relatifs, généralement 3 (mais des pressions de 8 à 11 bars sont possibles) ;
- la température correspondant aux conditions d'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire environ -140 °C pour la pression relative mentionnée ci-dessus

Le stockage sous pression - mais aussi les transferts via une pompe, un pulvérisateur et d'autres appareils de chauffage, dans un stockage fixe ou dans un réservoir, etc. - comporte divers dangers :

- en cas de perte "soudaine" du confinement, une masse potentiellement importante de gaz initialement sous pression aura tendance à occuper un volume beaucoup plus important dans l'atmosphère ; cette expansion volumétrique se produit en "repoussant" l'air et s'accompagne d'ondes de choc qui peuvent elles-mêmes provoquer des dommages ; ce type de phénomène est parfois appelé "explosion pneumatique".
- dans le cas du GNL, l'expansion de volume mentionnée ci-dessus peut concerner la phase vapeur (gaz) mais aussi la phase liquide (liquéfiée) ; dans le cas de cette dernière, l'expansion de volume est encore plus importante et le phénomène connexe est appelé BLEVE ;
- dans le cas d'une perte de confinement moins brutale, limitée à une canalisation ou à une fraction de section de sortie dans une conduite sous pression, le GNL déchargé sera animé d'un mouvement considérable ; le flux observé sera un jet et ce type de flux a une influence sur la masse explosive (avec l'air), la distance comptée depuis le point où un mélange est explosif, etc.

En cas d'inflammation concomitante ou consécutive à une perte de confinement, il convient d'envisager les effets thermiques liés à une boule de feu (dans le cas du BLEVE), à un jet de feu et, éventuellement, à un feu de flaque.

Si l'on observe une inflammation après mélange avec l'air et formation d'un volume explosif, les flammes se propagent dans l'air lui-même avec des effets thermiques conséquents, mais aussi, selon la vitesse des flammes, des effets de pression. Ce dernier cas, appelé VCE, implique des effets de pression dus à l'expansion de volume associée au passage d'un mélange de méthane et d'air (à température ambiante ou inférieure) à un mélange de gaz d'échappement beaucoup plus chaud.

### ***2.2.3. Dangers liés au stockage non pressurisé***

Les conditions de pression-température pour ce type de stockage sont :

- une pression proche de la pression atmosphérique et limitée à 0,1 ~ 0,15 bar (relatif)
- la température correspondant aux conditions d'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire proche de -160°C.

Les conditions dites de processus ou de stockage cryogénique (avec températures autour de - 160°C) comportent divers dangers ou risques. Tout d'abord, il convient de mentionner les problèmes qui peuvent se poser en ce qui concerne les transferts de chaleur "intenses" qui peuvent se produire entre le GNL, très froid, et les matériaux à température ambiante, y compris les métaux, en cas de contact accidentel.

Ces transferts de chaleur peuvent être observés en cas de perte de confinement et de flux incontrôlé de GNL dans une cuve contenant un autre produit dangereux, ou dans un élément important tel que la coque d'un navire.

Ces transferts peuvent être observés, même sans fuite préalable, lorsque le GNL est soudainement dirigé (et à des débits élevés) dans un gazoduc de GNL, initialement à température ambiante ; ce type de situation favorise l'affaiblissement du métal du gazoduc et donc la fuite.

Comme mentionné ci-dessus, lorsque les transferts de chaleur sont favorisés par une grande surface de contact - par exemple lorsque du GNL (froid) est mélangé à de l'eau (à température ambiante) - il y a alors un risque de RPT et d'effets de pression conséquents.

En outre, les installations de stockage cryogénique de GNL peuvent être le lieu d'un phénomène dangereux connu sous le nom de Roll-Over.

Tous les phénomènes mentionnés ci-dessus sont fonctionnels pour mieux comprendre quels peuvent être les déterminants capables de déterminer des accidents spécifiques en relation avec la réalisation d'activités de soutage et/ou de stockage de GNL dans l'environnement maritime et portuaire ; en outre, ils sont remarquables parce qu'ils sont spécifiques au processus dans des conditions cryogéniques (comme les RPT) mais ne peuvent être dimensionnés par rapport aux phénomènes des jets de feu, BLEVE ou VCE mentionnés ci-dessus. Enfin, ils concernent a priori des réservoirs plus grands que ceux qui sont examinés (pour le phénomène de Roll-Over). En outre, leur champ d'application directe est plus restreint que celui des incendies ou des VCE et ne sera donc pas examiné ultérieurement.

## **2.3. Risques environnementaux**

### ***2.3.1. Risques dus aux conditions naturelles***

En ce qui concerne les dangers dus à l'état des conditions naturelles, les profils les plus pertinents à prendre en compte sont ceux qui résultent de phénomènes naturels tels que :

- l'inondation ou la submersion ;
- la foudre ;
- tremblement de terre

D'autres éléments tels que les vents ou les températures extrêmes peuvent être inclus dans une analyse de risque, mais sont généralement pris en compte par les réglementations générales en matière de construction. Les inondations ou les tremblements de terre sont des phénomènes naturels qui peuvent causer des pertes importantes, et par conséquent des phénomènes dangereux (VCE et jets de feu) déjà mentionnés.

La foudre peut à la fois endommager les équipements et provoquer des fuites, mais elle peut aussi être une source d'inflammation. Ces éléments ne conduisent pas à des phénomènes dangereux liés au GNL, qui n'ont pas déjà été mentionnés.

Cependant, ces phénomènes doivent pouvoir être maîtrisés par d'éventuelles mesures spécifiques. Ainsi, pour la maîtrise des risques d'inondation, des mesures de soutien peuvent être prises :

- les forces verticales dues à la poussée d'Archimède dans le cas des réservoirs pressurisés
- les forces horizontales dues au courant, les blocages pour tous les réservoirs, etc.

De même, en France, les installations sont soumises à une "étude foudre" obligatoire.

En ce qui concerne les risques liés aux tremblements de terre, même en France, lorsque la capacité de stockage dépasse 50 t, les règles de dimensionnement sismique doivent être respectées. En substance, l'analyse des

risques doit déterminer si une défaillance d'équipement suite à un tremblement de terre conduit à un scénario avec des effets graves sur une zone d'"occupation humaine permanente". Ce scénario prévoit ensuite le dimensionnement des équipements (réservoirs, pipelines, etc.) pour un séisme dont les caractéristiques sont définies par la réglementation.

### ***2.3.2. Risques liés aux activités humaines***

Les activités généralement considérées sont le transport et la présence d'activités industrielles à proximité. Un événement accidentel lié à ce type d'environnement ne donne pas lieu à des phénomènes dangereux impliquant le GNL, qui n'ont pas déjà été mentionnés.

D'autre part, il est possible d'adopter des mesures de contrôle des risques afin de limiter les collisions liées au transport et, le cas échéant, le risque d'effets dits "domino", déclenchés par un accident dans des installations proches.

Dans la plupart des cas, c'est une question de choix de l'emplacement des installations.

### **3. LA CLASSIFICATION DES RISQUES ADOPTÉE DANS LA BASE DE DONNÉES ET D'AUTRES PROFILS MÉTHODOLOGIQUES.**

Afin de créer la base de données sur les accidents et les risques survenus dans les installations de GNL en milieu portuaire, comme prévu dans le formulaire du projet TDI RETE-GNL et comme indiqué dans l'appel d'offres attribué à l'agence maritime Enterprise (ESA), le groupe de travail de l'ESA, après coordination avec le directeur scientifique du client (Prof. Paolo Fadda) et le chef de file du projet (CF), c'est-à-dire l'UNIGE-CIELI, a d'abord défini le cadre conceptuel qui sous-tend la préparation de la base de données, puis a défini le cadre méthodologique à appliquer. Elle a notamment procédé, par une activité de " desk research " approfondie, à la définition du système de sources au niveau national et international à utiliser pour alimenter la BD en question.

La définition du cadre conceptuel a été partagée lors d'une réunion télématique spéciale en juillet 2020 avec le client et le projet CF.

L'activité de repérage des sources préparatoires à l'analyse des risques et des accidents dans les installations de GNL dans l'environnement portuaire a cependant mis en évidence dans un premier temps une collecte de données, rapportée dans le DB "Medicinademocraticalivorno"<sup>3</sup>, qui comprend les 57 observations enregistrées sur une période allant de 1950 à 2008.

Le groupe de travail, à partir de la BD "Medicinademocraticalivorno", a intégré la BD avec des nouvelles et des informations supplémentaires et mises à jour grâce à des recherches documentaires et à des contacts directs avec des sujets publics et privés ayant des connaissances et des compétences sur les sujets en question (capitaines de port, pompiers, protection civile, RINA).

Les différentes sources en ligne analysées pour la cartographie de la " BD risques et accidents " ont été:

- BD accident EU: eMars; <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>
- BD accident USA: PHMSA; <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/distribution-transmission-gathering-Ing-and-liquid-accident-and-incident-data>
- BD accident Japan: Japan Transport Safety Board; <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/distribution-transmission-gathering-Ing-and-liquid-accident-and-incident-data>
- Ostenda case study; <https://www.maritimebulletin.net/2020/06/29/car-carrier-and-Ing-tanker-reportedly-collided-off-ostend-belgium/>
- Russia case studies: <https://www.maritimebulletin.net/2018/11/27/Ing-tanker-breached-in-collision-russia/>
- UAE case studies: <https://www.maritimebulletin.net/2019/03/26/Ing-tanker-struck-vlcc-tanker-at-fujairah-heavy-damages-photos/>
- Nuova Guinea case studies: <https://www.maritime-executive.com/article/pirates-attack-Ing-carrier-in-gulf-of-guinea>
- Collision Al Oraiq case study; [https://www.kbz-crmb.be/wp\\_content/uploads/2016/11/Report-Collision-Flinterstar-Al-Oraiq-final.pdf](https://www.kbz-crmb.be/wp_content/uploads/2016/11/Report-Collision-Flinterstar-Al-Oraiq-final.pdf)

<sup>3</sup> Pour de plus amples informations, vous pouvez consulter la ressource web suivante : source <http://medicinademocraticalivorno.it/attachments/article/696/incidenti%20rigas%20cronologia.pdf>

L'analyse des sources susmentionnées et l'acquisition d'autres documents pertinents par les parties prenantes mentionnées ci-dessus ont conduit à la création de la "base de données sur les risques et les accidents", qui comprend 83 observations de 1944 à 2020.

Cette DB se compose des 17 observations suivantes, qui sont décrites en détail ci-dessous :

- ✓ **Date de l'événement (année)** : année au cours de laquelle le risque/accident s'est produit.
- ✓ **Macro Type d'événement (risque/accident)** : Type d'événement, classé soit comme un risque, si aucun dommage aux biens ou aux tiers n'est survenu, soit comme un accident, si des dommages aux biens ou aux tiers sont survenus.
- ✓ **Nation** : pays où le risque ou l'accident s'est produit.
- ✓ **Port / navire / terminal d'approvisionnement** : nom du port, du navire ou de l'infrastructure impliqué dans le risque/accident.
- ✓ **Lieu** : coordonnées géographiques, latitude et longitude, où l'accident s'est produit.
- ✓ **Navire GNL/Typologie de l'installation** : nom du navire ou de l'installation impliqué dans le risque/incident.
- ✓ **Type d'installation** : type de bien/infrastructure soumis au risque/accident (dépôt, navire, terminal, pipeline, usine de liquéfaction, usine d'exportation, laboratoire, navire, terminal).
- ✓ **Degré de risque/accident** : degré de risque de l'événement, faible-haut-moyen, dépendant principalement du type de risque/accident chimique survenu, mais aussi du nombre de victimes, de blessés et de l'ampleur des dégâts matériels.
- ✓ **Risque opérationnel/accident** : phase de production au cours de laquelle le risque survient (en mer, chargement/déchargement, terminal, stockage, amarrage, dans le port, dépôt de GNL, construction d'une infrastructure GNL).
- ✓ **Chemical risk/accident** : type de risque/accident chimique survenu ; 11 types de risque/accident chimique mis en évidence (voir par. 3).
- ✓ **Description de l'événement** : brève description de l'événement dans lequel les principaux faits sont traités, y compris le lieu, les causes, le risque chimique et opérationnel, les implications.
- ✓ **Causes** : cause du risque/accident (collision, erreur humaine, événement naturel, panne d'équipement (navire/terminal/dépôt), échouement).
- ✓ **Implications/conséquences** : gravité du risque/accident, classée sur une échelle de 1 à 5 selon qu'il s'agit d'un risque ou d'un accident et, dans ce dernier cas, selon qu'il y a eu ou non des dommages matériels, des blessures ou des pertes humaines.
- ✓ **Nombre de victimes** : nombre de personnes impliquées dans l'accident.
- ✓ **Nombre de blessés** : nombre de personnes blessées impliquées dans l'accident.
- ✓ **Dommages aux installations** : variable qui peut prendre une valeur "oui" ou "non" selon qu'il y a eu ou non des dommages matériels.
- ✓ **Rejet/déversement de GNL** : variable qui peut prendre une valeur "oui" ou "non" selon que le rejet ou le déversement de GNL s'est produit ou non.

En outre, avant de procéder à l'analyse des données collectées dans la BD, il convient tout d'abord de noter que la catégorisation des types de risques identifiés dans le projet TDI RETE-GNL (produit T.2.4.1 réalisé par le CF conjointement avec le prestataire de services externe "Tenocreo Srl") a été appliquée dans le cadre de la mise en œuvre de la BD en question. Afin de mieux comprendre le contenu de la BD, ce rapport final fournit

également une référence détaillée à la catégorisation susmentionnée des risques/accidents cartographiés, en mettant en évidence les profils "chimiques" de ceux-ci.

En particulier, la catégorisation ci-dessus comprend 11 types de risques, comme le montre la Figure 7.

Figure 7: Catégorisation des risques/incidents liés au GNL utilisé dans le produit T.2.4.1

Gas di evaporazione (boil-off gas)
Contatto
Stratificazione e rollover
Slushing
Transizione rapida di fase (RPT)
BLEVE
Esplosione nube di vapore (VCE)
Jet fire, pool fire e flash fire
Asfissia
Terrorismo
Terremoti

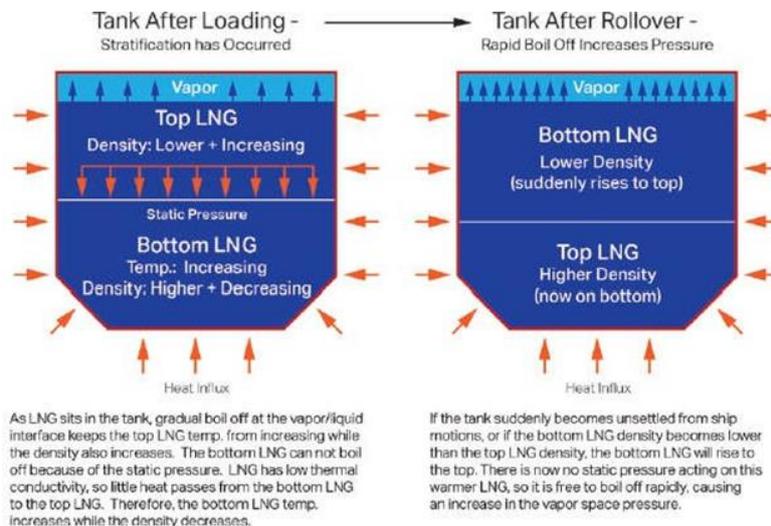
Source : nt. élaboration à partir des données TDI RETE\_GNL (Produit T.2.4.1)

- 1. Gaz d'évaporation (boil-off gas) :** Afin d'éviter les émissions de gaz naturel tant en cas d'urgence exceptionnelle que pendant le fonctionnement normal de l'installation et le transfert habituel du produit de la cuve au réservoir, il existe plusieurs solutions techniques : par exemple le système de récupération du Boil-Off-Gas (BOG). Comme on le sait, le gaz d'évaporation (BOG) est produit par l'évaporation du GNL en raison de la chaleur transmise de l'extérieur du réservoir au produit stocké à l'intérieur de celui-ci. Le BOG contient, en petites traces, les composants inflammables les plus lourds du mélange, c'est-à-dire ceux dont la température d'ébullition à la pression atmosphérique est beaucoup plus élevée que celle du méthane (-89°C pour l'éthane, -40°C pour le propane). En outre, comme déjà souligné dans le rapport T2.4.1 du projet TDI RETE-GNL, le BOG a une densité supérieure à celle de l'air pour des températures inférieures à -113°C en l'absence d'azote, ou à -85°C en présence de 20% d'azote. Le BOG à des températures inférieures à -113°C (ou -85°C en présence de 20% d'azote) se comporte donc comme un gaz lourd, ayant tendance à se stratifier vers le bas, tandis qu'à des températures supérieures à -113°C, il se comporte comme un gaz léger.
- 2. Contact avec le GNL :** Comme le GNL à la pression atmosphérique reste à l'état liquide jusqu'à environ -162°C, les installations d'utilisation de ce combustible sont dangereuses, notamment en cas de contact entre le combustible et les employés travaillant dans les zones de soutage ou d'autres opérateurs. Ce risque concerne également tout contact entre le GNL et des éléments tels que des marchandises transportées, des équipements non adaptés à la contiguïté susmentionnée ou, encore, des matériaux du navire ou d'autres instruments/équipements situés à proximité. En cas d'exposition et de contact entre le GNL et le personnel, des "brûlures de gel" peuvent se produire si le liquide entre en contact avec la peau, et de graves dommages aux poumons et à l'appareil respiratoire (suite à l'inhalation de vapeur à des températures extrêmement basses). En outre, comme indiqué dans le document T2.4.1 du TDI RETE-GNL T2.4.1, il convient de noter que le contact entre le GNL et la coque du navire, et d'autres matériaux, instruments ou composants qui ne sont pas adaptés aux

températures cryogéniques, peut entraîner des dommages/ruptures des biens rappelés. Il est évident que ce danger potentiel est limité exclusivement dans les limites de la structure, sans affecter les communautés locales voisines. En même temps, en ce qui concerne les risques liés aux instruments et aux équipements, il est essentiel de mettre en œuvre des systèmes de confinement des liquides, visant à séparer la cuve de l'environnement extérieur et donc des autres machines et équipements à proximité.

3. **Stratification et roll-over** : Le phénomène de "rollover" se produit fréquemment lors des opérations de remplissage d'un réservoir de stockage de GNL. Lorsque du GNL de densité différente est introduit dans le réservoir de stockage de GNL, le GNL de densité plus élevée aura tendance à se stratifier au fond. Cependant, le fond du réservoir commencera à augmenter sa température, ce qui entraînera une réduction de la densité, mais aussi une forte augmentation du taux d'évaporation, ce qui entraînera l'émission de quantités importantes de gaz. S'il n'y a pas de mélange ou de mouvement brusque à l'intérieur du réservoir, il y aura normalement une réduction de la pression hydrostatique exercée par le GNL de plus faible densité (placé à l'état supérieur) qui empêche l'évaporation du liquide en dessous. En présence d'une trop grande différence de densité, une altération de l'immobilité peut se produire avec un mélange conséquent des couches à différentes densités, ce qui entraîne un contact entre le GNL à pression de vapeur plus élevée et la zone au-dessus à pression plus basse. Comme le montre la Figure 8, le phénomène connu sous le nom de "rollover" peut entraîner une évaporation rapide du liquide, qui se traduit par une augmentation rapide de la pression à l'intérieur du réservoir. Dans ce contexte, les vannes de purge sont activées et une grande quantité de gaz naturel est libérée ; si ces opérations ne sont pas gérées de manière adéquate avec des composants, des systèmes et des procédures de sécurité appropriés, il existe des risques potentiels pour le personnel et les équipements environnants.

Figure 8: Le phénomène de roll-over



Source: Stavros, 2015 (Technological Guidance on LNG Bunker Vessels and Barges - American Bureau of Shipping)

Normalement, le phénomène de renversement affecte principalement les réservoirs à terre présents dans les terminaux de ravitaillement ; au contraire, pour les navires, la probabilité d'occurrence de ce

phénomène est plus faible en raison des multiples mouvements au cours de la navigation qui induisent un mélange continu, sauf dans le cas des unités stationnaires au port.

Outre l'absence de mélange de GNL pendant la phase de soutage, le rollover se produit plus fréquemment en présence de grands réservoirs à axe vertical fonctionnant à la pression atmosphérique. Comme le rollover implique la formation soudaine d'une grande quantité de vapeur, celle-ci doit être libérée par des systèmes de sécurité spéciaux tels que des soupapes de décharge à voûte ; si ces systèmes ne fonctionnent pas ou sont sous-dimensionnés, le phénomène peut entraîner la rupture de la cuve.

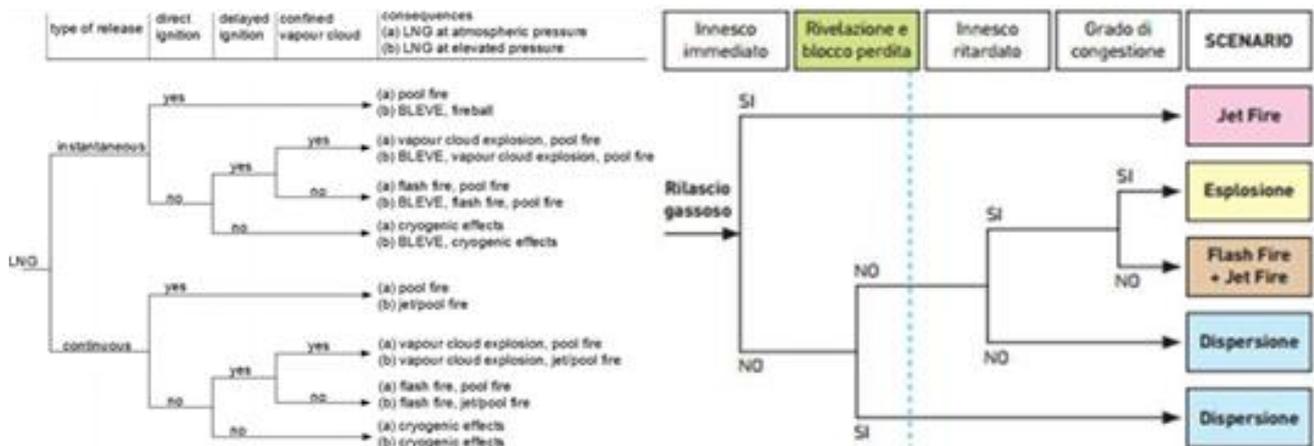
4. **Sloshing** : Le sloshing se produit lorsque les réservoirs de GNL des navires ne sont pas complètement remplis. Pendant la navigation, le carburant contenu dans les réservoirs est soumis à une forte pression sur la surface et les parois du réservoir, ce qui entraîne de graves dommages à la structure (Autorité maritime danoise, 2012). Des facteurs tels que la forme et la structure du réservoir affectent la façon dont les fluides dans le réservoir répondent au mouvement de l'unité pendant la navigation. Les événements dus à des conditions météorologiques maritimes défavorables peuvent également contribuer à des problèmes de manœuvre et de positionnement du navire, entraînant un sloshing. Le phénomène de sloshing a tendance à se produire dans le cas des petits réservoirs, car le mouvement a tendance à être plus important et, par conséquent, à avoir des impacts importants.
5. **Transition de phase rapide (Rapid Phase Transition)**: Le phénomène connu sous le nom de "transition de phase rapide" (ou Rapid Phase Transition - RPT), consiste en un changement de phase physique d'un liquide en vapeur : il se produit normalement lorsque deux liquides, de températures très différentes, entrent en contact, par exemple lorsqu'une grande quantité de GNL est versée dans l'eau (Uguccioni et al., 2006 ; Foss, 2006 ; Autorité maritime danoise, 2012 ; Vandebroek et Berghmans, 2012). Le GNL à plus basse température, une fois qu'il entre en contact avec l'eau, dont la température est beaucoup plus élevée, passe rapidement de l'état liquide à l'état gazeux (une véritable ébullition), produisant de la vapeur à une vitesse explosive (figure 4). Cette transition de phase rapide s'accompagne d'ondes de pression, comme dans le cas d'une explosion ; cependant, dans le cas de la RPT, il n'y a pas de combustion. Cette transformation est considérée comme une expansion mécanique qui entraîne la libération d'une grande quantité d'énergie : certaines études réalisées à cet égard ont montré que les effets de ce phénomène se limitent généralement à la zone où la fuite se produit. Bien que la combustion ne se produise pas, la probabilité du phénomène de transition de phase rapide est liée non seulement à la température et à la pénétration du GNL dans l'eau, mais aussi à la présence d'autres substances non méthaniques telles que l'éthane, le propane et le butane. En particulier, la RPT constitue un risque concret et significatif lors des opérations de soutage dans l'environnement maritime portuaire.
6. **Bleve (boiling liquid expanding vapour explosion)**: Un risque supplémentaire qui contribue à accroître les problèmes de sûreté et de sécurité liés aux opérations de soutage de GNL dans les ports est lié au phénomène connu sous le nom d'explosion de vapeur en expansion à partir d'un liquide bouillant (BLEVE). Le phénomène en question fait référence à l'explosion de vapeurs qui se dilatent en raison de l'ébullition d'un liquide, c'est-à-dire un type d'explosion qui se produit en conjonction

avec la rupture d'un récipient sous pression. Cela peut se produire en cas de fuite rapide, si une explosion de gaz à grande vitesse avec un mouvement turbulent est générée, mais aussi en cas d'impact à partir duquel des fragments sont formés. Évidemment, ce type d'explosion peut aussi être extrêmement dangereux en raison de l'onde de choc et de la projection des fragments du navire qui sont associés à l'explosion. Ce phénomène est souvent accompagné de l'éclatement de la partie du liquide encore présente dans le réservoir au moment de la rupture. Le "BLEVE" peut également être causé par la surchauffe d'un réservoir contenant un gaz liquéfié. En outre, ce phénomène est moins probable si le conteneur en question est protégé et isolé thermiquement.

7. **Explosion de nuage de vapeur (Vapor Cloud Explosion)** : Le terme explosion de nuage de vapeur (VCE) fait référence au phénomène par lequel une grande quantité de vapeur de GNL est enflammée dans un environnement confiné (ou presque confiné), provoquant une explosion (Vanderbroek et Berghmans, 2012). D'un point de vue pratique, lorsque le GNL commence à chauffer au contact de l'air (plus léger et à une température plus élevée que le GNL), il se mélange à l'air et commence à se disperser, créant une sorte de nuage de vapeur. Ce dernier est susceptible d'exploser si (en plus d'être équipé d'une concentration de GNL dans la plage d'inflammabilité) il entre en contact avec une source d'inflammation. Le phénomène a tendance à ne pas se produire dans les espaces ouverts, car la combustion se déroule si lentement que la vapeur a tendance à augmenter sa part en raison de la chaleur générée (les surpressions sont considérées comme négligeables).
8. **Jet fire, pool fire et flash fire**: En cas de rejet de GNL, le déclenchement immédiat du GNL entraîne un " jet fire " (également appelé " spray fire ") ou un " pool fire ", en fonction de la phase rejetée et de la fraction de liquide capable de s'accumuler sur le sol. Si ces événements ne se produisent pas, la dispersion du jet de gaz ou l'évaporation de la masse de matière inflammable crée un nuage inflammable capable de produire, en cas d'allumage retardé, un " flash fire " ; en outre, si un tel nuage atteint une zone confinée, une explosion est susceptible de se produire à la suite de l'allumage. Plus particulièrement, on parle de "jet fire" ou "spray fire" pour indiquer la formation d'un jet de feu à diffusion assez violente. Le phénomène est généré par l'allumage d'un mélange composé d'un agent de combustion et d'un carburant gazeux libéré en continu, au moyen d'une force importante, dans une ou plusieurs directions. Dans ce cas, le gaz est enflammé immédiatement après la perte de GNL. Au contraire, en cas d'allumage retardé, il se produit un phénomène de feu instantané qui, en revenant à son origine, pourrait conduire à un phénomène de jet fire (Vandebroek et Berghmans, 2012). Normalement, le jet fire provient d'une fuite de substances gazeuses inflammables résultant d'une perforation accidentelle de réservoirs ou de tuyaux sous pression. Le jet de GNL qui s'échappe dans l'atmosphère s'évapore et se dilate simultanément, se mélangeant à l'air avec lequel il entre en contact, ce qui génère des retombées de feu. Ce phénomène peut déterminer différents effets et conséquences en fonction des conditions spécifiques dans lesquelles le même phénomène se produit, notamment : la distance atteinte par le "jet" ; la quantité de carburant impliquée dans la combustion et la distance du trou du point d'allumage.  
À leur tour, les paramètres ci-dessus peuvent être influencés par d'autres conditions qui contribuent à aggraver ou non l'évolution, les implications et les effets de l'accident : parmi elles, la pression à l'intérieur du composant perforé, la taille du trou et la friction du gaz qui s'échappe, qui peut déclencher

l'allumage. Le phénomène de Jet Fire peut se produire avec une inflammation immédiate ou retardée, si un gros nuage inflammable se forme. Dans ce dernier cas (allumage retardé), une explosion peut se produire si le dégagement de gaz se produit dans un espace confiné ou encombré ou si un nuage d'une taille telle a été créé précédemment que le front de flamme s'accélère à une vitesse significative, capable de produire des phénomènes déflagrants comme déjà indiqué dans la documentation produit T2.4.1 du projet TDI RETE-GNL. La Figure 9 montre un exemple d'arbre d'événements lié au rejet de GNL dans une zone non confinée.

*Figure 9: Arbre des événements liés à la libération du GNL*



Source : Norme ISO\TS 18683, pour la figure de gauche ; Andreolli, Il perito Industriale, 2007 ("Preventing Jet Fire : discovering new solutions") pour la figure de droite.

Dans ce contexte, le liquide constituant la flaque en question commence à s'évaporer par mélange avec l'air ambiant et, si la concentration minimale pour la combustion est atteinte en présence d'une source d'inflammation, le gaz commence à brûler, générant ainsi de la chaleur ; évidemment, le rayonnement thermique diminue à mesure que la distance de la flaque d'où provient la vapeur augmente. Normalement, le phénomène d'incendie de piscine se produit dans le cas de rejets instantanés de grandes quantités de GNL ou en présence de rejets obstrués. Toutefois, dans l'environnement portuaire maritime, les risques d'incendie en nappe sont plus élevés en cas de perte de GNL à la suite, par exemple, d'un impact entre navires, car le contact brutal entre les deux coques métalliques contribue à générer des étincelles qui déclenchent la vapeur produite.

Le terme " flash fire " fait référence au phénomène de combustion " rapide " non explosive provenant de la formation d'un nuage de gaz dans un environnement où la concentration de GNL dépasse la limite inférieure d'inflammabilité (Vandebroek et al., 2012). Le méthane étant un gaz peu réactif, la possibilité de générer une onde de choc semble limitée aux cas de nuages confinés ou de forte congestion des installations.

Comme ils sont développés en plein air et caractérisés par une faible densité d'équipements et de tuyauteries, les terminaux GNL sont souvent l'objet de ce phénomène. En fait, avant de trouver une source d'inflammation, le nuage de gaz susmentionné parvient à s'étendre de manière significative dans l'espace entourant toutes les zones consacrées aux activités de soudage. Par conséquent, dès le début de la combustion, celle-ci se poursuit tant que la concentration est telle qu'elle le permet, jusqu'à ce

qu'elle retourne à la source de la fuite de gaz. Ce phénomène peut entraîner des risques élevés pour la sécurité du personnel impliqué dans les opérations, en particulier dans le cas où une piscine de stockage de GNL est située à la source de la fuite de GNL : ce contexte peut générer des accidents graves tels que des " jet fire " ou des " pool fire ", qui seront abordés dans les paragraphes suivants. Si le flash fire est fatal pour les sujets qui peuvent s'y trouver, le rayonnement global généré autour du flash fire est nettement inférieur aux phénomènes de pool ou de jet fire (à distances égales), ces derniers ayant une durée d'occurrence nettement plus longue (Woodward et Pitbaldo, 2010).

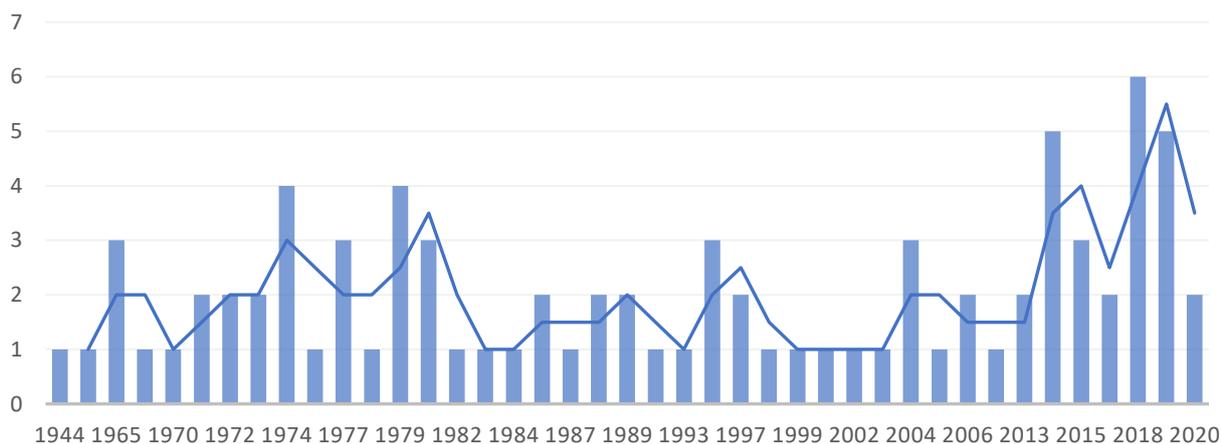
9. **Asphyxie** : Bien que le gaz naturel ne soit pas toxique ou cancérigène, il peut être étouffant car il contribue à diminuer le pourcentage d'oxygène dans l'air, le remplaçant directement (Autorité maritime danoise, 2012). Ce risque semble être plus élevé lorsque vous vous trouvez dans des espaces fermés, comme à l'intérieur de terminaux ou de réservoirs, ou en présence d'un dégagement important de gaz dans une zone ouverte mais à proximité de personnes, entraînant la mort par asphyxie dans le pire des cas. C'est précisément en raison de ce facteur de risque qu'il est devenu essentiel de garantir la présence de systèmes spéciaux et sophistiqués pour le contrôle continu de la concentration en oxygène, en particulier dans les environnements fermés, notamment parce que le GNL est inodore et incolore.
10. **Terrorisme** : parmi les nombreux risques associés au bon déroulement des opérations de soutage et de stockage du GNL, il y a de nombreux actes de violence ou de terrorisme à l'encontre des structures et des installations qui manipulent ce type de combustible, mais il convient de noter que les réservoirs au sol destinés au confinement du GNL, s'ils sont construits conformément aux règles et réglementations imposées, y compris pour des raisons de sécurité, nécessitent d'importantes quantités d'énergie pour leur altération. Par conséquent, la probabilité que le risque d'attentats terroristes se produise est liée au cas d'un incendie, par opposition à celui d'une explosion. D'un point de vue théorique, en revanche, l'impact d'un avion à proximité d'un terminal GNL provoquerait d'abord la combustion du carburant de l'avion et, seulement ensuite, l'inflammation des vapeurs de GNL, en raison de la chaleur développée. Afin de réduire les risques de dommages aux personnes, aux structures et aux équipements, il est essentiel de définir des distances de sécurité spécifiques et des procédures d'autorisation spécifiques pour l'accès aux zones les plus sensibles et les plus critiques. Les contre-mesures supplémentaires visant à prévenir les attaques terroristes ou d'autres actes violents comprennent des inspections, des patrouilles, des plans de sécurité en cas de violation de la sécurité et des systèmes de communication d'urgence.
11. **Tremblements de terre** : une évaluation correcte des risques associés à une installation de soutage et de stockage de GNL doit également tenir compte de la possibilité d'une activité sismique dans la zone où elle est située. Cette évaluation doit être effectuée de manière appropriée lors de la phase de conception au moyen d'études techniques spécifiques. Mais de ce point de vue également, il convient de noter qu'à ce jour, il n'y a pas eu d'accidents directement liés à l'activité sismique, même si, en 1995, un tremblement de terre de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter a eu lieu au Japon. Le tremblement de terre n'a pas causé de dommages structurels importants aux réservoirs de stockage de GNL des installations situées dans les zones touchées par le séisme.

#### 4. RÉSUMÉ DES PRINCIPAUX RÉSULTATS.

Après avoir défini le type de risques/accidents chimiques qui peuvent survenir dans les ports en raison d'une gestion incorrecte du GNL, et après avoir décrit de manière analytique les différents types de données collectées et organisées au sein de la BD, ce chapitre examine certains des principaux profils pertinents liés à l'examen des risques et accidents associés à la gestion des infrastructures de GNL et des moyens de transport qui utilisent cette solution pour la propulsion, afin d'acquérir une connaissance plus approfondie des affections casuelles qui se sont produites au fil du temps.

L'analyse de la répartition dans le temps des événements de risque/accident dans la gestion des ports de GNL permet de constater que, bien qu'il y ait eu une innovation technologique considérable ces dernières années, qui a considérablement augmenté le niveau de sûreté et de sécurité attribuable à la construction des installations, des équipements et des véhicules de GNL, le nombre de cas de risque et d'accident signalés dans la BD montre une augmentation partielle dans le temps, bien que le nombre de cas en question reste sensiblement réduit et bien en dessous des valeurs qui caractérisent tout autre type de combustible ((Figure 10).

Figure 10: Observations des accidents et des risques de 1944 à 2020 dans la gestion des ports de GNL



Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

Ceci est principalement dû à la forte croissance de ces dernières années de la production et du commerce de ce produit, 8 à 10% par an depuis 10 ans, ce qui rend plus probable le risque ou l'accident dans la gestion du GNL dans l'environnement portuaire maritime. En outre, le fait est dû à une augmentation du niveau de transparence et de divulgation des événements de ce type et à la visibilité accrue dans les médias en raison de l'intérêt accru pour ce phénomène tant au niveau scientifique que parmi les praticiens et le grand public.

De plus, l'analyse des données rapportées dans la BD présentant un intérêt particulier aboutit à l'analyse du type d'événement, pouvant distinguer entre "risque" ou "accident" réellement survenu.

Une analyse des données recueillies dans la base de données sur les risques et les accidents montre que 88/89% des cas relevant des observations enregistrées sont des accidents réels survenus dans la gestion du GNL dans l'environnement portuaire, alors que 11/12% seulement concernent des risques, Figure 11.

Figure 11: Répartition des incidents/risques dans la gestion du GNL dans l'environnement portuaire

Tipologia	Numero
Incidente	74
Rischio	9
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

À des fins prudentielles, une catégorisation des événements en question en termes de "niveau de risque" a également été attribuée, sur la base des données disponibles, c'est-à-dire les implications liées à la survenance de l'événement. Les niveaux de risque ainsi catégorisés, faible, moyen, élevé, dépendent principalement des implications chimiques que les accidents/risques ont sur l'environnement externe et donc, comme mentionné ci-dessus, le label en question a été attribué en utilisant des critères prudentiels qui tendent à surestimer l'incidence du risque afin de donner la priorité à la sécurité de l'environnement et des communautés locales éventuellement touchées par le risque ou l'événement dommageable.

L'analyse des données de la BD "risques et accidents" a montré que seulement 25% des risques sont de haute qualité et 75% de moyenne à basse qualité. En outre, la plupart des événements à haut risque sont concentrés dans les années antérieures à 2000 (16 événements), ce qui témoigne de la sûreté et de la sécurité accrues des pratiques et des technologies de gestion du GNL, Figure 12.

Figure 12: Degré d'intensité de risque des risques/incidents dans la gestion du GNL <sup>4</sup>

Intensità rischio	Numero
Rischio alto	20
Rischio medio	38
Rischio basso	25
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

En ce qui concerne les 25 observations de faible qualité, 9 sont dues à des risques dans la gestion du GNL et non à des accidents.

La catégorisation du risque était, en général, à quelques exceptions près en fonction de l'effet du risque / accident sur l'environnement extérieur, liée à certains types de risques chimiques liés à la gestion du GNL comme le montre Figure 13 et comme expliqué précédemment.

<sup>4</sup> Un exemple d'événement à haut risque est celui qui s'est produit en 2015 à Portland, où un incendie s'est déclaré dans une installation de GNL à cause d'un semi-remorque qui est entré en collision avec l'installation et a coupé l'électricité. En ce qui concerne un événement à risque moyen, en juin 2020, dans l'installation de GNL de South Kinder Morgan sur l'île d'Elbe (SLNG), un incendie s'est produit dans l'unité B du compresseur de réfrigérant mixte (MRC) B de l'unité 2 du système de liquéfaction mobile modulaire (MMLS) (US02-K- 0501B). L'événement n'a pas fait de victimes ni de blessés, mais a entraîné le rejet d'une partie du mélange MR composé d'iso pentane, d'azote, de méthane, de propane et d'éthylène. Un événement à faible risque s'est produit dans le port d'Ostende, en Belgique, en 2020, où une collision a eu lieu entre le navire GNL AMBERJACK et le transporteur d'automobiles GRAND VENUS, tous deux au ancrés et en attente d'ordres. Les navires ont subi des dommages mineurs.

Figure 13: Corrélation entre la classe de risque et le type de risques chimiques

Rischio specifico	Classe di rischio
<i>Sloshing</i>	Rischio alto
<i>Bleve</i>	Rischio alto
<i>Esplosione nube di vapore</i>	Rischio alto
<i>Fire (jet, pool, flash)</i>	Rischio alto
<i>Asfissia</i>	Rischio basso
<i>Terrorismo</i>	Rischio basso
<i>Terremoti</i>	Rischio basso
<i>Gas di evaporazione</i>	Rischio medio
<i>Contatto</i>	Rischio medio
<i>Roll-over</i>	Rischio medio
<i>Transizione rapida di fase</i>	Rischio medio

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

Le type prédominant de risques chimiques suite à des accidents/risques dans la gestion du GNL est le contact avec le GNL, suivi par la catégorie explosion et incendie du nuage de vapeur, Figure 14.

Figure 14: Nombre d'échantillons de risques chimiques dans la gestion du GNL dans la zone portuaire

Chemical risk	Numero
undisclosed	31
Contatto	14
Esplosione nube di vapore	14
Fire (jet, pool, flash)	11
Gas di evaporazione	7
Sloshing	2
Transizione rapida di fase	2
Bleve	1
Terrorismo	1
<b><i>Totale complessivo</i></b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

En plus de l'analyse des risques chimiques et du degré de risque d'accident / risque, le groupe de travail a également classé les risques / accidents en fonction de la phase opérationnelle au cours de laquelle ces risques sont survenus et des causes qui ont conduit à risque / accident.

Les phases opérationnelles du cycle maritime-portuaire dans lesquelles les risques / accidents se sont produits étaient principalement celles du chargement / déchargement, des opérations terminales dans les installations de regazéification et de liquéfaction et de la navigation en mer comme le montre la

Figure 15.

Figure 15: Phases opérationnelles Risque/accident GNL

Operational risk	Numero	%
terminal	27	33%
carico/scarico	20	24%
at sea	17	20%
in port	8	10%
building LNG infrastructure	3	4%
docking	3	4%
LNG deposit	3	4%
undisclosed	2	2%
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>	

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

En ce qui concerne les causes des risques / accidents dans la gestion du GNL en zone portuaire, l'analyse des données des risques et accidents de la BD a montré que les causes prédominantes sont les pannes des équipements des terminaux et des navires et les collisions entre navires telles que rapportées dans la Figure 16.

Figure 16: Causes de risque / accident dans la gestion du GNL dans la zone portuaire

Cause rischi/incidenti	Numero
Guasto attrezzatura (terminal)	27
Guasto attrezzatura (ship)	19
Collisione	13
Evento naturale	7
n.a.	6
Altre cause	3
Errore umano	3
Incaglio	2
Guasto attrezzatura (deposit)	2
Collisione	1
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

Cela met l'accent sur la nécessité de se doter d'équipements de dernière génération, technologiquement avancés, mais aussi de prêter une attention particulière au niveau de professionnalisme des opérateurs économiques impliqués dans ce type d'opérations, à la définition de procédures de sûreté et de sécurité conformes aux techniques les plus récentes du secteur et à la mise en place de cours de formation continue pour soutenir le personnel employé dans les mêmes activités.

Outre l'analyse des risques/accidents chimiques et opérationnels et l'analyse des causes, le groupe de travail ESA a également analysé les implications/conséquences des risques/accidents selon une échelle d'intensité allant de 1 à 5, comme le montre la Figure 17 ci-dessous.

Figure 17: Classification des implications/conséquences des risques/incidents dans la gestion du GNL

Implicazioni/conseguenze	Definizione
1	Non si tratta di incidente ma di rischio
2	Incidente senza vittime/feriti/danni
3	Incidente con danni
4	Incidente con feriti ma non vittime
5	Incidente con vittime

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

L'analyse des données recueillies a montré que plus de 50 % des risques et des accidents sont classés comme des accidents du troisième degré, ce qui entraîne donc des dommages matériels aux structures matérielles. En outre, plus de 10 % seulement des accidents sont mortels, tandis que 20 % seulement sont classés dans la catégorie des risques et des accidents sans décès/blessures/dommages (Figure 18).

Figure 18: Degré de gravité des implications/conséquences des risques/incidents liés à la gestion du GNL

Grado Implicazioni/conseguenze	Numero
Livello 3	48
Livello 5	12
Livello 1	9
Livello 2	9
Livello 4	5
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

Sur les 84 observations recueillies, il y a 72 observations sans victimes, et seulement 4 avec plus de 10 victimes (Figure 19) ; si l'on considère que la BD couvre un horizon temporel d'environ 80 ans et a été préparée en examinant le phénomène en question au niveau international, il est donc possible d'affirmer qu'il s'agit d'une technologie bien établie et plutôt sûre si on la compare à d'autres alternatives similaires largement utilisées sur le marché.

Figure 19: Les victimes d'accidents/risques dans la gestion du GNL

Vittime	Numero osservazioni
0	72
1	3
3	1
4	1
6	2
11	1
27	1
40	1
131	1
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques e accidents.

D'autre part, dans 70 cas de risque/accident, il n'y a pas eu de blessés et dans 4 cas seulement, il y a eu plus de 10 blessés, Figure 20.

Figure 20: Blessés par des accidents/risques dans la gestion du GNL

Feriti	Numero osservazioni
0	70
1	3
2	3
3	1
5	2
30	1
35	1
74	1
225	1
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

Par ailleurs, en ce qui concerne les dommages résultant de risques/accidents dans la gestion du GNL dans l'environnement portuaire maritime, dans 66 cas sur 83, il y a eu des dommages matériels, tandis que dans 16 cas, aucun dommage n'est survenu. Pour une observation recueillie dans la base de données, il n'a pas été possible de recueillir suffisamment d'informations pour déterminer si des dommages s'étaient produits ou non (Figure 21).

Figure 21: Dommages dus aux accidents/risques dans la gestion du GNL

Danni materiali	Numero
n.a.	1
No	16
Si	66
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

De plus, parmi les accidents / risques survenus dans la gestion du GNL dans le contexte maritime portuaire, dans 43 cas il y a eu un déversement alors que dans 33 cas aucun (Figure 22).

Figure 22: Cas de déversements de GNL

Sversamento GNL	Numero osservazioni
n.a.	7
No	33
Si	43
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

Après une analyse approfondie des risques chimiques/opérationnels et des conséquences des accidents/risques dans la gestion du GNL, le groupe de travail a également procédé à l'analyse des zones géographiques où ces risques/accidents se produisent le plus fréquemment.

D'après les données recueillies, il apparaît que des pays comme les États-Unis, l'Algérie et le Japon sont naturellement très impliqués dans les risques et les accidents liés à la gestion du GNL dans le secteur portuaire, puisqu'ils sont les principaux pays exportateurs et importateurs de cette ressource naturelle ( Figure 23). En fait, les plus grands bassins gaziers sont situés en Algérie et aux États-Unis, tandis que le Japon possède les plus grandes usines de traitement.

Figure 23: Pays impliqués dans des risques/accidents causés par la gestion du GNL

Nazione	Numero
USA	32
n.a.	11
Algeria	7
Giappone	5
Indonesia	4
Regno Unito	4
Trinidad e Tobago	3
Belgio	2
Emirati Arabi Uniti	2
Francia	2
Italia	2
Russia	2
Canada	1
Golfo del Messico	1
Guinea	1
India	1
Messico	1
Norvegia	1
Paesi Bassi	1
<b>Totale complessivo</b>	<b>83</b>

Source : Nt. élaboration sur BD risques et accidents.

## 5. UN EXEMPLE D'APPLICATION DE L'ANALYSE DES RISQUES : LE CAS FRANÇAIS

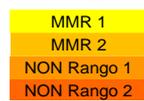
### 5.1. Aspects introductifs

Les risques sont généralement caractérisés selon des évaluations "bidimensionnelles", avec :

- la probabilité ou la fréquence avec laquelle des accidents ou des phénomènes dangereux peuvent être observés
- la gravité des effets associés à chaque type d'accident ou de phénomène.

Par exemple, selon la législation ICPE 5, la matrice présentée dans la Figure 24 est utilisée en France pour rendre compte des évaluations des risques et décider de leur acceptabilité.

Figure 24: Matrice dite "MMR" utilisée en France pour évaluer la criticité des risques d'une ICPE dans son environnement.

$> 10^{-2}$	Evento in corso sul sito in questione	Occasionale	A					
$10^{-3} < F < 10^{-2}$	Evento che si è già verificato sul sito	Non comune	B					
$10^{-4} < F < 10^{-3}$	Evento simile già incontrato nel settore	Raro	C					
$10^{-5} < F < 10^{-4}$	Evento che si è già verificato, ma che è stato oggetto di significative azioni correttive	Estremamente raro	D					
$< 10^{-5}$	Evento non incontrato a livello globale, ma non impossibile alla luce delle conoscenze attuali	Rarissimo	E					
				1	2	3	4	5
			<b>Livello di gravità</b>	Moderato	Serio	Importante	Catastrofico	Disastroso
			<b>Effetti letali significativi</b>	Nessuno	Nessuna persona esposta	Non più di 1 persona esposta	Meno di 10 persone esposte	Più di 10 persone esposte
			<b>Primi effetti letali</b>	Nessuno	Non più di 1 persona esposta	Tra 1 e 10 persone esposte	Tra 10 e 100 persone esposte	Più di 100 persone esposte
			<b>Effetti irreversibili</b>	Meno di "1 persona" esposta	Meno di 10 persone esposte	Tra 10 e 100 persone esposte	Tra 100 e 1000 persone esposte	Più di 1000 persone esposte
			<b>MMR: Misura di controllo del rischio</b>	Accettabile				
			<b>RA: Rischio accettabile</b>					

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

<sup>5</sup> ICPE est un acronyme qui désigne une installation classée pour la protection de l'environnement, c'est-à-dire une installation pouvant présenter un danger ou des problèmes pour la sécurité des personnes et du milieu environnant.

L'objectif n'est pas de détailler ici l'utilisation de la matrice présentée dans la

Figure 24 qui est spécifique à la France et la maîtrise des risques technologiques autour des ICPE. En France également, dans le cas des gazoducs pour le transport de substances dangereuses (dans le cas de certains gazoducs de GNL) ou dans le cas d'infrastructures telles que les zones de transit pour les matières dangereuses dans certains grands ports, il est fait référence à différentes matrices. Celles-ci diffèrent du chiffre précédent en termes d'échelles de fréquence ou de gravité ou d'évaluation des risques (acceptables ou non, ou selon les conditions). Dans d'autres pays européens, les risques peuvent également être caractérisés par d'autres moyens.

Cependant, dans tous les cas (pays, législation appliquée, etc.), il n'en reste pas moins que la caractérisation des risques nécessite une évaluation "bidimensionnelle" : des fréquences et des degrés de gravité. Dans ce document, il sera fait référence aux classes de fréquence définies dans la figure ci-dessus (

Figure 24). Même si les fréquences ne sont pas partout classées de cette manière, on peut les déduire des fréquences exprimées en occurrences par an (au moins en ordres de grandeur), qui est une unité universelle.

D'autre part, en ce qui concerne les niveaux de gravité, il semble que ceux-ci dépendent de :

- la portée ou la distance des effets (comme la létalité),
- le nombre de personnes exposées aux effets et les critères utilisés pour considérer les différents niveaux (par exemple, 1, 10 ou 100 personnes exposées).

Les niveaux de sévérité de la

Figure 24 dépendent donc de l'environnement et des critères spécifiques d'une réglementation. Ces dimensions ne sont pas universelles. Dans ces conditions, dans ce document, les sévérités seront évaluées à partir des distances d'effet, exprimées en m, et en tenant compte des seuils listés dans le Tableau 5.

*Tableau 5: Niveaux d'effet critique basés sur les expositions dangereuses*

Tipo di effetti	Soglia per i cosiddetti effetti letali significativi o SELS	Soglia di 1° effetti letali o SEL	Soglia per effetti irreversibili letali (non letali) o SEI
Terminali a causa di un'esposizione superiore a 2 minuti	8 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>
Terminali a causa di un'esposizione inferiore a 2 minuti	1800 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s	1000 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s	600 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s
Termico dovuto a VCE	Distanza dal LIE	Distanza dal LIE	La distanza dal LIE è aumentata del 10%.
Meccanica dovuta alla sovrappressione	20 kPa	14 kPa	5 kPa

Source: CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

En particulier, il semble approprié de rappeler que :

- le seuil SELS correspond à 5 % des effets létaux possibles pour une population exposée à ce seuil,

- le seuil SEL correspond à 1 % des effets létaux possibles ou de l'apparition d'effets létaux pour une population exposée à ce seuil,
- le seuil de SEI correspond généralement aux effets avec séquelles pour une population exposée à ce seuil

Enfin, on peut distinguer différents types d'effets thermiques (exposition inférieure ou supérieure à 2 min, exposition aux flammes d'un VCE) car les variables pertinentes (flux de chaleur, positions des flammes, etc.) à prendre en compte pour prévoir les effets varient d'un cas à l'autre.

## 5.2. Gravité des phénomènes dangereux

### 5.2.1. Hypothèses et méthode de calcul

Ce sous-chapitre présente brièvement les modèles standard utilisés dans les étapes suivantes du calcul des distances d'effet. Ces modèles sont principalement mis en œuvre avec le logiciel PHAST (version 6.7). Nous vous rappelons que ce logiciel est de loin le plus utilisé en France pour évaluer les distances d'effet mentionnées dans les études de dangers. Son utilisation est également très courante dans les pays de l'UE. Des valeurs indicatives pour certains intrants, hypothèses, etc. sont également fournies.

#### a. Source de données (flux vers la fuite)

Les flux au niveau de la fuite sont calculés à l'aide des modèles programmés dans le logiciel PHAST. Pour rappel, dans le cas du GNL, le flux avant la panne est souvent biphasé avec à la fois du GNL (phase liquide) et du GNL (phase gazeuse). Pour les fuites importantes (dites à 100 %), 2 sections avec déversement de part et d'autre du site de l'accident sont autorisées. Les deux effets sont pris en compte en les combinant, ce qui équivaut à considérer la somme des flux de fuite, tous deux orientés dans la même direction.

En cas de pertes de débit importantes, il est courant d'observer un "ruissellement" des pompes dont le débit est limité par leur mode de fonctionnement. En l'absence d'un diagramme de fonctionnement, des coefficients multiplicateurs forfaitaires peuvent être utilisés sur le débit nominal suivant :

- cas de GNL sous pression : coefficient = 2 ;
- cas de GNL non pressurisé : coefficient = 1,2.

#### b. Vaporisation avec épandage au sol

Dans le cas du GNL sous pression (pression de vapeur saturée > 3 bar rel.), Les résultats obtenus avec les modèles montrent une dispersion principalement au moyen d'aérosols et une diffusion relativement faible au sol.

Dans le cas du GNL non pressurisé (pression de vapeur saturée < 0,2 bar rel.), Les résultats obtenus avec les modèles montrent cette fois une dispersion considérable au sol. Les calculs correspondent donc à une situation avec extension (en l'absence de rétention) d'un patch de liquide bouillant. L'épaisseur de la feuille a été autorisée au maximum:

- 1 cm pour un sol en béton,
- 3 cm pour un sol pour toutes les saisons
- plus de 10 cm pour les sols sableux.

Dans ces conditions, le taux d'évaporation variable est calculé en fonction de l'apport de chaleur du sol et de l'atmosphère. Comme le sol a une faible conductivité, le taux d'évaporation est généralement modéré..

c. Vaporisation avec épandage sur l'eau

Le comportement est similaire à celui du cas précédent. Dans le cas du GNL non pressurisé, la diffusion sur l'eau est importante et il y a alors un traitement spécifique de vaporisation sur l'eau.

En utilisant les modèles du logiciel PHAST, un taux d'évaporation du liquide bouillant est calculé avec un coefficient d'échange constant avec l'eau, estimé à 500 W/m<sup>2</sup>.K. Avec de l'eau à 10°C, par exemple, un débit de la surface d'évaporation de 0,17 kg/m<sup>2</sup>.s est calculé. Comme l'épaisseur de la flaque est faible (de l'ordre du mm), il s'ensuit que le taux d'évaporation atteint rapidement le débit à la fuite pour le GNL non pressurisé.

d. Dispersion atmosphérique

Un logiciel tel que PHAST permet de simuler la dispersion du méthane dans l'atmosphère à l'aide d'un modèle dit "intégral". Cela consiste à résoudre les équations de la mécanique des fluides sous une forme simplifiée qui ne sera pas répétée ici. En ce qui concerne le comportement général dans l'air ambiant, il convient toutefois d'observer les points suivants.

Dans le cas du GNL sous pression, la phase liquide - essentiellement l'aérosol - est vaporisée par l'entraînement de l'air du jet. Pour rappel, un jet est observé en raison de l'importance du mouvement du flux accidentel (la pression est "convertie" en vitesse). Ensuite, le panache généré par le jet a le comportement d'un gaz dit "lourd" en raison du refroidissement massif de l'air emprisonné, concomitant à l'évaporation des gouttes de GNL.

Dans le cas du GNL non pressurisé, l'évaporation de la nappe crée un panache qui se disperse également au niveau du sol. L'effet du déplacement de la densité vers le haut (favorable du point de vue de la sécurité), qui devrait être dû à la densité plus faible du méthane par rapport à l'air, est en pratique compensé par le refroidissement de l'air piégé par les vapeurs à très basse température émises par le GNL.

e. VCE (explosion de nuage de vapeur)

Une VCE porte à un effet:

- thermique, associée à la température élevée des gaz chauds,
- mécanique, associée aux ondes de pression générées par l'expansion de ces mêmes gaz chauds

On suppose que les distances des effets thermiques correspondent plus ou moins au contour du nuage ou du panache explosif et sont donc quantifiables par la taille du droit de passage du nuage (voir Tableau 5).

En ce qui concerne les effets mécaniques dus aux ondes de pression, l'espace à l'intérieur du nuage explosif doit être analysé. Les questions à poser sont donc les suivantes :

- ✓ S'agit-il d'un espace sans encombrement, à l'air libre ou s'agit-il de zones obstruées par des obstacles solides (équipements, tuyaux, matériaux divers, etc.) ?
- ✓ S'il s'agit de zones encombrées, quel est le degré d'encombrement, le volume concerné, etc. ?

Ces distinctions doivent être faites car les observations, les tests ou les calculs post-accident (voir Mouilleau et al., 1999) montrent que l'explosion d'un nuage ou d'un panache explosif peut en pratique ne pas correspondre à un seul VCE mais à plusieurs. Sans entrer dans les détails, les vitesses des flammes peuvent être suffisamment

différentes d'une zone à l'autre à l'intérieur du volume explosif, comme s'il y avait plusieurs explosions distinctes successives.

Ceci est à l'origine de la méthode dite MultiEnergie ("Multi" se référant à d'éventuelles explosions multiples dans un même nuage) qui vise notamment à compter les VCE, au sein d'un même nuage et à attribuer une énergie (associée au volume en question) et un indice de gravité à chaque VCE.

Toujours sans donner de détails, cette méthode propose des indices de gravité allant de 1 (VCE moins favorable à la surpression) à 10 (VCE conduisant aux pics de surpression les plus forts).

Pour les stations "Port"<sup>6</sup>, comme les installations sont généralement peu encombrées, les indices de gravité suivants peuvent être utilisés pour un VCE de type "open field" :

- installations à terre : "4" (surpression = 10 kPa),
- masse d'eau : "3" (surpression = 5 kPa).

Dans les zones proches du site où la congestion est marquée (parking pour camions, zone de stockage, etc.), l'indice peut être porté à "5" (surpression = 20 kPa).

Le Tableau 6 donne une indication des distances d'effet pour les volumes types et les niveaux de gravité des VCE ; l'acronyme s.n.a. signifie "seuil non atteint".

*Tableau 6: Distances dues à la surpression de chaque centre du volume explosif*

Tipica area congestionata	Volume (m <sup>3</sup> )	Indice (-)	Energia (DOJ)	Distanze SELS (m)	Distanze SEL (m)	Distanze SEI (m)
Stoccaggio con serbatoi orizzontali (a pressione) - può essere adatto anche per stazioni di carico di autocarri, ad esempio.	5000	4	15650	s.n.a.	s.n.a.	73
Pompa e altre apparecchiature di processo.	5000	5	15650	28	46	130
	10000	5	31300	35	58	164
Rack di alcune (2-3) tubazioni	1250	3	3900	s.n.a.	s.n.a.	19
	5000	3	15650	s.n.a.	s.n.a.	30

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

En détail, il est donc nécessaire pour les distances de surpression :

- identifier les zones et leurs centres
- d'évaluer leurs volumes et les énergies libérées par la combustion
- choisir les degrés de gravité.

<sup>6</sup> Le document de référence indique par le terme "station portuaire" un port dont la fonction principale est de ravitailler les navires et qui a une capacité de stockage de GNL inférieure à 5000 m<sup>3</sup>.

Cela doit être fait au cas par cas et en fonction de la localisation des installations, qui n'est évidemment pas connue dans le cadre de cette étude.

En pratique, cependant, cette dernière observation n'est pas très "limitante" dans le cas des vapeurs de GNL dont la réactivité est "plutôt faible", de sorte que les indices sont également limités. L'expérience a montré que les distances d'effet les plus "pénalisantes" sont celles correspondant aux effets thermiques, données directement par les calculs de dispersion. Dans la suite de cette étude, la gravité des VCE sera caractérisée par les distances des effets thermiques associés à ces phénomènes.

*f. BLEVE*

De manière similaire au cas précédent, les BLEVE ont des effets thermiques et mécaniques par le biais d'ondes de surpression (et même de balles). Dans le cas du BLEVE, les effets thermiques sont encore plus souvent prédominants.

Ensuite, il n'existe pas de modèle a priori dédié au cas du GNL et les distances des effets thermiques sont évaluées à l'aide de formules réglementaires pour le butane (circulaire du 10 mai 2010 du MEEDDM, 2010). Dans ce cas, le butane est maintenu (sachant que la circulaire parle de GPL et fait également référence au propane) parce que la pression d'étalonnage des vannes des installations contenant du butane est proche de celle du GNL.

### *5.2.2. Distances d'effet*

Les distances d'effet des phénomènes dangereux sont enregistrées dans les trois tableaux suivants (Tableau 7, Tableau 8, Tableau 9) consacrés respectivement au BLEVE, au VCE et au jet de feu.

Tableau 7: Distances des effets pour BLEVE

Numero del caso	Dimensione o volume	Contesto	Massa (t)	Distanze SELS (m)	Distanze SEL (m)	Distanza SEI (m)
1	50 m <sup>3</sup>	Caso tipico di un'autocisterna	20	86	130	206
2	110 m <sup>3</sup>	Tipico caso di un serbatoio ferroviario o di un serbatoio intermedio	44	125	184	294
3	200 m <sup>3</sup>	Tipico caso di stoccaggio in pressione in una stazione Fabbrica o Porto	81	166	240	386
4	1000 m <sup>3</sup>	Tipico caso di un deposito pressurizzato ad alta capacità in una stazione Porto	403	354	484	792

Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Tableau 8: Distance d'effet thermique associée à la VCE

Tipo di condizioni	Caso n.	Dimensione della perdita (mm)	Contesto	Tasso di dispersione (kg/s)	Tempo di perdita	Distanze al LIE (= distanze SELS = distanza SEL)	Nota
Pressurizzato	5	65 mm	Tipico caso di una perdita "al 100% di sezione" in un tubo flessibile utilizzato per lo scarico dei camion cisterna	12	30 s	100	Perdite da apparecchiature di trasferimento (tubi flessibili o bracci)
	6			20	"lungo"	123	
	7	80 mm		27	30 s	148	
	8	200 mm		181	30 s	440	
Pressurizzato	9	25 mm	Tipico caso di una perdita chiamata "a sezione del 10%" da una condotta di GNL da 3".	8	30 s	60	Perdite da tubazioni

Tipo di condizioni	Caso n.	Dimensione della perdita (mm)	Contesto	Tasso di dispersione (kg/s)	Tempo di perdita	Distanze al LIE (= distanze SELS = distanza SEL)	Nota
	10	Da 66 a 80 mm	Tipico caso di perdite note come: - "a sezione del 10%" da una condotta da 8" di GNL, - "al 100% di sezione" da una condotta con un diametro vicino a 3".	da 27 a 33	"lungo"	da 180 a 210	
	11	150 mm	Tipico caso di perdite di "al 100% di sezione%" da una condotta con un diametro vicino a 6".	118	30 s	290	
	12			118	"lungo"	360	
Pressurizzato	13	50 mm	Tipico caso di trabocco da una singola valvola del serbatoio, in stazioni Fabbrica o Porto.	6	"lungo"	52	
	14	7*67 mm	Tipico caso di trabocco di diverse valvole in una stazione Porto.	60	"lungo"	220	
Non pressurizzato	19	200 mm	Tipico caso di perdita di una "al 100% di sezione%" da un braccio utilizzato per scaricare una nave in una stazione Grand Port.	86	30 s	380	Perdite da bracci di trasferimento, carico o scarico

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
Contribution du partenaire du projet

Tipo di condizioni	Caso n.	Dimensione della perdita (mm)	Contesto	Tasso di dispersione (kg/s)	Tempo di perdita	Distanze al LIE (= distanze SELS = distanza SEL)	Nota
	20		Tipico caso di perdita di una "al 100% di sezione%" da un braccio utilizzato per caricare una nave tipo Traghetto in una stazione Grand Port.	60	30 s	310	
	21	300 mm	Tipico caso di perdita di una "al 100% di sezione%" da un braccio più grande utilizzato per scaricare una nave in una stazione Grand Port.	434	60 s	860	
	22		Tipico caso di perdita di una "al 100% di sezione%" da un braccio utilizzato per caricare una Nave Grande in una stazione Grand Port.	180	60 s	590	
Non pressurizzato	23	66 mm	Tipico caso di perdita di una "sezione del 10%" da una condotta di GNL da 8".	32	"lungo"	175	Perdite dalle tubazioni, con o senza spandimento di contenuto.
	24		Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".		30 s	140	

Tipo di condizioni	Caso n.	Dimensione della perdita (mm)	Contesto	Tasso di dispersione (kg/s)	Tempo di perdita	Distanze al LIE (= distanze SELS = distanza SEL)	Nota
	25	100 mm	Come sopra, tranne per il fatto che questo è una condotta da 12".	76	"lungo"	270	
	26		Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".		30 s	143	
	27	132mm	Come sopra, tranne per il fatto che questo è una condotta da 16".	133	"lungo"	410	
	28		Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".		30 s	151	

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 “Base de données sur les accidents et les risques”  
Contribution du partenaire du projet

Tableau 9: Distances d'effet associées aux jets de feu

Caso n.	Dimensioni (mm) o circostanze della perdita	Tasso di dispersione (kg/s)	Lunghezza della fiamma (m)	Flusso radiativo medio (kW/m <sup>2</sup> )	Distanza SELS (m)	Distanza SEL (m)	Distanza SEI (m)
15	25	5	32	82	49	53	60
16	Portata della pompa	12	47	95	73	80	90
17	66	32	79	83	125	138	155
18	132	133	131	134	215	240	270

Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Les distances d'effet du

Tableau 9 ne sont pas directement associées à un équipement ou à une opération comme dans les tableaux précédents (Tableau 7 e Tableau 8). D'autre part, la taille ou le débit des fuites sont de bons indicateurs pour évaluer (par interpolation, si nécessaire) les distances d'effet pour un cas pratique

Dans le Tableau 8, consacré aux distances d'effet associées aux VCE, il y a une colonne pour la durée de la perte, qui prend comme valeurs 30 ou 60 secondes ou "longue".

Les deux durées explicites (30 et 60 s) correspondent aux durées d'isolement des pertes au moyen de mesures de gestion des risques (ou MMR).

L'adjectif "long" est utilisé pour tous les cas de pertes non contrôlées par le MMR. Par conséquent, aucun autre détail ("long" couvrant des situations qui peuvent être différentes) n'est donné car les calculs montrent que dès qu'une fuite est observée, il se forme un nuage explosif qui augmente de taille avec le temps et qui, après quelques minutes, atteint généralement sa taille maximale, ne se développe plus.

En d'autres termes, en ce qui concerne la distance de la LIE, qui est la distance souhaitée des effets, la durée du rejet n'a plus d'influence et n'est donc pas prise en compte en détail.

Cependant, la réduction de la durée de la perte reste très importante car elle limite nécessairement le temps critique pendant lequel un nuage reste explosif, avant d'être suffisamment dilué pour devenir non-explosif.

### **5.3. Fréquence des événements dangereux**

#### ***5.3.1. Approche, hypothèses et références***

##### ***a) le cas de la BLEVE***

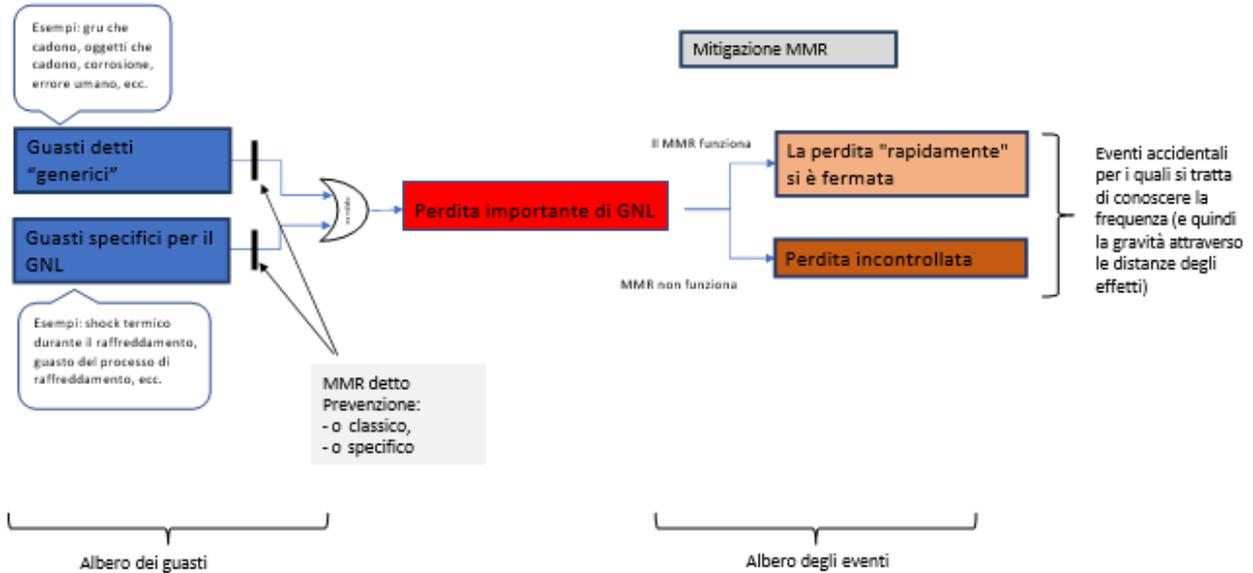
Les fréquences BLEVE seront évaluées par analogie avec ce qui est communément admis pour le GPL. A cet égard, vous pouvez vous référer à (HSE, 2012) ou (Heirman, 2009) pour extraire directement une classe de fréquence. De la consultation de ces ouvrages, il ressort que les fréquences entre les classes D et E varient. En substance, la classe E est souvent justifiée par des structures :

- pour lesquels une analyse de risque spécifique a été réalisée afin de démontrer la très faible fréquence des défaillances ou des événements initiaux conduisant à un BLEVE,
- souvent équipé d'un équipement de refroidissement en cas d'incendie (événement déclencheur typique pour conduire à un BLEVE)

##### ***b) Approche générale des cas de pertes***

En l'absence de bases de données sur les incidents liés au GNL (hormis quelques éléments épars examinés ci-dessous), l'approche présentée dans la Figure 25 peut être adoptée

Figure 25: Approche générale du nœud papillon pour déterminer les fréquences de dispersion

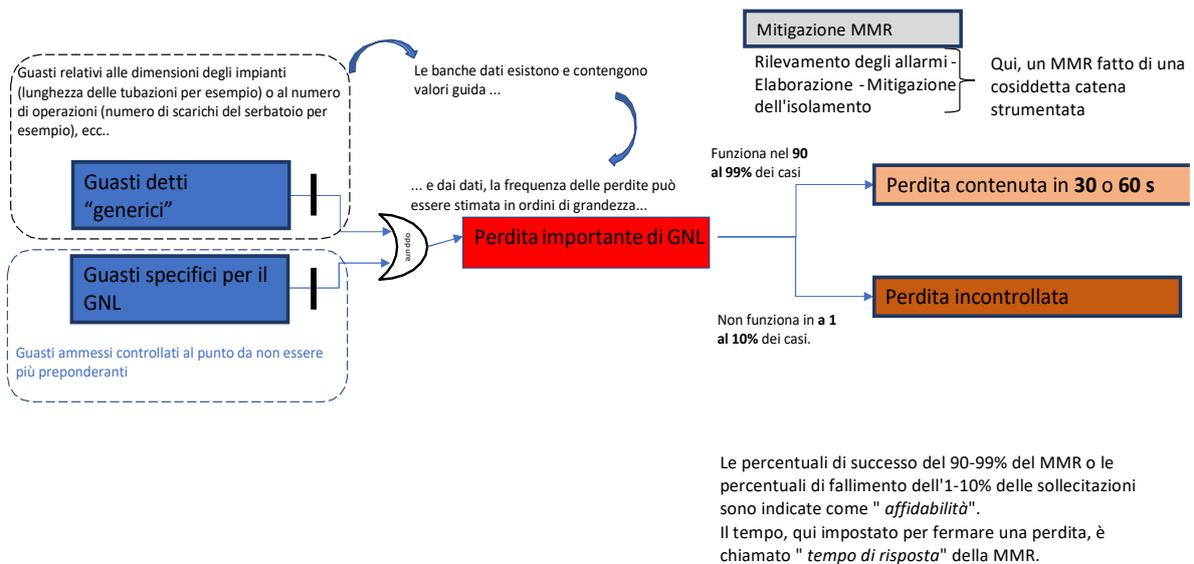


Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Cependant, le développement de cette approche nécessite d'étendre l'arbre de défaillances à gauche de l'événement de perte et également de développer ce que l'on appelle l'arbre des événements à sa droite.

Ces développements ne sont pas réalisables dans le cadre d'une étude générique, applicable en divers lieux, et sans information explicite sur les moyens effectivement mis en œuvre. Dans ces conditions, les hypothèses présentées à la Figure 26 sont faites.

Figure 26: Approche appliquée dans le cadre de l'étude



Source : CCIVAR, 2020 (“Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires”)

Les données présentées sur le côté gauche de la Figure 26 (longueurs de tuyauterie, nombre de transferts, etc.)

sont spécifiées ci-dessous.

c) Bases de données de référence

Les valeurs guides de fréquences proposées sont issues de deux documents :

- un document néerlandais intitulé "Manuel de Référence Bevi Évaluation du Risque" (RIVM, 2009),
- un document du HSE britannique intitulé "Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessment (HSE, 2012)".

Alors que le RIVM (2009) est une référence classique pour les installations industrielles en France, le document HSE (2012) présente des informations détaillées importantes concernant les principaux équipements et composants utilisés dans ce type de systèmes et installations de soutage/stockage de GNL (bras, tuyau, pompe, etc.).

L'utilisation de ces deux références est a priori "pénalisante" pour les défaillances dites génériques dans le cas du GNL en raison des matériaux utilisés (acier inoxydable hautement ductile) et des différences technologiques (cuve à double paroi, etc.) associées à ce produit.

En outre, SHELL utilise les commentaires de ses clients livrés par camion-citerne en GNL (voir le § suivant).

Le Tableau 10 indique la base de données à utiliser pour chaque type d'équipement principal.

Tableau 10: Bases de données

Attrezzatura	(RIVM, 2009)	(HSE, 2012)	Feedback SHELL
Serbatoi	★		
Tubazioni	★		
Pompe	★	★	
Compressori		★	
Braccio su nave/chiatta		★(vedi sotto)	
Flessibile sul veicolo		★	★ (vedi sotto)

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

(\*) : valeurs interpolées par TechnipFMC à partir de valeurs explicitement publiées

d) Observations sur les cas de tuyaux sur les véhicules

Les valeurs de fréquence dans le document HSE (2012) sont modulées en fonction de la présence de mesures de sécurité : cales du véhicule, tests d'étanchéité, système d'échappement. Cependant, une fréquence de rupture (section 100 %) de  $4,10^{-6}$  apparition/transfert se produit.

Pour sa part, le retour d'expérience de SHELL porte sur 4 961 400 transferts de tuyaux sans incident. Ces transferts doivent être effectués avec trois mesures préventives (cales de roue, servofrein à main, test d'étanchéité) sans "fuite".

A partir de l'analyse statistique, SHELL obtient la valeur suivante pour la rupture d'un tuyau flexible :

- Niveau de confiance = 50% =>  $F_{ER}^7 = 1.4 \cdot 10^{-7}$ / transfert
- Niveau de confiance = 90% =>  $F_{ER} = 4.7 \cdot 10^{-7}$ / transfert

Pour cet exemple, il est explicitement montré que les valeurs peuvent différer d'un facteur 10. La recherche d'un ordre de grandeur au mieux est donc déjà un objectif, parfois pas facile à atteindre.

La valeur proposée par SHELL, basée sur le retour d'expérience, est maintenue.

e) Observations sur les cas de bras pour les navires et les barges

Dans (HSE, 2012), les bras sont supposés être équipés d'un système de couplage de déverrouillage d'urgence (ERC) avec une alarme de déplacement. On suppose donc que ce système échouera avec les vannes d'isolement restées ouvertes.

f) Résumé des fréquences de perte

Voici les fréquences de diffusion typiques les plus utiles dans ce contexte.

Tableau 11: Fréquences de fuite génériques sur les conduites

Diametro DN	Frequenza di perdita 100 % sezione [33%DN-100%DN]	Frequenza di perdita di falla intermedia 10 % sezione [10%DN-33%DN] (*)
< 75 mm	$1 \cdot 10^{-6}$ /anno.m	$9.6 \cdot 10^{-6}$ /anno.m
da 75 a 150	$3 \cdot 10^{-7}$ /anno.m	$1.3 \cdot 10^{-6}$ /anno.m
> 150 mm	$1 \cdot 10^{-7}$ /anno.m	$7.9 \cdot 10^{-7}$ /anno.m

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

(\*):valeurs interpolées par TechnipFMC à partir de valeurs explicitement publiées.

Tableau 12: Fréquences de fuite génériques sur les bras et les tuyaux flexibles

	Frequenza di perdita 100 % sezione (operazione)	Misure prese in considerazione
<b>Flessibile sul veicolo</b>	$4 \cdot 10^{-7}$ /operazione	2 misure preventive (cuneo,...) + prova di tenuta
<b>Braccio sulla nave</b>	$7 \cdot 10^{-6}$ /operazione	ERC e allarme spostamento

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

Les tableaux ci-dessus (Tableau 11 e Tableau 12) montrent que les fréquences de fuite pour chaque opération sont plus élevées sur les bras que sur les tuyaux. Cette observation contre-intuitive est tirée du retour

<sup>7</sup>  $F_{ER}$  pour Evénement redouté en fréquence.

d'information de Shell sur les tuyaux (voir note à l'alinéa d)), qui n'est pas disponible sur les armes.

g) *Influence des MMR dits d'atténuation*

En relation avec ce qu'on appelle l'arbre des événements, plusieurs MMR<sup>8</sup> peuvent être mentionnés. Mais c'est généralement une chaîne d'éléments avec :

- un moyen de détection (par exemple, des capteurs pour la présence de gaz naturel dans l'air)
- un moyen de traitement des alarmes (automatisation de la sécurité),
- un moyen pour réduire les conséquences (dans ce cas, l'isolation des fuites au moyen de soupapes de sécurité).

Deuxièmement, un MMR se caractérise par sa fiabilité et son temps de réponse. Ces deux éléments sont explicitement indiqués dans la Figure 26 ci-dessus.

Dans le cadre de l'étude, il a été admis:

- une fiabilité entre  $10^{-1}$  ou  $<10^{-1}$  (mais pas  $<10^{-2}$ ) avec quelques réserves expliquées ci-dessous,
- des temps de réponse allant de 30 s (dans le cas des petits systèmes) à 60 s (0 dans le cas des grands systèmes) ; ce temps de réponse dépend du temps cumulé nécessaire pour détecter, traiter et fermer les vannes (il est implicitement admis que la fermeture des vannes sur les grands pipelines prend plus de temps).

h) *Probabilité d'allumage*

La probabilité d'allumage d'une fuite de gaz est indiquée dans le Tableau 13. Ces valeurs se réfèrent à l'allumage retardé des fuites courtes ( $<30$  s) et longues ( $>30$  s) et peuvent être dérivées de (Flauw, 2015).

Tableau 13: *Probabilité d'allumage*

	Zona ATEX (inclusa stazione di scarico)	Zona non ATEX con basso traffico (dentro e fuori dal sito)	Altre zone non ATEX
Perdite a breve termine (<30 s)	0,1	0,1	1
Perdite a lungo termine (>30 s)	0,1	1	1

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

Dans le cas des fuites de GNL, étant donné que la fuite est d'au moins 30 s et que l'évaporation du liquide sur le sol (ou l'eau) peut continuer même après que la fuite a été arrêtée, il semble qu'une probabilité de 1 devrait être maintenue dans le contexte.

### 5.3.2. *Fréquence des événements dangereux*

Les fréquences de chaque phénomène dangereux considéré jusqu'à présent sont indiquées dans le Tableau 14.

<sup>8</sup> MMR pour les mesures d'atténuation des risques

Tableau 14: Fréquence des phénomènes dangereux

Condizioni	Fen. / Ev. pericoloso	Caso n.	Contesto	Dati importanti	Considerazione di un MMR	Classe di frequenza selezionata
Pressurizzato	BLEVE	1	Autocisterna	Cisterna portatile	no	D/E
		2	Cisterna ferroviaria o cisterna di dimensioni intermedie	Cisterna portatile		D/E
		3	Stoccaggio pressurizzato in stazione Fabbrica o Porto	Capacità fissa		D/E
		4	Stoccaggio pressurizzato ad alta capacità nella stazione Porto	Capacità fissa		D/E
Pressurizzato	VCE	5	Perdita "al 100% di sezione" in un tubo flessibile da 65 mm utilizzato per lo scarico dei camion cisterna	200 operazioni per turno con 5 turni di solito	Funzione nominale Perdita di 30 s	C/D
		6			Anomalia Fuoriuscita "lunga"	D/E

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

Condizioni	Fen. / Ev. pericoloso	Caso n.	Contesto	Dati importanti	Considerazione di un MMR	Classe di frequenza selezionata
		7	Perdite "al 100% di sezione" di un tubo flessibile da 80 mm durante lo scarico di petroliere in una stazione Porto	Come sopra	Funzione nominale Perdita di 30 s	C/D
		8	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per scaricare una nave in una stazione Porto	Da 10 a 50 operazioni all'anno	Funzione nominale Perdita di 30 s	C/D
Pressurizzato	VCE	9	Perdita nota come "a sezione del 10%" di una perdita da una condotta di GNL da 3".	Lunghezza di poche decine di metri al massimo	Funzione nominale Perdita di 30 s	D

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

Condizioni	Fen. / Ev. pericoloso	Caso n.	Contesto	Dati importanti	Considerazione di un MMR	Classe di frequenza selezionata
		10	Perdite note come: - "a sezione del 10%" da un lungo gasdotto GNL da 8" - "al 100% di sezione" da un tubo corto con un diametro di circa 3" (tubazioni di processo)	Da 100 a 500 m di lunghezza per un tubo da 8"  Diverse decine di metri per un tubo da 3"	Anomalia: Fuoriuscita "lunga"	C / D  D / E
		11	Perdite "al 100% di sezione" da una condotta con un diametro di circa 6" (condotte di processo).	Diverse decine di metri	Funzione nominale Perdita di 30s	D / E
		12			Anomalia Fuoriuscita "lunga"	E
Pressurizzato	VCE	13	Fuoriuscita da una valvola di un singolo serbatoio, in stazioni Fabbrica o Porto.	Questi casi dipendono dalle frequenze di trasferimento ma anche dai mezzi di sicurezza sui livelli del liquido nel serbatoio (considerato difettoso di fronte).	Anomalia Fuoriuscita "lunga"	B / C
		14	Fuoriuscita da diverse valvole nella stazione Porto.			D, di solito

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
Contribution du partenaire du projet

Condizioni	Fen. / Ev. pericoloso	Caso n.	Contesto	Dati importanti	Considerazione di un MMR	Classe di frequenza selezionata
Pressurizzato	Getto di fuoco	15	Flusso di 5 kg/s da una falla di 25 mm	Tutti questi casi dipendono dalla sezione, dalla sede della perdita.	Funzione nominale	C, di solito
		16	Flusso di 12 kg/s da una falla dello scarico della pompa			C, di solito
		17	Flusso di 32 kg/s da una falla di 66 mm			D, di solito
		18	Flusso di 133 kg/s da una falla di 132 mm			E, di solito
Non pressurizzato	VCE	19	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per scaricare una nave in una stazione Grand Port.	Da 10 a 50 operazioni all'anno	Funzione nominale Perdita di 30 s	C / D

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

Condizioni	Fen. / Ev. pericoloso	Caso n.	Contesto	Dati importanti	Considerazione di un MMR	Classe di frequenza selezionata
		20	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per caricare una nave tipo Traghetto in una stazione Grand Port.	Ordine di grandezza del centinaio di bunkeraggi per turno/anno (tenendo conto del traffico Traghetto/Ro Ro e Lo Lo)	Funzione nominale Perdita di 30 s	C
		21	Perdita "al 100% di sezione" in un braccio più grande usato per scaricare una nave in una stazione Grand Port.	Da 10 a 50 operazioni all'anno	Funzione nominale Perdita di 60 s	C / D
		22	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per caricare un'imbarcazione di tipo Nave Grande in una stazione Grand Port.	Tipicamente 5 operazioni / anno	Funzione nominale Perdita di 60 s	D

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

Condizioni	Fen. / Ev. pericoloso	Caso n.	Contesto	Dati importanti	Considerazione di un MMR	Classe di frequenza selezionata
Non pressurizzato	VCE	23	Tipico caso di perdita detta "a sezione del 10%" da una condotta di GNL da 8".	Da 100 a 500 m di lunghezza di tubazioni di trasferimento	Anomalia	D
					Fuoriuscita "lunga"	
		24	Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".		Funzione nominale	C / D
					Perdita di 30 s	
		25	Come sopra, tranne per il fatto che questo è una condotta da 12".		Anomalia	D
					Fuoriuscita "lunga"	
		26	Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".		Funzione nominale	C / D
		Perdita di 60 s				
27	Come sopra, tranne per il fatto che questo è una condotta da 16".	Anomalia	D			
		Fuoriuscita "lunga"				
28	Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".	Funzione nominale	C / D			
		Perdita di 60 s				

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

En plus des informations déjà enregistrées dans le Tableau 14, les observations suivantes doivent également être prises en compte.

1. Les fréquences BLEVE sont indiquées comme des intervalles allant de la classe D à celle marquée E (c'est-à-dire  $10^{-5}$  oc./an par ordre de grandeur ou moins). Les classes données en gras sont celles les plus couramment utilisées dans les études avec l'expérience de l'auteur. Les BLEVE de capacité mobile apparaissent a priori plus fréquents (même s'il faut rappeler que dans le cas spécifique du GNL, le retour d'expérience réel reste insignifiant) car ils sont considérés comme plus exposés au risque d'incendie à proximité.
2. Les autres fréquences sont exprimées avec des intervalles car leurs évaluations dépendent :
  - longueur de tube,
  - une série d'opérations de transfert qui sont à leur tour des données estimées à l'aide d'intervalles approximatifs.

Il appartient ensuite à l'utilisateur du système de codage ci-dessus de choisir une classe de fréquence plutôt qu'une autre, en comparant les données relatives à l'étude de cas avec les indications données dans la cinquième colonne du Tableau 14.

3. En outre, il est explicitement indiqué dans la sixième colonne du Tableau 14. si un MMR, c'est-à-dire une mesure d'atténuation des risques, est envisagé ou non. Comme mentionné dans le sous-chapitre précédent ou visible dans la Figure 26, une perte "longue", par exemple, ne sera observée que si :
  - l'événement de "fuite" accidentelle se produit (la fréquence dépend des données sur la longueur des tuyaux, de l'exploitation)

AND

- si le MMR d'atténuation ne sera pas opérationnel pour arrêter rapidement la perte.

La logique " AND " mentionnée ci-dessus implique une réduction de la fréquence des pertes " longues ".

Dans ces conditions, de nombreuses fréquences peuvent être réduites en fournissant un MMR. En outre, les fréquences qui ont été réduites en raison d'un MMR pourraient également être réduites davantage avec un deuxième MMR (indépendamment du premier 1).

Les fréquences mentionnées dans le Tableau 14 peuvent donc être modulées en fonction des RMM effectivement envisagés.

4. Dans certains cas, l'ajout d'un MMR peut réduire une fréquence (là encore, une perte "longue"). Cependant, le gain sur une distance d'effet peut être relativement faible ou du moins estimé comme tel. Cela permet d'expliquer à ce stade du document pourquoi certains scénarios d'accident ont été envisagés avec et sans MMR : pour guider le lecteur.
5. Il convient de noter que la probabilité d'allumage a été prise partout comme 1. C'est une hypothèse raisonnable à la lumière des pertes (plus élevées) considérées. Cependant, il est par nature excessif et le serait encore plus si les pertes de débit étaient maintenues à un niveau bas.

Enfin, dans certains règlements<sup>9</sup>, un diamètre maximal peut être attribué aux pertes les plus importantes. Ce diamètre peut être inférieur aux diamètres de fuite plus importants considérés dans ce document. Un historique des cas est donc fourni, mais sans préjuger des choix à faire pour maintenir ou non certains cas, y compris dans le cadre du règlement.

#### **5.4. Résumé des risques**

Les distances d'effet et les fréquences des phénomènes dangereux sont regroupées dans le Tableau 15.

<sup>9</sup> En France, une canalisation souterraine, considérée comme un pipeline de transport, sera associée au risque de fuite importante due à une fuite de 70 mm en l'absence de mouvement prévisible du sol. Pour les conduites aériennes, incorporées dans un ICPE, le diamètre de fuite le plus important sera généralement beaucoup plus important.

Tableau 15: Les risques associés à chaque cas

Condizione	Fenomeno pericoloso	Caso n.	Contesto	Distanze d'effetto SELS (m)	Distanze effetto SEL (m)	Distanze a effetto SEI (m)	Frequenze
Pressurizzato	BLEVE	1	Autocisterna	86	130	206	D/E
		2	Cisterna ferroviaria o cisterna di dimensioni intermedie	125	184	294	D/E
		3	Stoccaggio pressurizzato in stazione Fabbrica o Porto	166	240	386	D/E
		4	Stoccaggio pressurizzato ad alta capacità nella stazione Porto	354	484	792	D/E
Pressurizzato	VCE	5	Perdita "al 100% di sezione" in un tubo flessibile da 65 mm utilizzato per lo scarico dei camion cisterna	100	110	C/D	
		6	Perdite "al 100% di sezione" di un tubo flessibile da 80 mm durante lo scarico di petroliere in una stazione Porto	123	135	D/E	
		7	Perdite "al 100% di sezione" di un tubo flessibile da 80 mm durante lo scarico di petroliere in una stazione Porto	148	163	C/D	

Condizione	Fenomeno pericoloso	Caso n.	Contesto	Distanze d'effetto SELS (m)	Distanze effetto SEL (m)	Distanze a effetto SEI (m)	Frequenze
		8	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per scaricare una nave in una stazione Porto		440	484	C/D
		9	Perdita nota come "al 10% di sezione" di una perdita da un gasdotto GNL da 3".		60	66	D
		10	Perdite: - "a sezione del 10" da un lungo gasdotto GNL da 8", - "al 100% di sezione" da un tubo corto con un diametro di circa 3" (tubazioni di processo)		da 180 a 210	da 200 a 230	- C / D - D / E
		11	Perdite "al 100% di sezione" di un tubo con un diametro di circa 6" (condotte di processo).		290	319	D/E
		12			360	396	E

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

Condizione	Fenomeno pericoloso	Caso n.	Contesto	Distanze d'effetto SELS (m)	Distanze effetto SEL (m)	Distanze a effetto SEI (m)	Frequenze
		13	Fuoriuscita da una valvola di un singolo serbatoio, in stazioni Fabbrica o Porto.	52		57	B - C
		14	Fuoriuscita da diverse valvole nella stazione Porto.	220		242	D, di solito
Pressurizzato	Getto di fuoco	15	Flusso di 5 kg/s da una falla di 25 mm	49	53	60	C, di solito
		16	Flusso di 12 kg/s da una falla dello scarico della pompa	73	80	90	C, di solito
		17	Flusso di 32 kg/s da una falla di 66 mm	125	138	155	D, di solito
		18	Flusso di 133 kg/s da una falla di 132 mm	215	240	270	E, di solito
Non pressurizzato	VCE	19	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per scaricare una nave in una stazione Grand Port.	380		418	C / D
		20	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per caricare una nave tipo Traghetto in una stazione Grand Port.	310		340	C

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
Contribution du partenaire du projet

Condizione	Fenomeno pericoloso	Caso n.	Contesto	Distanze d'effetto SELS (m)	Distanze effetto SEL (m)	Distanze a effetto SEI (m)	Frequenze
		21	Perdita "al 100% di sezione" in un braccio più grande usato per scaricare una nave in una stazione Grand Port.	860		946	C / D
		22	Perdita "al 100% di sezione" di un braccio utilizzato per caricare un'imbarcazione di tipo Grande Nave in una stazione Grand Port.	590		649	D
		23	Tipico caso di perdita detta "a sezione del 10%" da una condotta di GNL da 8".	175		192	D
		24	Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".	140		154	C / D
		25	Come sopra, tranne per il fatto che questa è una condotta da 12".	270		297	D
		26	Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".	143		157	C / D
		27	Come sopra, tranne per il fatto che questa è una condotta da 16".	410		451	D
		28	Come sopra, ma con la diffusione contenuta in "pipeway".	151		166	C / D

Source : CCIVAR, 2020 ("Lot 3 - Analyse des risques des installations de GNL dans les zones portuaires")

TDI RETE-GNL

Produit T2.4.2 "Base de données sur les accidents et les risques"  
 Contribution du partenaire du projet

## ANNEXE 1

## LOT 3 - ANALYSE DES RISQUES LIES AUX INSTALLATIONS GNL EN ZONE PORTUAIRE

- Rapport T2.4.1 : Classification et examen des différents types de risques liés à la construction d'installations GNL en zone portuaire.
- Rapport T2.4.2 : Base de données des événements définissables comme « incidents » ou « risques » survenant dans les installations GNL en zone portuaire.
- Rapport T2.4.4 : Bonnes pratiques pour la réduction des risques et impacts du GNL.

### CCI du VAR

1	05/03/2020	Edition initiale complète	 Written By <small>Yves Mouilleau 2020.03.05 16:19:14 +01'00'</small>	 Checked By <small>Delphine Cahelo 2020.03.23 07:58:41 +01'00'</small>	 Approved By <small>M. Normand 2020.03.23 12:26:52 +01'00'</small>
0	26/02//2020	Edition initiale sans les chapitres 6 et 7	Y. MOUILLEAU	D. CAHELO-ROUX	M. NORMAND
Rév	Date JJ/MM/AA	OBJET	REDIGE (nom & visa)	VERIFIE (nom & visa)	APPROUVE (nom & visa)
REVISIONS DU DOCUMENT					

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>Objet et contexte généraux.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Objet et contexte spécifiques.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3</b>	<b>Chronologie .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4</b>	<b>Contenu.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>LE PORT DE TOULON .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Généralités .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Principaux sites .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Environnement des sites.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>INSTALLATIONS TYPIQUES .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Hypothèses et données générales quant aux trafics de GNL .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Flux-Conditions de Pression-Température- Dimensions typiques.....</b>	<b>17</b>
3.2.1	Généralités .....	17
3.2.2	Station Usine .....	19
3.2.3	Station Port.....	20
3.2.4	Station Grand Port.....	21
<b>4</b>	<b>CLASSIFICATION ET EXAMEN DES DIFFERENTS TYPES DE RISQUES .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Dangers liés au produit.....</b>	<b>22</b>
4.1.1	Généralités .....	22
4.1.2	Compositions .....	22
4.1.3	Propriétés physiques .....	24
4.1.4	Inflammabilité et combustion .....	26
4.1.5	Phrases de risques .....	31
<b>4.2</b>	<b>Dangers liés aux procédés .....</b>	<b>32</b>
4.2.1	Dangers liés aux transferts .....	32
4.2.2	Stockage pressurisé .....	33
4.2.3	Stockage non pressurisé.....	34
<b>4.3</b>	<b>Dangers liés à l'environnement .....</b>	<b>36</b>
4.3.1	Dangers liés aux conditions naturelles.....	36
4.3.2	Dangers liés aux activités anthropiques .....	37
<b>4.4</b>	<b>Accidentologie .....</b>	<b>38</b>
<b>4.5</b>	<b>Synthèse .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CARACTERISATION DES RISQUES .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Généralités.....</b>	<b>49</b>

<b>5.2</b>	<b>Gravité des phénomènes dangereux.....</b>	<b>51</b>
5.2.1	Hypothèses et approche de calculs .....	51
5.2.2	Distances d'effets.....	57
<b>5.3</b>	<b>Fréquence des phénomènes dangereux.....</b>	<b>65</b>
5.3.1	Approche, hypothèses et références.....	65
5.3.2	Fréquences des phénomènes dangereux .....	72
<b>5.4</b>	<b>Synthèse sur les risques .....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>RECOMMANDATIONS-BONNES PRATIQUES.....</b>	<b>87</b>
<b>6.1</b>	<b>Généralités.....</b>	<b>87</b>
<b>6.2</b>	<b>Règles générales de sécurité.....</b>	<b>87</b>
<b>6.3</b>	<b>Les stockages et lignes connectées.....</b>	<b>88</b>
6.3.1	Règles de conception .....	88
6.3.2	Lignes de connexion des stockages pressurisés.....	88
6.3.3	Lignes de connexion des stockages non pressurisés.....	89
<b>6.4</b>	<b>Chaine de sécurité / mmm dites instrumentées.....</b>	<b>89</b>
6.4.1	Présentation générale .....	89
6.4.2	Propriétés .....	90
<b>6.5</b>	<b>Détection.....</b>	<b>91</b>
6.5.1	Généralités .....	91
6.5.2	Détection/mesure de niveau.....	92
6.5.4	Détection/mesure de pression .....	93
6.5.6	Détection/mesure de Température .....	94
6.5.7	Détection/mesure dite LTD.....	94
6.5.8	Détection de fuite/ de feu.....	94
<b>6.6</b>	<b>Traitement.....</b>	<b>96</b>
6.6.1	Généralités .....	96
6.6.2	Traitement des événements accidentels concernant le méthanier.....	97
<b>6.7</b>	<b>Systèmes d'actions d'urgence.....</b>	<b>98</b>
6.7.1	Généralités .....	98
6.7.2	Organes d'isolement .....	98
6.7.3	Dispositifs de contrôle en cas de pression haute.....	99
6.7.4	Dispositifs de contrôle en cas de pression basse.....	100
<b>6.8</b>	<b>Systèmes de collecte des événements.....</b>	<b>101</b>

---

<b>6.9</b>	<b>Systèmes de collecte de fuite .....</b>	<b>102</b>
6.9.1	Fonctions et objectifs .....	102
6.9.3	Aires de récupération .....	103
6.9.4	Capacités de rétention .....	103
<b>6.10</b>	<b>Système de protection incendie.....</b>	<b>104</b>
<b>6.11</b>	<b>Effets dominos .....</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONS -RESUME .....</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 OBJET ET CONTEXTE GENERAUX

La Chambre du Commerce et de l'Industrie (ou CCI) du VAR est partie prenante du Programme « Marittimo-Interreg Italie-France 2014-2020 ». Il s'agit d'un programme transfrontalier cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), à hauteur de 85%, sous l'objectif Coopération Territoriale Européenne (CTE).

Afin d'appréhender la transition énergétique, le programme Marittimo a mis en place plusieurs projets concernant le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) utilisé comme carburant marin. L'un de ces projets, désigné par l'acronyme TDI-RETE GNL, a pour objectif de définir les standards technologiques et procédures communes pour le soutage GNL.

Pour atteindre cet objectif, la CCI du Var a défini ses besoins de prestations dans 6 lots, dont les contenus ne seront pas détaillés au présent document sauf pour le lot 3.

Le lot 3 est l'objet du présent document. Il est consacré à l'étude des risques associés à différentes installations et opérations dans les ports, impliquant le GNL, comme celui de Toulon.

### 1.2 OBJET ET CONTEXTE SPECIFIQUES

Au-delà des éléments généraux cités ci-avant, plus spécifiquement, il est attendu au lot 3:

- les classifications et examens des différents types de risques liés à la construction d'installations GNL en zone portuaire,
- l'établissement d'une base de données des évènements définissables comme « incidents » ou « risques » survenant dans les installations GNL en zone portuaire,
- et la définition de bonnes pratiques pour la réduction des risques associés au GNL.

Par ailleurs, il est à retenir que l'identification, l'analyse et la quantification des risques seront à faire de façon :

- générale car l'étude concerne tous les ports partenaires de la zone de coopération (la Corse, le département du Var, les régions de Ligurie et de Toscane, ainsi que la Sardaigne),

- ou plus spécifique pour intégrer les éléments caractéristiques du port de Toulon qui est un port militaire.

Selon les scénarios qui seront retenus dans chaque port, les installations et opérations à considérer sont les suivantes :

- 1- l'escale d'un navire GNL dans le port sans opération de soutage,
- 2- le ravitaillement d'un navire GNL dans le port :
  - par camions
  - par barge flottante
  - par navire souleveur
- 3- la mise en place et l'utilisation d'un groupe électrogène alimenté au GNL pour électrifier un navire à quai,
- 4- la mise en place d'une aire de chargement / déchargement / stockage de conteneurs GNL,
- 5- l'implantation d'un site de stockage GNL,
- 6- ou d'un chantier naval accueillant un navire GNL,
- 7- ou enfin d'une station-service pour camions GNL.

### 1.3 CHRONOLOGIE

Le présent document fait suite à :

- la consultation pour une « Mission d'études techniques et réglementaires (phase II) encadrant la mise en place d'une filière GNL en zone portuaire et maritime dans le cadre du programme européen MARITTIMO »,
- l'offre TechnipFMC référencée *022301S014-COM-HSED-2280-2* du 02/09/2019 répondant exclusivement au lot 3 de la consultation susmentionnée,
- l'acte d'engagement signé par les 2 parties, réceptionné le 10/09/2019,
- et l'édition du présent rapport en révision 0.

## 1.4 CONTENU

Outre la présente introduction et la conclusion, le présent rapport contient 5 chapitres principaux, à savoir :

- une présentation de la situation du port de Toulon, qui sert de support d'étude,
- une discussion relativement aux installations typiquement possibles,
- puis, 3 chapitres, dédiés aux objectifs mentionnés plus haut relativement aux types de risques à considérer après implantation d'installations GNL, la caractérisation de ces risques et les bonnes pratiques à privilégier.

## 2 LE PORT DE TOULON

### 2.1 GENERALITES

Le port de Toulon sert de « support » à l'étude, permettant de dégager des opérations et installations typiques lorsque le GNL est employé comme carburant. Il est en outre représentatif d'une situation pratique où les activités associées au GNL doivent être engagées en étant compatibles avec des activités voisines « sensibles », correspondant ici aux activités du port militaire. Dans d'autres ports, les activités sensibles voisines pourraient être différentes mais exister et à prendre en compte tout de même.

Les principaux sites du port de Toulon sont présentés ci-après. Puis, l'environnement des sites est succinctement décrit.

### 2.2 PRINCIPAUX SITES

Les principaux sites, objets d'étude, sont :

- le terminal de Brégaillon,
- le môle d'armement,
- et le port de Toulon Cote d'Azur, désigné par l'acronyme TCA

Le port de Brégaillon-La Seyne comprend 2 terminaux.

Le terminal de Brégaillon est un de ces terminaux. Il est utilisé essentiellement pour les trafics de :

- conteneurs, poids lourds, remorques, pièces détachées, etc.
- ou de vrac (matériaux comme du sable, des silicates, du sel, etc.)

Sur ce terminal, les 2 techniques de transfert de fret dites Ro-Ro<sup>1</sup> et Lo-Lo<sup>2</sup> sont utilisées. Par extension ces techniques peuvent aussi désigner les navires où elles sont opérées. Une représentation du terminal et des zones environnantes est fournie en figure suivante.

<sup>1</sup> De l'anglais « Roll-On » et « Roll-Off » signifiant littéralement « rentrer en roulant, sortir en roulant».

<sup>2</sup> De l'anglais « Lift-On » et « Lift-Off » pour désigner les chargements verticaux au moyen de grues.



**Figure 1 : Le terminal de Brégaillon (figure extraite du site [www.portsradetoulon.com](http://www.portsradetoulon.com))**

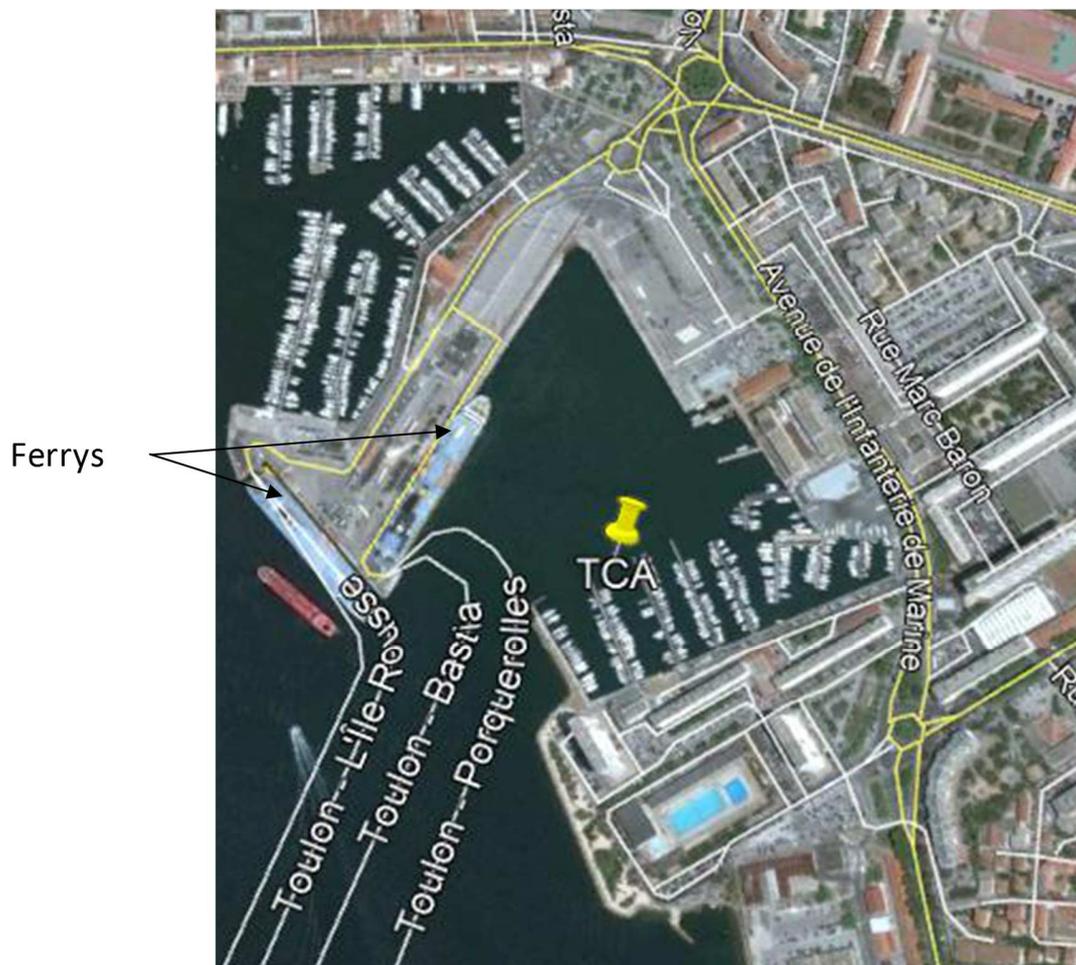
Le môle d'armement est l'autre terminal du port de Brégaillon-La Seyne. Il est utilisé pour les plus grands navires et, à ce titre, susceptible d'accueillir les plus grands navires de croisières.

Les 2 terminaux (môle d'armement et terminal de Brégaillon) sont représentés ensemble en figure suivante (tirée de la même source que la figure précédente).



**Figure 2 : Le terminal de Bregaillon et le môle d'armement du port de Bregaillon-La Seyne**

Une vue aérienne du port de Toulon Cote d'Azur est présentée en figure suivante.



**Figure 3 : Le port Toulon Cote d'Azur et son environnement proche**

Ce port dispose de quais pour les ferrys qui transportent entre 1.5 et 2 millions de passagers par an en direction de différentes îles de la Méditerranée.

Une vue aérienne permettant de situer les 3 sites est reportée en figure suivante. Les 3 sites décrits sont repérés de 1 à 3 en légende. Les Sites repérés de 4 à 9 sont des ports de plaisance.



**Activités liées au transport de biens ou de personnes**

- 1 - Terminal Passagers Toulon Côte d'Azur | Ferry, Croisière
- 2 - Terminal Brégaillon La Seyne sur Mer | Fret roulier, fret conventionnel (fret, RoRo, véhicules neufs, vrac, colis lourds, colis spéciaux)
- 3 - Terminal croisière Môle d'Armement La Seyne | Croisière

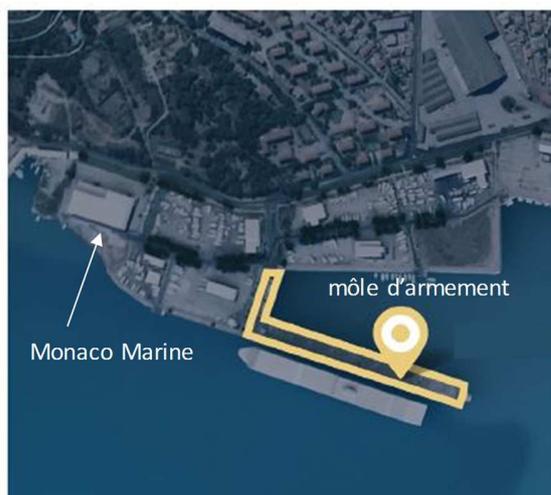
**Activités de plaisance**

- 4 - Port de Toulon Vieille Darse
- 5 - Port de Toulon Darse Nord
- 6 - Port Saint Louis du Mourillon
- 7 - Port de la Seyne sur Mer
- 8 - Port de Saint Mandrier
- 9 - Port du Niel

**Figure 4 : Vue aérienne montrant les différents sites évoqués**

Au-delà des principaux sites (port de Brégaillon, môle d'armement et TCA), il convient de citer aussi Monaco Marine qui correspond au chantier vers lequel pourront être dirigés des navires utilisant le GNL comme carburant.

Ce chantier est localisé en figure suivante.



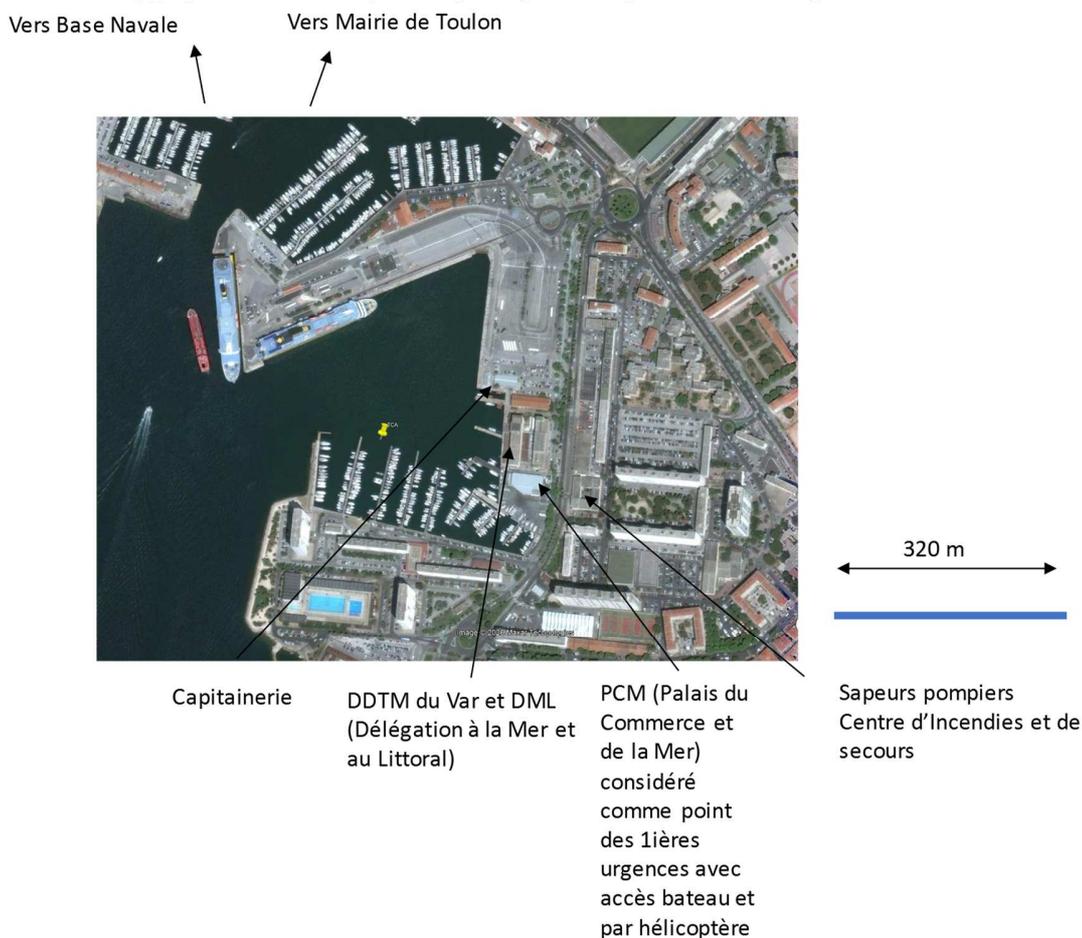
**Figure 5 : Localisation approximative du site de Monaco Marine**

### 2.3 ENVIRONNEMENT DES SITES

Relativement à l'environnement des sites, il convient sans doute de relever les éléments ci-après qui correspondent :

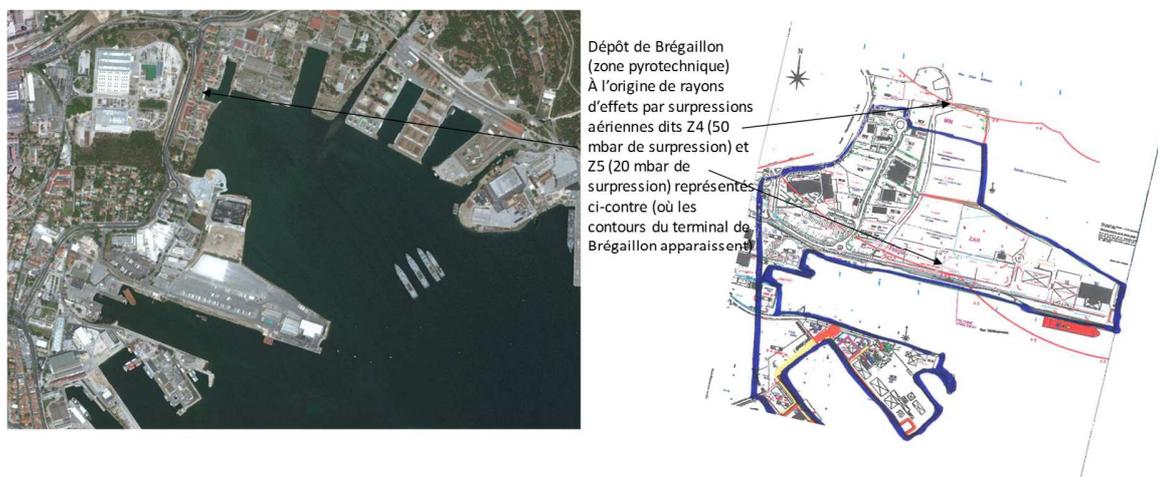
- soit à des enjeux à protéger,
- soit à des sites, eux-mêmes potentiellement sièges d'accident pouvant avoir un impact sur une installation contenant du GNL,
- soit aux 2 descriptions données ci-avant à la fois.

Les éléments typiques comme enjeux à protéger sont présentés en figure suivante.

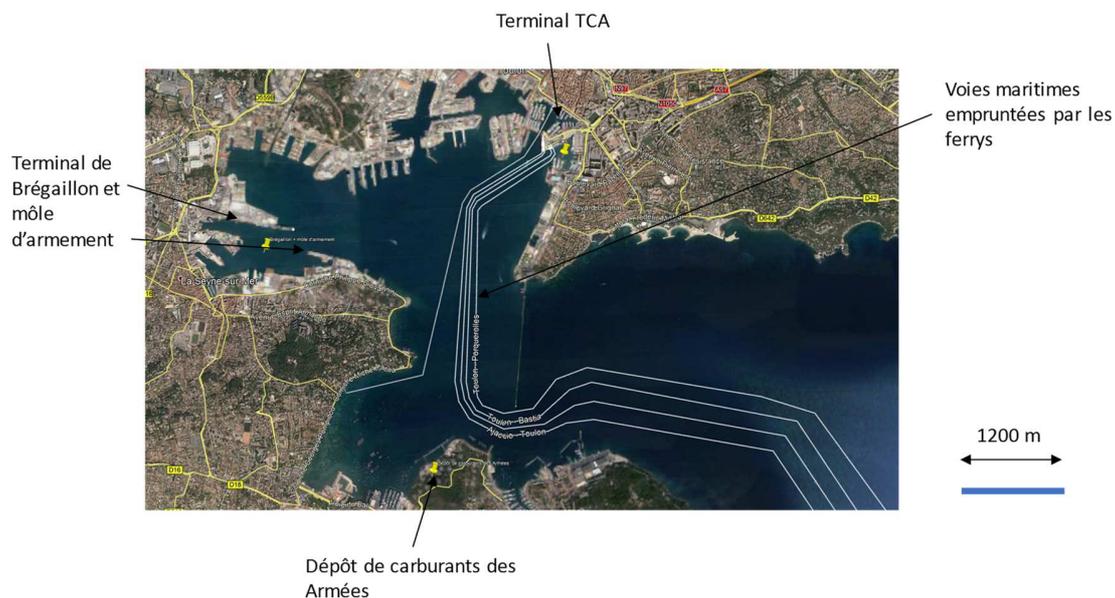


**Figure 6 : Enjeux typiques à protéger autour du Terminal TCA**

Les éléments typiques comme enjeux à protéger ou sièges potentiels d'accident pouvant avoir un impact sur une installation contenant du GNL sont présentés en figures suivantes.



**Figure 7 : Terminal de Brégaillon et Dépôt de Bréaillon**

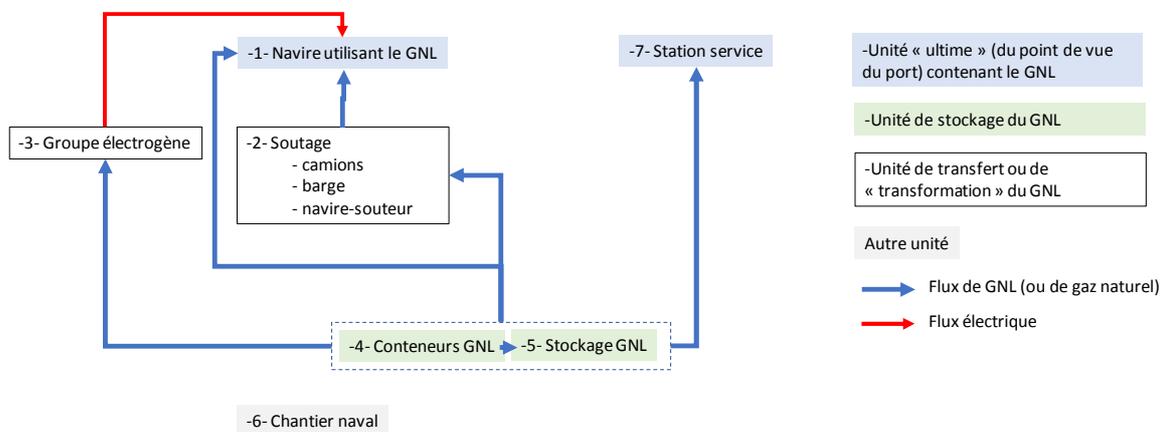


**Figure 8 : Dépôt de carburant des armées et voies maritimes des ferrys**

### 3 INSTALLATIONS TYPIQUES

#### 3.1 HYPOTHESES ET DONNEES GENERALES QUANT AUX TRAFICS DE GNL

Les installations et opérations à considérer évoquées en 1.2 sont reprises en figure suivante avec quelques liens fonctionnels.



**Figure 9 : Installations et opérations à considérer**

Les informations en figure précédente sont très qualitatives et pas à considérer de façon stricte car les schémas logistiques ne sont pas définis. A titre d'exemple :

- les opérations de soutage pourront être faites via des camions, eux-mêmes chargés éventuellement hors du port de Toulon,
- elles pourraient aussi être faites, depuis des barges flottantes (citées parmi les unités -2-), qui pourraient aussi de fait officier comme stockage (unités repérées -5-).

Selon les schémas mis en place la représentation en figure précédente pourrait donc être revue/simplifiée.

Ensuite, il est à noter qu'en figure précédente, les moyens ressortent en pratique comme étant dédiés aux 2 unités dites « ultimes » que sont :

- les navires utilisant le GNL comme carburant (unité -1-) qui sont à ravitailler (via les unités -2-, -4- ou -5-) ou à fournir en électricité (via l'unité -3-),
- ou une ou station-service (unité -7-) pour poids-lourds (fonctionnant au GN).

Dans ce contexte, le GNL peut notamment provenir d'un stockage (unité -5-) mais l'approvisionnement de ce stockage ne ressort, en l'état, que via le déchargement de conteneurs<sup>3</sup> (unité -4-). Comme il sera vu par la suite, vu les flux en jeu, d'autres moyens d'approvisionnement pourraient être à considérer.

Rebondissant sur la question des flux ou trafic GNL, la CCI du Var a communiqué les éléments repris au tableau suivant.

Type de Navire (-)	Volume de GNL par navire (m <sup>3</sup> )	Nbre d'avitaillements (-/ an)	Totaux (m <sup>3</sup> /an)
Ferry	500	230	115000
Ro-Ro ou Lo-Lo	500	160	80000
Grand Navire de croisière	3000	5	15000
			<b>210000</b>

**Tableau 1 : Trafic GNL estimé par la CCI du Var**

De fait, le tableau précédent n'intègre pas tous les flux que pourraient nécessiter l'usage de groupes électrogènes fournisseurs d'électricité ou encore qui seraient observés en présence de station-service pour les poids-lourds. Il est toutefois admis que les trafics cités au tableau précédent donnent des ordres de grandeurs convenables.

<sup>3</sup> Ces conteneurs peuvent aussi de fait constituer des stockages à vider vers les navires.

Ensuite, il n'y a pas, en l'état, d'indications sur le ravitaillement des (éventuelles) unités de stockage du port lui-même :

- celui-ci pourrait concerner un faible volume si les navires demandeurs de GNL sont principalement avitaillés par un souteur venu d'un autre port,
- ou être réparti entre des navires ou des camions-citernes par exemple venant décharger leurs contenus vers des réservoirs de stockage (qui seront eux-mêmes transférés ensuite vers les navires demandeurs)

L'incertitude ci-avant évoquée explique des fourchettes quant aux nombres d'opérations de déchargement de navires transportant du GNL ou de citernes mobiles considérées plus loin dans ce rapport.

## **3.2 FLUX-CONDITIONS DE PRESSION-TEMPERATURE- DIMENSIONS TYPIQUES**

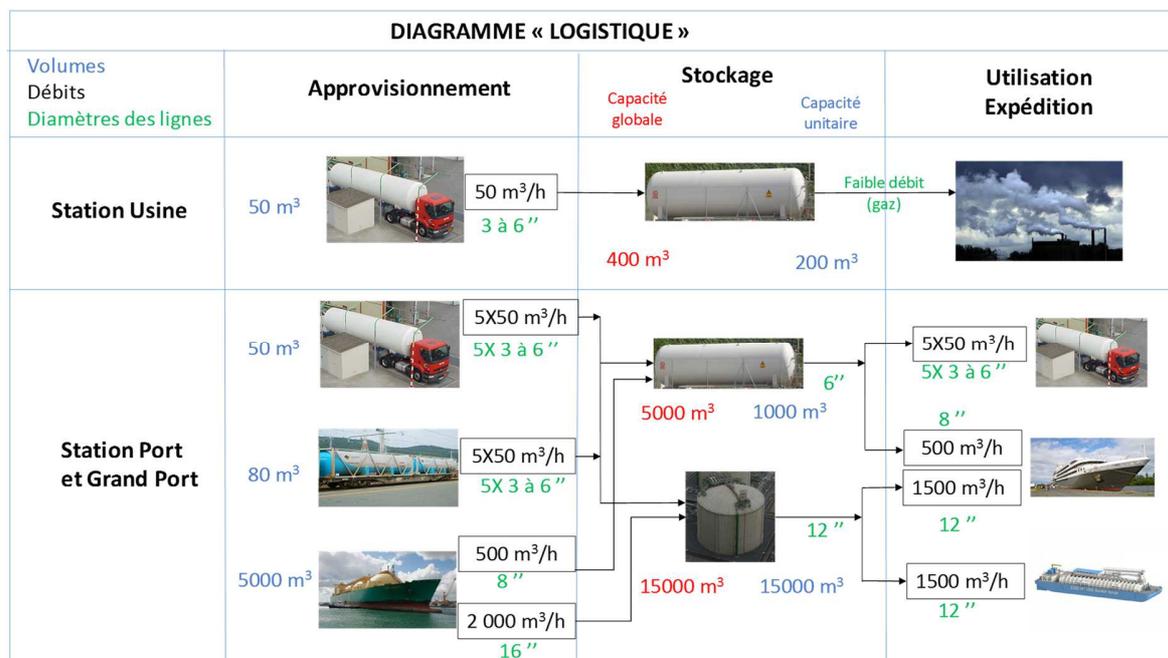
### **3.2.1 Généralités**

Au-delà des grands terminaux méthaniers (actuellement au nombre de 4 en France), disposer de GNL sur un site peut être obtenu à partir de :

- capacités mobiles comme les équipements cités à l'unité -2- (de soutage), qui peuvent provenir d'un port voisin de celui de Toulon,
- capacités transportables comme les conteneurs cités à l'unité -4-, disposés sur une aire,
- ou enfin de stations dites satellites correspondant au stockage GNL, cité à l'unité -5-.

Il est opportun de considérer les stations dites satellites comme un support pour décrire les différentes installations.

En substance, il ressort 3 types de stations selon le « diagramme logistique » retenu, comme cela est illustré au tableau suivant.



**Tableau 2 : Les différentes stations satellites GNL selon la « logistique » à satisfaire**

Au tableau précédent, sont fournis divers éléments typiques correspondant à :

- des équipements (réservoirs ou citernes mobiles surtout),
- des dimensions (volumes, diamètre de canalisation, etc.),
- et des débits.

Ces éléments seront exploités par la suite. Des précisions supplémentaires sont en outre données aux sous chapitres suivants. Pour mémoire, ces informations sont tirées de l'expérience de TechnipFMC en tant qu'ingénierie mais aussi d'échanges avec l'AFG (Association Française du Gaz).

### 3.2.2 Station Usine

La fonctionnalité première d'une station « Usine » est de permettre une alimentation continue de Gaz Naturel à une usine (d'où son nom), un exploitant industriel, situé dans une zone ou région non équipée de réseau de transport ou de distribution de gaz satisfaisant.

Il n'y a pas vraiment d'application de ce type dans le cas du port de Toulon sauf à remarquer que la liaison entre :

- par exemple des conteneurs GNL (unité -4-),
- et un ou des groupes électrogènes

peut finalement être assez comparable à ce qui est observé pour une station usine.

Ensuite, toujours en matière de correspondance entre le port et une station « Usine » générique il peut être relevé les fonctionnalités principales suivantes :

- un Poste de Déchargement de camions-citernes de GNL (n'apparaissant pas en figure 6 mais qui est « potentiel »),
- un Stockage de GNL (unité -5-),
- des Equipements de Contrôle de Pression (Vaporiseur/Event),
- des Pompes de Soutirage (optionnelles),
- des Equipements de Vaporisation du GNL,
- un Poste d'Odorisation du Gaz (optionnel),
- une Unité de régulation de pression de gaz,
- un Poste de Comptage Fiscal du Gaz (Optionnel),
- et des Unités de Contrôle/Sécurité.

Pour des raisons pratiques et d'opération, la technologie de stockage considérée est le réservoir pressurisé à double enveloppe/simple intégrité. Cette technologie offre une flexibilité opératoire intéressante pour ce type d'installation.

Des réservoirs pressurisés de toutes tailles, installés en parallèle, peuvent être utilisés. Cependant, pour mémoire, le volume maximum envisageable pour un réservoir transportable par route est de 400 m<sup>3</sup> (mais il peut s'agir d'un conteneur de 50 m<sup>3</sup> ...).

### 3.2.3 Station Port

La fonctionnalité première d'une station « Port » est d'effectuer le soutage (ravitaillement en GNL carburant) de navires. Cela semble bien correspondre à la situation du port de Toulon.

Les volumes de GNL à transférer aux navires peuvent être relativement importants (plusieurs centaines, voire milliers de m<sup>3</sup>). De ce fait, les volumes de GNL à stocker sur la station sont plus importants que pour une station « usine ».

Ce type de station est généralement approvisionné par des méthaniers adaptés, de taille moyenne, qui feront le transport du GNL entre les gros sites d'approvisionnement (terminaux méthaniers par exemple) et la station. Il peut être aussi envisagé que la station soit approvisionnée en GNL par des wagons-citernes ou des camions-citernes en fonction du contexte économique.

Une station « Port » générique comporte des équipements communs avec une station « usine (pompes de soutirage, poste de comptage, équipements de contrôle et régulation de la pression, unité de sécurité, etc.) mais aussi les équipements plus spécifiques suivants :

- un Poste de Déchargement Méthaniers,
- des Lignes de Transfert de Déchargement (GNL/GAZ) de longueurs notables (quelques centaines de m typiquement),
- un Poste de Ravitaillement Navire,
- des Lignes de Transfert de Ravitaillement (GNL/GAZ), elles aussi de longueurs notables,
- et un Poste de Chargement Camions-citernes de GNL (optionnel, unité -7-)

Pour ce type de station, la technologie de stockage est généralement un réservoir pressurisé (à double enveloppe). En raison de leurs tailles, les réservoirs pressurisés sont installés horizontalement.

Toutefois, au vu des volumes de stockage de GNL envisagés pour ce type de station (inférieur à 5000 m<sup>3</sup>), il est possible de considérer d'autres technologies de stockage comme celles dites « non pressurisée », comme cela est considéré dans le cas de la station dite « grand Port », et qui peut être adapté à la station « Port ».

### 3.2.4 Station Grand Port

La station « Grand Port » générique comporte les mêmes fonctionnalités que la station « Port » décrite ci-avant. En revanche, celles-ci sont adaptées pour le ravitaillement de plus gros navires. Ainsi, les volumes de GNL à transférer aux navires peuvent être très importants. De ce fait, les volumes de GNL à stocker sur la station sont les plus grands envisagés pour ce type d'installation.

Pour les volumes de GNL envisagés, la technologie de stockage type pressurisé n'est plus adaptée, car il faudrait installer un trop grand nombre de réservoirs. En lieu et place, un ou plusieurs réservoirs, non pressurisé(s) et de type intégrité totale<sup>4</sup> ou équivalent, est adéquat. Ce type de réservoir, pour des questions de sécurité n'a aucune pénétration sur les côtés, ni le fond du réservoir. Toutes les connections doivent passer par le toit. En conséquence, les pompes de soutirage de GNL doivent être installées dans le réservoir (immergées).

La technologie de stockage, à une pression voisine de la pression atmosphérique, a un impact direct sur l'opération et nécessite le maintien et le contrôle de la pression en permanence.

Il peut être aussi envisagé que toute la station soit installée en mer, à l'écart du port, sous la forme d'une barge flottante ou d'une structure en béton appelée « Gravity Based Structure », ou GBS, destinée à reposer sur les fonds marins à faible profondeur.

---

<sup>4</sup> Réservoirs conçus avec un double confinement, le produit pouvant être contenu en totalité (phases liquides comme vapeurs) dans le second confinement en cas de perte du premier.

## 4 CLASSIFICATION ET EXAMEN DES DIFFERENTS TYPES DE RISQUES

Au travers des termes du titre de ce chapitre, il est considéré la problématique d'identification des risques/dangers.

Classiquement, celle-ci est faite en examinant :

- a) les dangers liés aux produits,
- b) les dangers liés aux opérations,
- c) et les dangers liés à l'environnement.

Ces étapes sont commentées ci-après. Les accidents passés, observés sur des installations au moins comparables, sont ensuite passés en revue pour vérifier la cohérence avec les éléments ressortant de ces étapes.

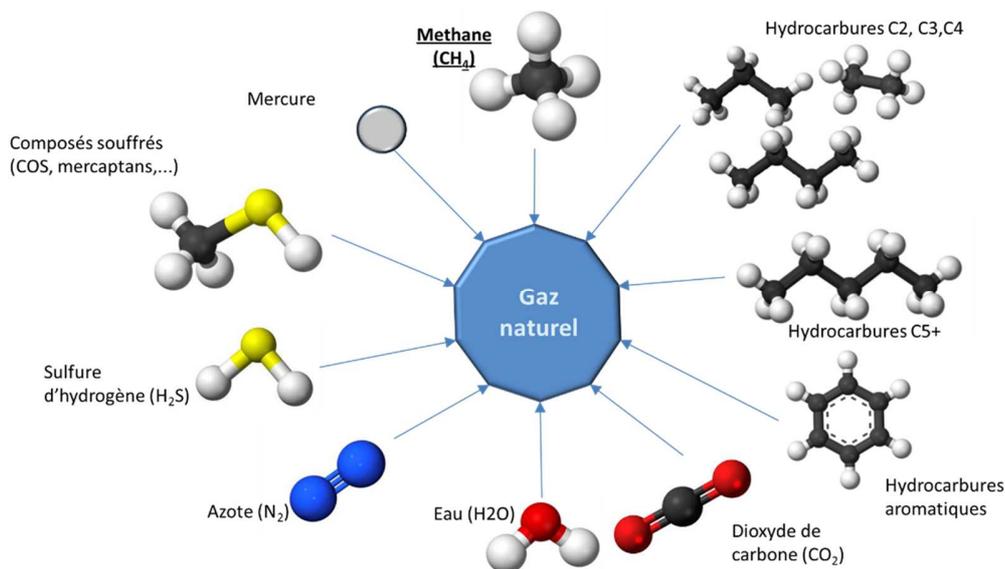
### 4.1 DANGERS LIES AU PRODUIT

#### 4.1.1 Généralités

Le gaz naturel est sans odeur, non corrosif et généralement non toxique par inhalation. Pour sa part, le GNL est l'état liquéfié du gaz naturel et il ne peut exister à pression atmosphérique qu'en le maintenant à une température inférieure à sa température d'ébullition (environ -160°C). Les propriétés du GNL varient avec sa composition. Celles-ci restent toutefois relativement proches de celles du méthane qui constitue le composant majoritaire des différents types de gaz naturels.

#### 4.1.2 Compositions

Le GNL est un mélange de différents composés (voir figure ci-dessous) dont la proportion varie en fonction des caractéristiques du gisement de gaz naturel d'origine. Le méthane reste cependant le composé très majoritaire.



**Figure 10 : Composition d'un gaz naturel**

Avant liquéfaction, le gaz naturel est traité de sorte que les proportions des différents composants peuvent être modifiées. Ainsi :

- l'eau est extraite pour éviter le gel lors de la liquéfaction,
- le dioxyde de carbone est extrait pour éviter le gel, la corrosion et augmenter la capacité calorifique du gaz naturel,
- les composés sulfurés sont extraits pour éviter les problèmes de corrosion et réduire la toxicité jusqu'à la rendre négligeable,
- l'azote est extrait pour augmenter la capacité calorifique du gaz naturel,
- le mercure est extrait car il peut endommager certains équipements,
- etc...

Des compositions types ne reprenant que les principaux constituants sont fournies dans le tableau ci-après en fonction de l'origine du gaz naturel.

Composants	Pourcentage volumique selon la provenance			
	Trinité et Tobago	Algérie	Nigéria	Oman
<b>Méthane</b>	96.9	87.93	91.692	87.876
<b>Ethane</b>	2.7	7.73	4.605	7.515
<b>Propane</b>	0.3	2.51	2.402	3.006
<b>Butane</b>	0.1	1.22	1.301	1.603
<b>C5+</b>	-	0.61	-	-
<b>Total</b>	100	100	100	100

**Tableau 3: Compositions typiques du GNL selon la provenance**

Pour mémoire, il est fait une distinction entre :

- le GNL dit « léger » composé à environ 97% (vol.) de méthane,
- et, le GNL dit « lourd » faisant référence aux compositions à environ 88% (vol.) de méthane.

#### 4.1.3 Propriétés physiques

Le tableau suivant permet de comparer quelques propriétés de différents GNL ainsi que du méthane pur.

	Méthane	GNL (Trinité et tobago)	GNL (Algérie)	GNL (Nigéria)	GNL (Oman)
<b>Masse molaire (g/mol)</b>	16.043	16.55	18.77	17.91	18.615
<b>Température d'ébullition à pression atmosphérique (°C)</b>	-161.5	-161.05	-159.9	-160.4	-159.9
<b>Masse volumique du liquide à température d'ébullition (kg/m<sup>3</sup>)</b>	422.5	430.9	452.9	452.8	463.6
<b>Masse volumique des vapeurs à température d'ébullition (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.81	1.799	1.783	1.776	1.763
<b>Masse volumique des vapeurs à 20°C</b>	0.6685	0.6894	0.7829	0.7459	0.7751

**Tableau 4: Propriétés physiques du GNL selon la provenance**

Il ressort ainsi que :

- les propriétés physiques restent globalement comparables à celles du méthane (avec des écarts de moins de 20%),
- la basse température d'ébullition (~-160°C) classe le GNL dans la catégorie des fluides dits « cryogéniques » dès lors qu'il est stocké à pression atmosphérique,
- les vapeurs de GNL à température ambiante sont plus légères que l'air,
- mais qu'à température d'ébullition, elles sont au contraire plus lourdes que l'air ; pour mémoire, ceci a une influence sur le mélange du produit avec l'air en cas de perte de confinement (voir plus loin).

*NOTA : la norme ISO 20765-2 :2015 permet de calculer les propriétés thermodynamiques selon la composition du gaz naturel au besoin.*

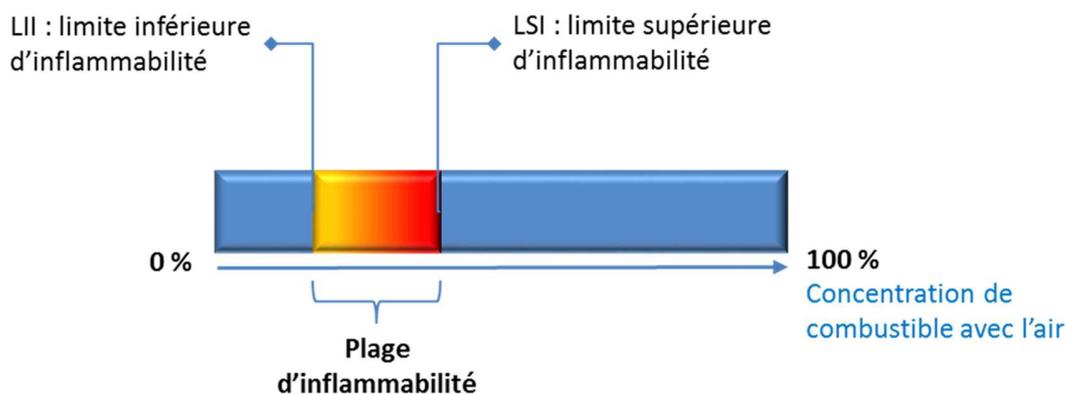
Ensuite, au-delà des propriétés évoquées ci-avant et comme rappelé plus haut, le GNL ou le gaz naturel ont pour propriété essentielle d'être inflammables. Cette propriété est caractérisée au sous chapitre suivant.

#### 4.1.4 Inflammabilité et combustion

Dans ce sous chapitre, sont répertoriées la plupart des propriétés importantes pour l'étude des phénomènes dangereux liés à la combustibilité du GNL.

##### a) Plage d'inflammabilité

Le gaz naturel ou les vapeurs de GNL, du fait des constituants principaux, sont des gaz inflammables. Un mélange de ces gaz avec l'oxygène de l'air n'est toutefois susceptible de s'enflammer que si la concentration de gaz naturel est comprise dans la plage d'inflammabilité, illustrée en figure suivante.



**Figure 11: Plage d'inflammabilité**

En pratique, la plage d'inflammabilité d'un gaz naturel ou GNL va dépendre de sa composition, mais elle reste relativement proche de celle du méthane, comme en atteste les valeurs indiquées au tableau suivant.

	Méthane	GNL « léger »	GNL « lourd »
Plage d'inflammabilité	5% - 15 % (volumique)	4.9% - 14.9 % (volumique)	4.4% - 14.4 % (volumique)

**Tableau 5: Plage d'inflammabilité du GNL**

Au sein de la plage d'inflammabilité, se trouve la concentration dite « stœchiométrique » qui est la proportion optimale telle qu'en cas d'inflammation :

- tout le combustible sera brûlé,
- et ce, sans excès et sans défaut d'air ; autrement dit, avec réaction de la totalité de l'air contenu initialement dans le mélange.

C'est généralement à cette concentration que les effets de combustions accidentelles sont les plus dangereux. Pour le méthane, la concentration stœchiométrique est de 9.5% (volumique).

Pour mémoire, les valeurs répertoriées dans le tableau précédent correspondent aux plages d'inflammabilité dans les conditions ambiantes.

Cette plage d'inflammabilité dépend en fait des conditions de pression et température. Les variations typiques de pression et de température ambiantes ne sont pas suffisantes pour la modifier significativement. En revanche en cas de fuite de GNL, la température du mélange gaz naturel (issu de la vaporisation du GNL) / air pourrait être bien inférieure à la température ambiante. Les variations des limites d'inflammabilité à des températures faibles sont données dans les figures suivantes.

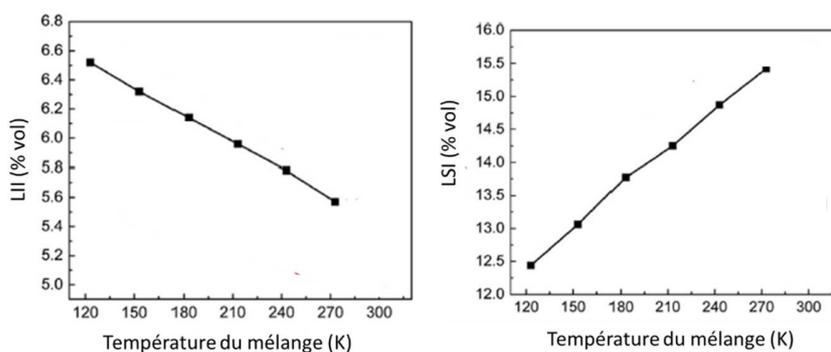


Figure 12: Variation des limites d'inflammabilité aux basses températures

Il est ainsi observé que plus la température du mélange méthane/air est faible et plus la LII augmente et la LSI diminue. En d'autres termes, plus la température du mélange diminue, et plus l'intervalle d'inflammabilité se réduit. Ainsi, à 120 K (ou  $-153^{\circ}\text{C}$ ) la plage d'inflammabilité du méthane est réduite à l'intervalle entre 6.5% et 12.5% (vol.).

b) Sensibilité à l'inflammation

Les données fournies ici sont caractéristiques du méthane. Elles peuvent être appliquées en première approche au gaz naturel.

L'énergie nécessaire à l'inflammation d'un nuage méthane/air dépend de la concentration en méthane dans le mélange.

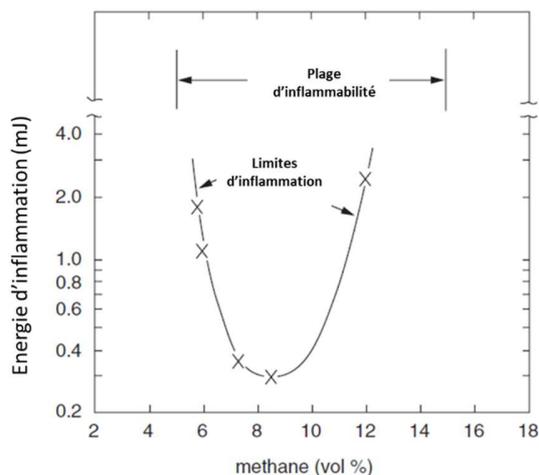
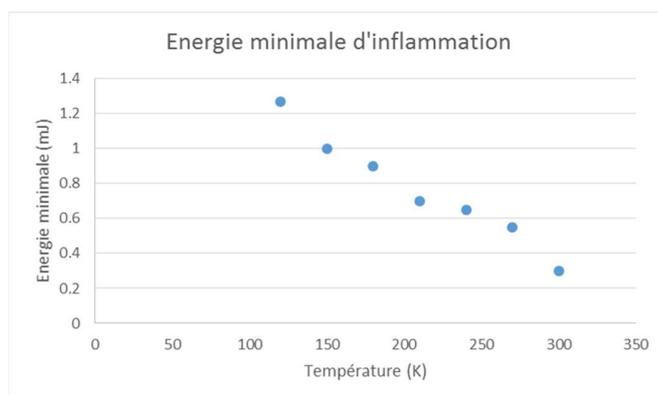


Figure 13: Energie minimale d'inflammation en fonction de la concentration

L'énergie nécessaire à l'inflammation est d'autant plus faible que la concentration en méthane est proche de la concentration stœchiométrique (de l'ordre de 0.3 mJ). Cette énergie minimale peut aussi varier avec la température. Ainsi la figure suivante montre que plus la température du mélange est faible et plus il faut fournir d'énergie pour enflammer le mélange.



**Figure 14: Energie minimale d'inflammation en fonction de la température**

Pour mémoire, au-delà des valeurs rappelées ci-avant, le méthane n'est pas réputé comme le gaz le plus sensible à l'inflammation ; des gaz comme l'éthylène ou l'hydrogène sont bien plus sensibles. Il est ainsi classé à réactivité « moyenne » selon la figure suivante. Dans l'ouvrage « Reference Manual Bevi Risk Assessment » (RIVM, 2009) le méthane est classé « faible », relativement à l'inflammabilité.

En pratique, il reste tout de même relativement facile à enflammer puisque les intensités d'énergies d'inflammation mentionnées correspondent en fait à des sources telles que des étincelles mécaniques, des courants vagabonds ou des points chauds.

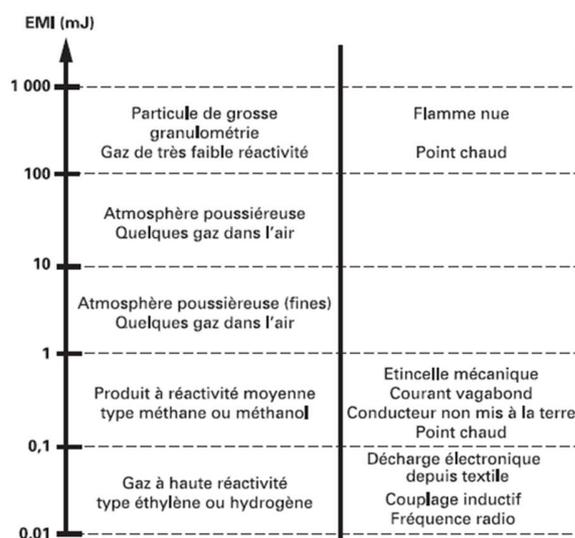


Figure 15: Energie de différentes sources d'inflammation

*Remarque : Lorsqu'un mélange inflammable est porté à une certaine température il n'a plus besoin de source d'inflammation pour initier la combustion. Cette température dite d'auto inflammation est de 535°C pour un mélange méthane/air stœchiométrique. Ces conditions ne sont pas susceptibles d'être rencontrées sur les installations considérées, hors situation d'ores et déjà accidentelle.*

c) Energie dégagée et vitesse de combustion

Relativement aux situations accidentelles, outre les limites d'explosivité (synonyme d'inflammabilité dans le contexte), 2 propriétés sont importantes : la quantité d'énergie libérée par la combustion et la vitesse à laquelle cette énergie est libérée.

	Méthane	GNL « léger »	GNL « lourd »
Energie de combustion (MJ/kg)	50.04	49.86	49.2

Tableau 6: Energie combustion du GNL selon la provenance

L'énergie de combustion des GNL est globalement fixée par la teneur en méthane. L'écart en termes d'énergie n'est pas significatif du point de vue des phénomènes accidentels.

La vitesse de combustion du méthane rend compte de sa réactivité en cas d'inflammation et par suite a une influence si les conditions d'une explosion sont réunies.

La vitesse de combustion en régime laminaire du méthane avec l'air est de l'ordre de 0.45 m/s. A titre de comparaison, le propane a une vitesse laminaire de 0.52 m/s et l'hydrogène de 1.2 m/s. En ce qui concerne le phénomène dangereux d'explosion, le méthane est considéré comme un gaz à « faible » réactivité. En pratique et à titre d'illustration, il peut être retenu que toutes choses étant égales par ailleurs, il donnera des surpressions inférieures d'environ 40% à une explosion similaire mais impliquant du propane.

#### 4.1.5 Phrases de risques

Les phrases de risques fréquemment retenues selon le règlement CE 1272/2008 lorsque des fiches de sécurité à propos du gaz naturel ou du GNL sont consultées sont les suivantes :

- H220 : gaz extrêmement inflammable,
- H280 : contient un gaz sous pression ; peut exploser sous l'effet de la chaleur,
- H281 : contient un gaz réfrigéré ; peut causer des brûlures ou des blessures cryogéniques.

La 1<sup>ière</sup> phrase ci-avant est bien sûr liée aux propriétés évoquées au sous chapitre précédent. Elle implique les dangers :

- d'incendie, qui comme vu plus loin peuvent se présenter sous forme de jets enflammés ou de feux de nappe,
- et aussi d'explosion en cas de mélange avec l'air préalablement à l'inflammation ; ce type d'explosion est appelée VCE, pour « Vapour Cloud Explosion ».

Les 2 phrases suivantes sont liées aux conditions de procédé usuelles. Pour être disponible en quantité convenable au regard des besoins, le gaz naturel est en effet :

- soit stocké sous pression,
- soit liquéfié (c'est alors du GNL), à température très basse (-160°C environ).

Les dangers associés à ces différents états sont détaillés au sous chapitre suivant.

## 4.2 DANGERS LIES AUX PROCEDES

Sans entrer dans les détails de toutes les opérations, les procédés consistent en l'occurrence principalement en :

- des opérations de transfert,
- ou de stockage

comme en atteste la figure 6.

Les principaux dangers liés aux opérations de transfert sont considérés d'abord, puis ceux liés aux différents types de stockage (pressurisé ou non) sont abordés.

Aucun chapitre n'est consacré aux dangers, pourtant effectifs, à associer aux fuites depuis des soupapes (défectueuses), des défauts d'étanchéité entre 2 équipements, etc.

Par ailleurs, le GNL, comme tous les gaz liquéfiés, ne doit pas être contenu dans un tronçon de tuyauterie susceptible d'être totalement fermé et exposé à la chaleur de l'environnement, sous peine de montée en pression jusqu'à rupture. De la même façon que pour les défauts d'étanchéité, ce point -pourtant important- ne sera pas plus développé.

### 4.2.1 Dangers liés aux transferts

D'une façon générale, les transferts entre capacités impliquent des risques de sur-remplissage des capacités réceptrices. Un sur-remplissage conduit ensuite à :

- un écoulement de liquide dans les tuyauteries dédiées à la phase vapeur lorsque les phases vapeurs des 2 capacités (celle déchargée et celle en réception) sont reliées ; ce type d'événement peut être sans conséquence,
- un débordement par les soupapes si les phases vapeurs n'ont pas été reliées, et par suite il y a dangers d'incendie ou de VCE,
- et, à l'extrême, à l'endommagement de la capacité réceptrice, pouvant aller jusqu'à sa rupture ; les dangers sont alors ceux exposés aux sous chapitres suivants, selon la nature du stockage.

La particularité des débordements tient dans le fait que les rejets accidentels sont alors en hauteur et dirigés verticalement depuis des soupapes ou événements.

Ensuite, vu la figure 6, bien des opérations de transfert font intervenir au moins une capacité mobile (citerne d'un camion, navire souleveur, etc.). Dans ce type de configuration, le risque de rupture du bras ou du flexible de transfert est notable en raison d'un mouvement non maîtrisé d'une capacité mobile. Dans le contexte, certains transferts concernent des navires. Il s'ensuit qu'en cas de rupture du bras ou flexible, le GNL rejeté accidentellement pourra tomber à l'eau. Par suite, il pourra être observé un VCE après inflammation du mélange de vapeurs et d'air et un feu de nappe sur l'eau. Cela étant un autre danger, décrit ci-après, est à considérer au préalable dans ce type de situation.

Le GNL se trouve généralement à une température de  $-160^{\circ}\text{C}$ . Au contact avec l'eau, à température ambiante, les transferts de chaleur intenses peuvent engendrer une vaporisation très « brutale » du GNL. Le changement de phase puis l'expansion des vapeurs à l'atmosphère peut ensuite « repousser » l'air ambiant avec suffisamment de force pour engendrer des ondes de pression (ou de choc) et par suite s'apparenter à une explosion. Celle-ci est alors souvent appelée RPT (de l'anglais « Rapid Phase Transition<sup>5</sup> »).

#### 4.2.2 Stockage pressurisé

Les conditions de Pression-Température pour ce type de stockage sont de :

- quelques bar relatifs, typiquement , 3 (mais des pressions de 8 à 11 bar relatifs sont possibles),
- et la température correspondant aux conditions d'équilibre thermodynamique, à savoir  $-140^{\circ}\text{C}$  environ pour la pression relative susmentionnée par exemple.

Le stockage sous pression -mais aussi les transferts par pompe, les écoulements en vaporisateur et autre réchauffeur, en stockage fixe ou dans une citerne, etc.- implique plusieurs dangers :

- en cas de perte « brutale » de confinement, potentiellement, une masse importante de gaz initialement sous pression tendra à occuper un volume beaucoup plus grand dans l'atmosphère ; une telle expansion volumétrique s'opère « en repoussant » l'air et cela s'accompagne d'ondes de choc qui peuvent elles-mêmes engendrer des dommages ; ce type de phénomène est parfois appelé « explosion pneumatique »,
- en outre, dans le cas de GNL, l'expansion volumique susmentionnée peut concerner la phase vapeur (le gaz) mais aussi la phase liquide (liquéfiée en pratique) ; pour celle-ci

<sup>5</sup> Cela fait référence au passage de la phase liquide à la phase vapeur.

l'expansion volumique est même encore plus notable ; le phénomène est alors appelé BLEVE,

- en cas de perte de confinement moins « brutale », limitée à une canalisation ou une fraction de section de rejet dans une canalisation sous pression, le LNG rejeté sera animé d'une quantité de mouvement notable ; l'écoulement observé sera un jet et ce type d'écoulement a une influence sur la masse explosible (avec l'air), la distance comptée depuis le jusqu'où un mélange est explosible, etc.,

En cas d'inflammation concomitamment ou postérieurement à une perte de confinement, il convient de considérer des effets thermiques liés à :

- une boule de feu (en cas de BLEVE),
- un jet enflammé, et potentiellement (voir plus loin), un feu de nappe.

Si l'inflammation est observée après mélange avec l'air et formation d'un volume explosible, des flammes se propageront au travers de celui-ci avec :

- à nouveau des effets thermiques,
- mais aussi, selon la vitesse des flammes, des effets de pression.

Dans ce dernier cas, appelé VCE comme indiqué plus haut, les effets de pression sont dus à l'expansion volumique liée au passage d'un mélange méthane-air à température ambiante ou en dessous de l'ambiante à un mélange de gaz brûlés, beaucoup plus chauds.

### **4.2.3 Stockage non pressurisé**

Les conditions de Pression-Température pour ce type de stockage sont de :

- une pression voisine de la pression atmosphérique et limitée à 0.1 ~0.15 bar (relatif),
- et, à nouveau, la température correspondant aux conditions d'équilibre thermodynamique, et soit donc proche de -160 °C.

Les conditions de procédé ou de stockage dites cryogéniques (avec des températures voisines de -160 °C) impliquent plusieurs dangers ou risques.

Tout d'abord, il convient de citer les transferts « intenses » de chaleur entre :

- le GNL, très froid,
- et les matériaux à température ambiante, dont notamment des métaux,

en cas de contacts accidentels. Ceux-ci peuvent être observés :

- en cas de perte de confinement et d'écoulement du GNL non maîtrisé vers un réservoir contenant un autre produit dangereux, un élément important (comme la coque d'un navire), etc.,
- ou encore, sans fuite préalable, lorsque du GNL est soudainement dirigé (et à fort débit) vers une canalisation, dédiée au GNL, initialement à température ambiante ; ce type de situation est propice à la fragilisation<sup>6</sup> du métal de la canalisation et à une fuite.

Comme évoqué plus haut, lorsque les transferts de chaleur sont en plus promus par une surface de contact importante observée par exemple lorsque le GNL(froid) se mélange à de l'eau (à température ambiante), il y a alors risque de RPT et par suite d'effets de pression.

Enfin, les stockages de GNL cryogéniques peuvent être sièges du phénomène dangereux appelé Roll-Over. Sans entrer dans les détails, ce phénomène est succinctement décrit ci-après :

- un réservoir de GNL peut comporter différentes strates ou couches de liquide se trouvant dans des conditions de pression-température différentes (la couche inférieure est sous la pression hydrostatique des couches supérieures -et est par suite plus élevée- et les températures, voire les compositions du GNL, peuvent varier d'une couche à l'autre),
- dans certaines conditions, les couches supérieures, initialement moins denses, peuvent s'alourdir,
- alors que dans le même temps, les couches inférieures, initialement plus denses peuvent s'alléger,
- ce processus peut perdurer jusqu'à ce que les positions des couches s'inversent, les couches du haut passant en bas et celles du bas remontant vers le haut (d'où la désignation « Roll-Over »),
- or, la remontée des couches inférieures peut s'accompagner d'une vaporisation assez massive pour, dans certains cas, endommager les dômes des réservoirs.

---

<sup>6</sup> Normalement évitée grâce aux procédures de mise-en-froid progressives (et pas brutales).

Tous les phénomènes précédents sont cités pour mémoire car :

- ils permettent de mieux comprendre le déroulement de certains accidents,
- méritent d'être cités car spécifiques au procédé avec des conditions cryogéniques (comme les RPT) mais ne sont pas dimensionnants par rapport aux phénomènes de jets enflammés, de BLEVE ou de VCE déjà cités plus haut
- ou car ils concernent a priori des réservoirs de plus grande taille que ceux considérés (pour le phénomène de Roll-Over).

Ils ont des portées directes moins importantes que les incendies ou VCE et ne seront donc plus évoqués par la suite.

## **4.3 DANGERS LIES A L'ENVIRONNEMENT**

### **4.3.1 Dangers liés aux conditions naturelles**

Les principaux éléments à considérer sont :

- l'inondation ou submersion,
- la foudre
- et le séisme

D'autres éléments comme des vents ou températures extrêmes peuvent entrer dans une analyse des risques mais ils sont couramment pris en compte par les règles générales de construction.

L'inondation ou le séisme sont des phénomènes naturels à même d'engendrer les fuites majeures, et par suite les phénomènes dangereux (VCE et jet enflammés) déjà évoqués. La foudre peut à la fois endommager des équipements et provoquer des fuites mais aussi être source d'inflammation.

Ces éléments n'amènent pas de phénomènes dangereux liés au GNL, non déjà évoqués.

En revanche, ils doivent être maîtrisés par d'éventuelles mesures spécifiques.

Ainsi, pour la maîtrise des risques d'inondation, des dispositions peuvent être prises pour supporter :

- les efforts verticaux dus à la poussée d'Archimède dans le cas des réservoirs sous pression,
- les efforts horizontaux dus au courant, aux embâcles pour tous les réservoirs,...

De la même façon, en France, les installations font obligatoirement l'objet d'une « Etude Foudre ».

S'agissant du séisme, toujours en France, lorsque la capacité de stockage excède 50 t des règles de dimensionnement au séisme doivent être satisfaites. En substance, l'analyse de risques doit déterminer si une défaillance d'équipements à la suite d'un séisme conduit à un scénario avec effets graves<sup>7</sup> sur une zone à « occupation humaine permanente ». Un tel scénario implique alors de dimensionner l'équipement (réservoirs, canalisations, ...) à un séisme dont les caractéristiques sont fixées dans la réglementation.

#### **4.3.2 Dangers liés aux activités anthropiques**

Les activités à prendre en compte sont généralement :

- le transport,
- et les activités industrielles voisines.

Un événement accidentel depuis ce type d'environnement n'engendre pas de phénomènes dangereux impliquant le GNL, non déjà évoqués.

En revanche, des dispositions de maîtrise des risques peuvent être prises pour :

- limiter les risques de collisions associés au transport,
- et, le cas échéant, les risques d'effets dits dominos, déclenchés par un accident au sein des installations voisines.

En pratique, il s'agit le plus souvent de choix dans les implantations.

---

<sup>7</sup> Comprendre effets à même d'engendrer au moins 1% de létalité sur la population exposée.

#### 4.4 ACCIDENTOLOGIE

Sur une période de 50 ans environ, il peut être relevé les accidents succinctement décrits au tableau suivant. Les installations, sièges de ces accidents, sont qualitativement comparables avec celles envisagées dans cette étude « à un facteur d'échelle près », parfois. En pratique, bien des accidents ont en effet été observés sur des terminaux méthaniers, a priori plus importants en matière par exemple de capacité de stockage qu'une station Grand Port.

Date	Lieu	Installations	Phénomènes	Causes possibles
2015	Barcelone	Terminal GNL	Sur-remplissage cuve de navire	Tank Protection System désactivé et position incorrecte vanne de cuve
2014	Risavika (Norvège)	Poste d'avitaillement	Petite fuite de GNL	Tension sur la connexion du flexible
2011	Rotterdam	Terminal GNL	Petite fuite	Travaux de maintenance
2011	Milford Haven	Méthanier en déchargement	Petite fuite	Fuite sur capteur de température
2010	Nigeria	Méthanier en chargement	Forte gite	Erreur de ballastage
2010	Montoir	Méthanier en déchargement	Dommage sans fuite sur conduite navire	GNL dans circuit des évaporations
2009	Indonésie	Réservoir	Fuite sur manifold	Mise en froid incorrecte
2006	Jordanie	Méthanier en déchargement	Fuite enflammée	Fuite phase gazeuse
2006	USA	Méthanier en déchargement	Rupture d'amarrage sans fuite	Sillage de navire passant à proximité
2003	Fos	Terminal GNL	Explosion et feu	Fuite de drain de torchère
1997	Angleterre	Réservoir	Fuite gazeuse	Installation de densitomètre
1994	USA	Méthanier en déchargement	Rupture d'amarrage sans fuite	Amarrage défectueux

Date	Lieu	Installations	Phénomènes	Causes possibles
1991	-	Terminal GNL	Dommages sur rack sans fuite	Mouvement de grue
1989	Algérie	Méthanier en chargement	Rupture d'amarrage avec fuite sur bras/tuyauterie	Vent fort
1988	USA	Terminal GNL et méthanier en déchargement	Fuite sur soupape de bras	Soupape défectueuse
1988	USA	Terminal GNL et méthanier en déchargement	Fuite liquide sur ligne de drainage	Coup de bélier lors d'une reprise de déchargement
1985	-	Terminal GNL	Dommages sur canalisations sans fuite	Chute de grue (sol de mauvaise qualité)
1985	-	Terminal GNL et méthanier en déchargement	Fuite sur pont avec dommages	Sur-remplissage du réservoir
1983	Japon	Terminal GNL et méthanier en déchargement	Fuite sur bras en phase de mise en froid	Mise en marche moteur navire
1982	Asie	Terminal GNL et méthanier en déchargement	Fuite sur bras avec dommages sur appontement et navire	Mouvement navire
1980	-	Méthanier	Fuite vapeur sur bras	Déconnexion de bras
1979	USA	Méthanier en déchargement	Fuite sur clapet anti-retour	Clapet défaillant
1978	EAU	Réservoir	Brèche sur piquage de fond dans la double-enveloppe avec émission gazeuse	Fissures de contraintes thermiques
1977	Indonésie	Terminal GNL et méthanier en chargement	Débordement liquide par évent	Alarme de jauge mise hors-service

Date	Lieu	Installations	Phénomènes	Causes possibles
1977	Algérie	Réservoir	Rupture de vanne sur toit et épandage massif sans inflammation	Mauvais matériau (alliage d'aluminium)
1974	USA	Terminal GNL et barge en chargement	Fuite par vanne de purge sur pont	Coup de bélier après panne électrique
1971	Italie	Terminal GNL	Ouverture soupape réservoir  Dommage mineur au toit	Roll-over

**Tableau 7 : Retours d'expériences impliquant des installations GNL dans des ports**

En matière d'enseignements, et même s'il ne peut être dégagé de statistiques détaillées d'éléments aussi parcellaires que ceux-ci-avant, il ressort tout de même que :

- des fuites ont régulièrement été observées lors des opérations de transfert entre navires et quais (cf. 4.2.1),
- les cas de sur-remplissage (avec comme conséquence des fuites) lors des opérations de réapprovisionnement des unités des stockage ont été observés (cf. 4.2.1 à nouveau),
- des fuites ont été initiées par diverses causes, pas spécialement spécifiques au GNL (Chute de grue par exemple), sauf peut-être lorsque la mise en froid (procédure défectueuse, contraintes thermiques ? comme évoqué en 4.2.3) est citée.

Par ailleurs, il est aussi à relever qu'il n'y a pas de cas de BLEVE même si 2 accidents de ce type ont été observés sur des camions-citernes. Ces cas (observés en Espagne) ne figurent pas dans le tableau précédent car ils se sont produits sur la voie publique, sur des camions à simple enveloppe de type « calorifugé ». Pour mémoire, plusieurs terminaux méthaniers en Europe interdisent l'accès à leurs installations à ces véhicules dont la technologie est aujourd'hui interdite par l'ADR pour les nouveaux véhicules.

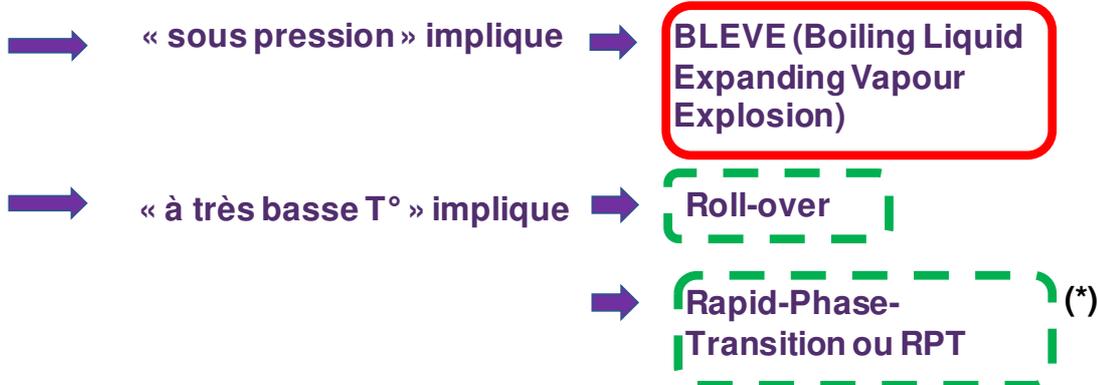
## 4.5 SYNTHÈSE

Il ressort finalement les phénomènes dangereux tels qu'illustrés en figure suivante.

### Dangers liés au GNL : combustible !



### Dangers liés aux procédés : sous pression ou à T° très basse



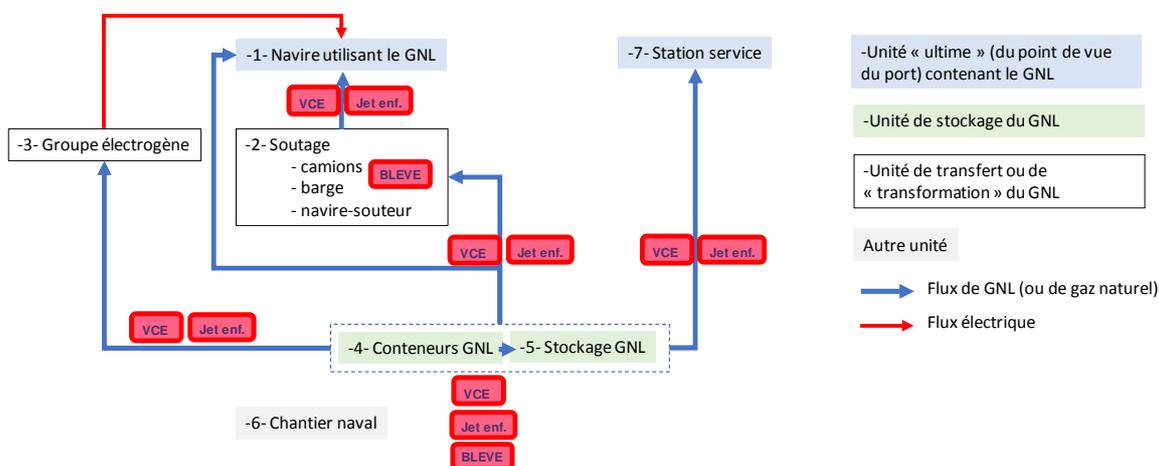
Ph. Dangereux aux effets les plus importants

Ph. Dangereux aux effets moins importants

(\*) Ph. dangereux qui peuvent être observés après une fuite. Les fuites de plus grandes tailles seront les plus graves mais sont moins fréquentes. Les fuites de tailles moins élevées sont d'effets moindres mais de fréquences souvent plus grandes

**Figure 16 : Phénomènes dangereux**

Les principaux phénomènes dangereux à retenir sont ensuite « situés » en figure suivante.



**Figure 17 : Phénomènes dangereux replacés dans le contexte**

Au-delà de la figure précédente relativement synthétique, il convient de rapprocher :

- les informations consignées au chapitre 3 sur les installations (diamètre de canalisation, flux typiques, etc.),
- et celles émergeant du présent chapitre pour définir les cas à étudier en couvrant un spectre le plus étendu possible des différentes conditions.

Ces rapprochements sont présentés et justifiés au tableau suivant.

Au sein de ce tableau, s'agissant de fuites, il sera souvent fait référence aux fuites majeures dites:

- 10 % section,
- ou 100 % section.

Le terme « section » désigne alors la section droite des canalisations. De fait, les fuites 10 % section désignent alors des fuites plus modestes que celles à 100 % section, toutes choses égales par ailleurs. Dans le contexte, la désignation « 100 % section » est retenue pour des circonstances de fuite de type rupture guillotine ou arrachement<sup>8</sup> avec séparation complète

<sup>8</sup> S'agissant des flexibles et bras de transfert, il ne sera implicitement fait référence qu'à des fuites 100 % section, soit la rupture totale des flexibles ou bras, suite à un mouvement excessif de la capacité mobile (camion, barge, navire, ...).

---

d'une canalisation en 2 portions. Dans de telles conditions, le GNL peut s'échapper depuis chacune des 2 portions et la section totale de fuite correspond à 2 fois la section droite, soit 200 % de celle-ci. La désignation « 100 % section » est donc quelque peu inexacte.

Conditions de Stockage	PhD <sup>9</sup>	N° de cas	Dimension ou Volume	Contexte	Remarque	
Pressurisé	BLEVE	1	50 m <sup>3</sup>	Cas typique d'une citerne routière		
		2	110 m <sup>3</sup>	Cas typique d'une citerne ferroviaire		
		3	200 m <sup>3</sup>	Cas typique d'un stockage pressurisé en station Usine ou Port		
		4	1000 m <sup>3</sup>	Cas typique d'un stockage pressurisé de grande capacité en station Port		
Pressurisé	Rejet à l'atm. puis VCE	5	65 mm	Cas typique d'une fuite dite « 100 % section » d'un flexible utilisé au déchargement de camions-citernes  Cas 5 et 6 comparables mais il est admis une maîtrise de la fuite en 30 s au cas 5.  Au cas 6, il est admis une durée « longue » de fuite.	Au-delà du temps de fuite, d'autres différences entre les cas 5 et 6 ont été considérées mais elles sont expliquées plus loin.	
		6				
		7	80 mm	Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un flexible utilisé au déchargement de camions-citernes en station Port		Cas 5 à 8 pour des fuites depuis des flexibles ou bras
		8	200 mm	Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Port		

<sup>9</sup> « PhD » pour « Phénomène Dangereux ».

Conditions de Stockage	PhD <sup>9</sup>	N° de cas	Dimension ou Volume	Contexte	Remarque
Pressurisé	Rejet à l'atm. puis VCE	9	25 mm	Cas typique d'une fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 3''	Cas 9 à 12 pour des fuites depuis des tuyauteries
		10	66 à 80 mm	Cas typique de fuites : - dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 8'', - ou « 100% section » depuis une canalisation de diamètre voisin de 3''	
		11	150 mm	Cas typique de fuites « 100% section » depuis une canalisation de diamètre voisin de 6''.	
		12			
Pressurisé	Rejet à l'atm. puis VCE	13	50 mm	Cas typique de débordement depuis une soupape, en stations Usine ou Port.	
		14	n <sup>10</sup> *67 mm	Cas typique de débordement en station Port.	

<sup>10</sup> « n » correspond ici à un nombre de soupapes, disposées en parallèle, potentiellement sur plusieurs réservoirs.

Conditions de Stockage	PhD <sup>9</sup>	N° de cas	Dimension ou Volume	Contexte	Remarque
Pressurisé	Jet enflammé	15	25 mm	Cas permettant de balayer la gamme des fuites majeures, avec inflammation, pouvant conduire à jet enflammé.	
		16	Typique d'un débit d'une pompe		
		17	66 mm		
		18	132 mm		132 mm correspond au diamètre d'une fuite de « 10 % section » depuis une canalisation de 16 '' (dimension extrême dans le contexte) mais est aussi voisin du diamètre de fuite « 100 % section » depuis des canalisations plus courantes.

Conditions de Stockage	PhD <sup>9</sup>	N° de cas	Dimension ou Volume	Contexte	Remarque
Non pressurisé	Rejet à l'atm. puis VCE	19	200 mm	Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	Cas 19 à 22 pour des fuites depuis des bras
		20		Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Ferry en station Grand Port.	
		21	300 mm	Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras de plus grandes dimensions utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	
		22		Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Grand Navire en station Grand Port.	

Conditions de Stockage	PhD <sup>9</sup>	N° de cas	Dimension ou Volume	Contexte	Remarque
Non pressurisé	Rejet à l'atm. puis VCE	23	66 mm	Cas typique d'une fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 8'' Les cas 23 et 24 diffèrent par les temps de fuite et le fait de contenir ou pas l'épandage accidentel de GNL (voir plus loin) en « pipeway »	Fuites depuis des tuyauteries de fort diamètre pouvant aussi correspondre à des canalisations dites de transport.
		24			
		25	100 mm	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici d'une canalisation en 12''	
		26			
		27	132mm	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici d'une canalisation en 16''	
		28			

**Tableau 8 : Liste des scénarios dits majeurs d'accident à même de « couvrir » différentes situations possibles**

## 5 CARACTERISATION DES RISQUES

### 5.1 GENERALITES

Les risques sont généralement caractérisés selon des évaluations à « 2 dimensions », avec :

- la probabilité ou fréquence selon laquelle des accidents ou phénomènes dangereux peuvent être observés,
- et la gravité des effets associés à chaque type d'accident ou phénomène.

A titre d'exemple, selon la réglementation des ICPE, la matrice reportée en figure suivante est retenue en France pour reporter les évaluations de risques et statuer sur leur acceptabilité.

NON : risque croissant du rang 1 au rang 4  
MMR (Mesures de Maîtrise des Risques) : risque croissant du rang 1 au rang 2  
RA : Risque acceptable

Echelle de fréquence quantitative	Echelle de fréquence qualitative	Niveau de fréquence						
$> 10^{-2}$	Événement courant sur le site considéré	Occasionnel	A					
$10^{-3} < P < 10^{-2}$	Événement s'étant déjà produit sur le site	Peu fréquent	B					
$10^{-4} < P < 10^{-3}$	Événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité	Rare	C					
$10^{-5} < P < 10^{-4}$	Événement s'étant déjà produit, mais ayant fait l'objet de mesures correctives significatives	Extrêmement rare	D					
$< 10^{-5}$	Événement non rencontré au niveau mondial, mais non impossible au vu des connaissances actuelles	Rarissime	E					
				Niveau de gravité				
				1	2	3	4	5
				Modéré	Sérieux	Important	Catastrophique	Désastreux
Si le nombre d'accidents MMR rang 2 associés à une exposition aux effets létaux > 5 alors le risque global est équivalent à un accident NON rang 1				Effets létaux significatifs				
				Néant				
				Aucune personne exposée				
Effets irréversibles				Premiers effets létaux				
				Néant				
Au plus 1 personne exposée								
Entre 1 et 10 personnes exposées								
Entre 10 et 100 personnes exposées								
Entre 100 et 1000 personnes exposées								
Plus de 1000 personnes exposées								

RA

MMR: Mesure de Maîtrise des Risques

MMR Rang 1  
MMR Rang 2  
NON Rang 1  
NON Rang 2

RA : Risque acceptable

Figure 18 : Matrice dite « MMR » retenue en France pour évaluer la criticité des risques d'une ICPE sur son environnement.

L'objet n'est pas de détailler ici l'utilisation de la matrice présentée en figure précédente qui est spécifique à:

- la France,
- et à la maîtrise des risques technologiques autour des ICPE.

Toujours en France, dans le cas de canalisations de transport de matières dangereuses (cas de certaines tuyauteries de GNL) ou dans le cas d'infrastructures comme des zones de transit de matières dangereuses dans certains grands ports, il est fait référence à des matrices différentes.

Celles-ci diffèrent de celle en figure précédente dans les échelles de fréquence ou de gravité ou dans l'appréciation des risques (acceptables ou pas ou selon conditions).

Dans d'autres pays d'Europe, les risques peuvent être caractérisés à partir d'autres moyens encore.

Toutefois, quel que soit le cas (pays, réglementation appliquée, etc.), il reste que la caractérisation des risques passe par une évaluation « à 2 dimensions » : des fréquences et des gravités.

Au présent document, il sera fait référence aux classes de fréquence définies en figure précédente. Même si les fréquences ne sont pas partout classées de cette façon, il peut être déduit des fréquences exprimées en occurrences par an (au moins en ordre de grandeur), ce qui est une unité universelle.

En revanche, s'agissant de niveaux de gravité, il ressort que ceux-ci dépendent de :

- la portée ou distance d'effets (comme la létalité),
- mais aussi du nombre de personnes exposées aux effets et des critères retenus pour considérer les différents niveaux (comme 1, 10 ou 100 personnes exposées).

Les niveaux de gravité de la figure 18 dépendent donc de l'environnement et de critères propres à une réglementation. Ces grandeurs ne sont pas universelles. Dans ces conditions, au présent document, les gravités seront évaluées à partir de distances d'effets, exprimées en m, et en tenant compte des seuils consignés au tableau suivant.

Type d'effets	Seuil des effets létaux dits significatifs ou SELS	Seuil des 1 <sup>iers</sup> effets létaux ou SEL	Seuil des effets létaux irréversibles (autres que létaux) ou SEI
Thermiques dus à une exposition dépassant 2 minutes	8 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>
Thermiques dus à une exposition inférieure à 2 minutes	1800 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s	1000 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s	600 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s
Thermiques dus à VCE	Distance à la LIE	Distance à la LIE	Distance à la LIE majorée de 10%
Mécaniques dus aux surpressions	20 kPa	14 kPa	5 kPa

**Tableau 9 : Seuils critiques d'effets en fonction des expositions dangereuses**

Pour mémoire :

- le seuil SELS correspond à 5 % d'effets létaux possibles pour une population exposée à ce seuil,
- le seuil SEL correspond à 1 % d'effets létaux possibles ou l'apparition d'effets létaux pour une population exposée à ce seuil,
- le seuil SEI correspond typiquement à des effets avec séquelles pour une population exposée à ce seuil

Enfin, plusieurs types d'effets thermiques sont distingués (exposition de moins ou plus de 2 min, exposition aux flammes d'un VCE) car les variables pertinentes (flux thermiques, positions des flammes, etc.) à considérer pour prévoir les effets varient selon les cas.

## 5.2 GRAVITE DES PHENOMENES DANGEREUX

### 5.2.1 Hypothèses et approche de calculs

Ce sous chapitre présente succinctement les modèles-type utilisés dans les étapes successives de calculs des distances d'effets. Ces modèles sont mis en œuvre principalement au moyen du logiciel PHAST (version 6.7). Pour mémoire, ce logiciel est, de loin, le plus utilisé en France

pour évaluer les distances d'effets mentionnées dans les Etudes des Dangers. Son usage est aussi très courant<sup>11</sup> dans les pays de l'UE.

Sont également fournies des valeurs-guide de certaines données d'entrée, des hypothèses, etc.

a) Terme-source (débit à la brèche)

Les débits à la brèche sont calculés au moyen des modèles programmés dans le logiciel PHAST. Pour mémoire, dans le cas de GNL, l'écoulement avant la brèche est souvent diphasique avec à la fois du GNL (phase liquide) et du GN (phase gaz).

Pour les fuites majeures dites 100 %, il est admis 2 tronçons avec rejet de part et d'autre du lieu d'accident. Les 2 « contributions » sont prises en compte en combinant celles-ci, ce qui revient notamment à considérer la somme des débits de fuite, tous 2 orientés dans la même direction.

En cas de fuite majeure au refoulement des pompes, il est courant d'observer un « emballement » de celles-ci avec des débits plafonnés par leurs régimes de fonctionnement. En l'absence d'abaque de fonctionnement, des coefficients multiplicateurs forfaitaires sur le débit nominal suivant peuvent être retenus :

- Cas de GNL pressurisé : coefficient = 2,
- Cas de GNL non pressurisé : coefficient = 1.2.

b) Vaporisation avec épandage au sol

Dans le cas de GNL pressurisé (pression de vapeur saturante > 3 bar rel.), les résultats obtenus au moyen des modèles montrent une dispersion majoritairement par aérosols et un épandage au sol relativement faible.

Dans le cas du GNL non pressurisé (pression de vapeur saturante < 0.2 bar rel.), les résultats obtenus au moyen des modèles montrent cette fois un épandage au sol important. Les calculs correspondent alors à une situation avec extension (en l'absence de rétention) d'une nappe de liquide à ébullition. L'épaisseur de la nappe a été admise d'au maximum :

---

<sup>11</sup> Ce logiciel est distribué sous plusieurs variantes telles que celles repérées PHAST et aussi PHAST-RISK par exemple. En pratique, les modèles programmés sont très comparables.

- 1 cm pour un sol bétonné,
- 3 cm pour un sol fait de tout-venant
- et plus de 10 cm pour un sol sablonneux.

Dans ces conditions, le débit d'évaporation variable est calculé en fonction des apports thermiques du sol et de l'atmosphère. Le sol étant peu conducteur, le débit d'évaporation est généralement modéré.

c) Vaporisation avec épandage sur l'eau

Le comportement est similaire au cas au sol précédent. Dans le cas du GNL non pressurisé, l'épandage sur eau est important et il y a alors un traitement spécifique de la vaporisation sur eau.

Lorsque les modèles du logiciel PHAST sont retenus, il est calculé un débit d'évaporation du liquide en ébullition par un coefficient d'échange constant avec l'eau, estimé à  $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Avec de l'eau à  $10^\circ\text{C}$  par exemple, il est ainsi calculé un débit surfacique d'évaporation de  $0.17 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ . L'épaisseur de la nappe étant faible (de l'ordre du mm), il s'ensuit que le débit d'évaporation atteint rapidement le débit à la brèche pour un GNL non pressurisé.

d) Dispersion atmosphérique

Les logiciels tel que PHAST donne la possibilité de simuler la dispersion du méthane dans l'atmosphère au moyen d'un modèle dit « intégral ». Celui-ci consiste à résoudre les équations de la mécanique des fluides sous une forme simplifiée qui ne sera pas reprise ici.

Relativement au comportement général dans l'air ambiant, il convient de relever les éléments ci-après.

Dans le cas du GNL pressurisé, la phase liquide -aérosols essentiellement- se vaporise par entrainement d'air du jet. Pour mémoire un jet est observé en raison de la quantité de mouvement de l'écoulement accidentel (la pression est « convertie » en vitesse). Ensuite, le panache engendré à la suite du jet a le comportement d'un gaz dit « lourd » en raison du refroidissement massif de l'air entrainé, concomitant à l'évaporation des gouttes de GNL.

Dans le cas du GNL non pressurisé, l'évaporation de nappe engendre un panache qui se disperse lui aussi en restant au niveau du sol. L'effet de densité avec mouvement ascendant (favorable au plan de la sécurité), attendu en raison de la masse volumique du méthane qui est plus faible que celle de l'air, est en pratique compensé par le refroidissement de l'air entraîné, par les vapeurs à très basse température émises par le GNL.

e) VCE (feu de nuage)

Comme expliqué plus haut (au chapitre 4), un VCE conduit à des effets :

- thermiques, associés à la température élevée des gaz chauds,
- ou mécaniques, associés aux ondes de pression engendrées par expansion de ces mêmes gaz chauds

Il est admis que les distances d'effets thermiques correspondent peu ou prou au contour du nuage ou panache explosible et sont donc quantifiables à partir des dimensions de l'emprise de celui-ci (cf tableau 9).

S'agissant des effets mécaniques dus aux ondes de pression, il convient d'analyser l'espace dans l'emprise du nuage explosible. Les questions à aborder sont alors :

- s'agit-il d'un espace sans encombrement, à « l'air libre » ?,
- ou de zones à encombrement par des obstacles solides (équipements, tuyauteries, matériels divers, etc.) ?,
- et s'il s'agit de zones encombrées, quel est le degré d'encombrement, le volume concerné, etc ?

Ces distinctions sont à faire car les observations après accident, des essais ou des calculs (Cf Mouilleau et al., 1999) montrent que l'explosion d'un nuage ou panache explosible peut en pratique correspondre non pas à un seul VCE mais à plusieurs. Sans entrer dans plus de détails, les vitesses de flamme peuvent être assez différentes d'une zone à l'autre au sein du volume explosible pour que tout se passe comme si plusieurs explosions, bien distinctes, se succédaient.

Ceci est à l'origine de la méthode dite MultiEnergies (« Multi » se référant aux possibles multiples explosions dans un même nuage) qui propose notamment de :

- dénombrer les VCE, au sein d'un même nuage,
- et d'affecter une énergie (associé au volume concerné) et un indice de sévérité à chaque VCE.

Toujours sans donner de détails, cette méthode propose des indices de sévérité de 1 (VCE les moins propices à surpressions) à 10 (VCE conduisant aux plus forts pics de surpression).

Pour des stations « port », les installations n'étant généralement pas à encombrement marqué, les indices de sévérité suivants peuvent être retenus pour un VCE du type « champ libre »:

- installations à terre : « 4 » (surpression = 10 kPa),
- plan d'eau : « 3 » (surpression = 5 kPa).

Sur des zones voisines du site à encombrement marqué (parking camions, aire de stockage,...), l'indice peut être porté à « 5 » (surpression = 20 kPa).

A titre d'indications des distances d'effets en fonction de volumes et niveaux de sévérité typiques de VCE sont fournies au tableau suivant.

Zone encombrée typique	Volume (m <sup>3</sup> )	Indice (-)	Energie (MJ)	Distances SELS (m)	Distances SEL (m)	Distances SEI (m)
Stockage avec réservoirs horizontaux (sous pression) – peut aussi convenir à des postes de chargement camions par exemple.	5000	4	15650	s.n.a. <sup>12</sup>	s.n.a.	73
Pomperie et autres équipements de procédé.	5000	5	15650	28	46	130
	10000	5	31300	35	58	164
Rack de quelques (2-3) tuyauteries	1250	3	3900	s.n.a.	s.n.a.	19
	5000	3	15650	s.n.a.	s.n.a.	30

**Tableau 10 : Distances d'effets par surpression à compter de chaque centre de volume explosible**

<sup>12</sup> Seuil non atteint

En pratique, pour les distances d'effets par surpression, il faut donc :

- identifier les zones et leurs centres,
- évaluer leurs volumes et les énergies libérables par combustion (cf sous chapitre 4.1.4 pour les données),
- et enfin choisir les indices de sévérité.

Ceci est à faire au cas par cas et selon l'implantation des installations, non connue dans le contexte de cette étude.

Cela étant, cette dernière remarque est en pratique peu « limitante » dans le cas des vapeurs de GNL dont la réactivité est « plutôt faible » (cf sous chapitre 4.1.4, à nouveau) de sorte que les indices sont eux aussi limités. A l'expérience, il ressort alors que les distances d'effets les plus « pénalisantes » sont celles correspondant aux effets thermiques, données directement par les calculs de dispersion.

Dans la suite de cette étude, les gravités des VCE seront caractérisés par les distances d'effets thermiques associés à ces phénomènes.

#### f) BLEVE

De façon quelque peu analogue au cas précédent, les BLEVE ont des effets thermiques et mécaniques par onde de surpression (et projectiles aussi). Dans le cas des BLEVE, les effets thermiques sont plus souvent encore prépondérants.

Ensuite, il n'existe a priori pas de modèle dédié au cas des GNL et les distances d'effets thermiques sont évaluées à partir des formules réglementaires du butane (circulaire du 10 mai 2010 dans MEEDDM, 2010). Le butane est ici retenu (sachant que la circulaire aborde les GPL et évoque aussi le propane) car la pression de tarage des soupapes des installations contenant le butane est voisine de celle du GNL.

## 5.2.2 Distances d'effets

Les distances d'effets des phénomènes dangereux sont consignées aux 3 tableaux suivants dédiés aux BLEVE, VCE et jets enflammés, respectivement.

N° cas	Dimension ou Volume	Contexte	Masse (t)	Distances SELS (m)	Distances SEL (m)	Distance SEI (m)
1	50 m <sup>3</sup>	Cas typique d'une citerne routière	20	86	130	206
2	110 m <sup>3</sup>	Cas typique d'une citerne ferroviaire ou d'une taille de réservoir intermédiaire	44	125	184	294
3	200 m <sup>3</sup>	Cas typique d'un stockage pressurisé en station Usine ou Port	81	166	240	386
4	1000 m <sup>3</sup>	Cas typique d'un stockage pressurisé de grande capacité en station Port	403	354	484	792

**Tableau 11 : Distances d'effets associées aux BLEVE**

Type de conditions	N° cas	Dimensions de la fuite (mm)	Contexte	Débit de fuite (kg/s)	Durée de fuite	Distances à la LIE <sup>13</sup> (= Distances SELS = Distance SEL)	Remarque	
Pressurisé	5	65 mm	Cas typique d'une fuite dite « 100 % section » d'un flexible utilisé au déchargement de camions-citernes	12	30 s	100	Fuites depuis des équipements de transfert (flexibles ou bras)	
	6			20	« longue »	123		
	7	80 mm		Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un flexible au déchargement de camions-citernes en station Port	27	30 s		148
	8	200 mm		Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Port	181	30 s		440
Pressurisé	9	25 mm	Cas typique d'une fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 3''	8	30 s	60	Fuites depuis des tuyauteries	

<sup>13</sup> Les distances SEI correspondent à 110 % des distances SELS et SEL mais ne sont pas explicitement évaluées ici afin de ne pas alourdir le tableau.

Type de conditions	N° cas	Dimensions de la fuite (mm)	Contexte	Débit de fuite (kg/s)	Durée de fuite	Distances à la LIE <sup>13</sup> (= Distances SELS = Distance SEL)	Remarque
	10	66 à 80 mm	Cas typique de fuites : - dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 8'', - ou « 100% section » depuis une canalisation de diamètre voisin de 3''	27 à 33	« longue »	180 à 210	
	11	150 mm	Cas typique de fuites « 100% section » depuis une canalisation de diamètre voisin de 6''.	118	30 s	290	
	12			118	« longue »	360	
Pressurisé	13	50 mm	Cas typique d'un débordement depuis une soupape d'un réservoir seul, en stations Usine ou Port.	6	« longue »	52	
	14	7*67 mm	Cas typique d'un débordement depuis plusieurs soupapes en station Port.	60	« longue »	220	
Non pressurisé	19	200 mm	Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	86	30 s	380	Fuites depuis des bras de transfert, au chargement ou au déchargement (bras)

Type de conditions	N° cas	Dimensions de la fuite (mm)	Contexte	Débit de fuite (kg/s)	Durée de fuite	Distances à la LIE <sup>13</sup> (= Distances SELS =Distance SEL)	Remarque
	20		Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Ferry en station Grand Port.	60	30 s	310	
	21	300 mm	Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras de plus grandes dimensions utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	434	60 s	860	
	22		Cas typique d'une fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Grand Navire en station Grand Port.	180	60 s	590	
Non pressurisé	23	66 mm	Cas typique d'une fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 8''	32	« longue »	175	Fuite depuis des tuyauteries, avec épandage contenu en pipeway ou non.
	24		Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »		30 s	140	
	25	100 mm	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici de canalisation en 12''	76	« longue »	270	

Type de conditions	N° cas	Dimensions de la fuite (mm)	Contexte	Débit de fuite (kg/s)	Durée de fuite	Distances à la LIE <sup>13</sup> (= Distances SELS =Distance SEL)	Remarque
	26		Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »		30 s	143	
	27	132mm	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici de canalisation en 16''	133	« longue »	410	
	28		Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »		30 s	151	

**Tableau 12 : Distances d'effets thermiques associées aux VCE**

N° cas	Dimensions (mm) ou circonstances de la fuite	Débit de fuite (kg/s)	Longueur de flamme (m)	Flux moyen radiatif (kW/m <sup>2</sup> )	Distance SELS (m)	Distance SEL (m)	Distance SEI (m)
15	25	5	32	82	49	53	60
16	Debit de pompe	12	47	95	73	80	90
17	66	32	79	83	125	138	155
18	132	133	131	134	215	240	270

**Tableau 13 : Distances d'effets associées aux jets enflammés**

Les distances d'effets au tableau précédent ne sont pas associées directement à un équipement ou une opération comme aux tableaux 11 et 12 précédents. En revanche, les dimensions ou les débits de fuite sont de bons indicateurs pour évaluer (par interpolation au besoin) des distances d'effets pour un cas pratique.

Au sein du tableau 12, dédié aux distances d'effets associés aux VCE, il apparaît une colonne relative à la durée de fuite qui prend comme valeurs :

- 30 ou 60 s,
- ou alors « longue ».

Les 2 durées explicites (30 et 60 s) correspondent à des temps d'isolement des fuites au moyen de Mesures de Maitrise des Risques (ou MMR) qui sont décrites au chapitre 6.

L'adjectif « longue » est employé pour tous les cas de fuites non maîtrisées par les MMR. Ensuite, il n'est pas donné plus de précisions (« longue » couvrant pourtant des situations pouvant être différentes) car les calculs montrent que :

- aussitôt une fuite observée, il se forme un nuage explosible dont la taille croît au fil du temps,
- et après quelques minutes généralement, la taille est maximum et ne croît plus.

Autrement dit, vis-à-vis de la distance à la LIE qui est la distance d'effets recherchée, la durée de rejet n'a plus d'influence et n'est donc pas prise en compte dans le détail.

Pour autant, réduire la durée de fuite reste très important car cela limite forcément la durée critique durant laquelle un nuage reste explosible, avant d'être assez dilué pour devenir non-explosible.

## 5.3 FREQUENCE DES PHENOMENES DANGEREUX

### 5.3.1 Approche, hypothèses et références

#### a) Cas des BLEVE

Comme indiqué au sous chapitre 4.4, il n'y a pas de retour d'expérience exploitable. Les fréquences des BLEVE seront donc évaluées par analogie avec ce qui est couramment admis pour les GPL notamment.

A cet égard, il peut être fait référence à (HSE, 2012) ou (Heirman, 2009) pour directement extraire une classe de fréquence. Des consultations de ces ouvrages, il ressort des fréquences variables entre les classes D et E<sup>14</sup>. En substance, la classe E est souvent justifiée par des installations :

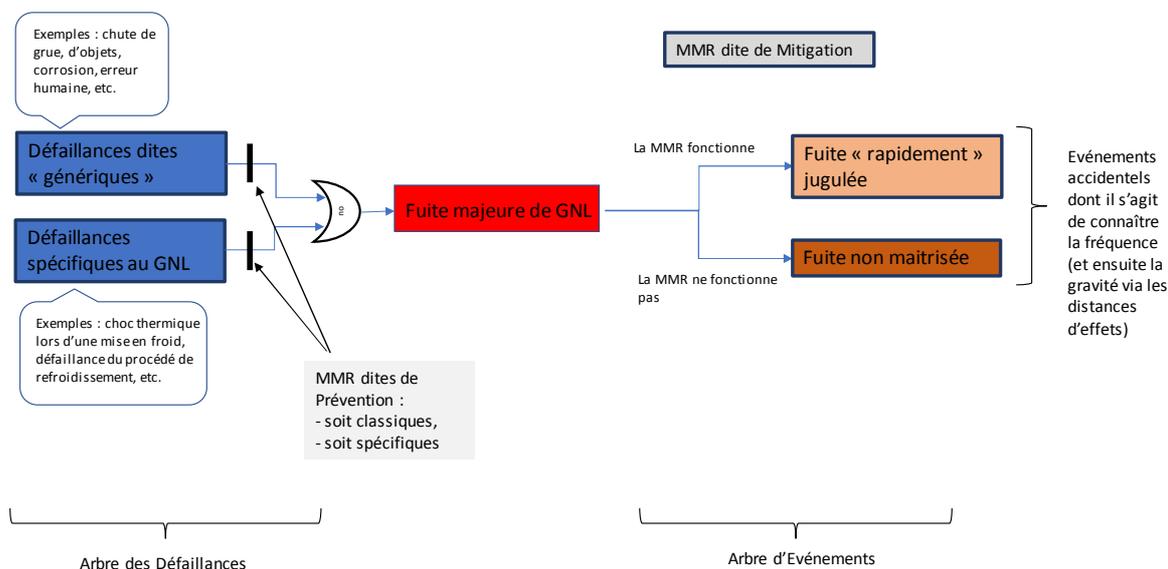
- pour lesquelles une analyse des risques dédiée a été faite pour démontrer des fréquences très faibles de défaillances ou d'événements initiateurs capables d'aboutir à un BLEVE,
- souvent équipées de moyens de refroidissement en cas d'incendie (événement initiateur typique pour aboutir à un BLEVE)

#### b) Approche générale appliquée aux cas des fuites

Faute de disposer de banques de données d'accidents relatives au GNL (mis-à-part quelques éléments éparses évoqués plus loin), l'approche présentée en figure suivante peut être retenue.

---

<sup>14</sup> Cf la figure 18 pour les définitions de ces classes de fréquences.



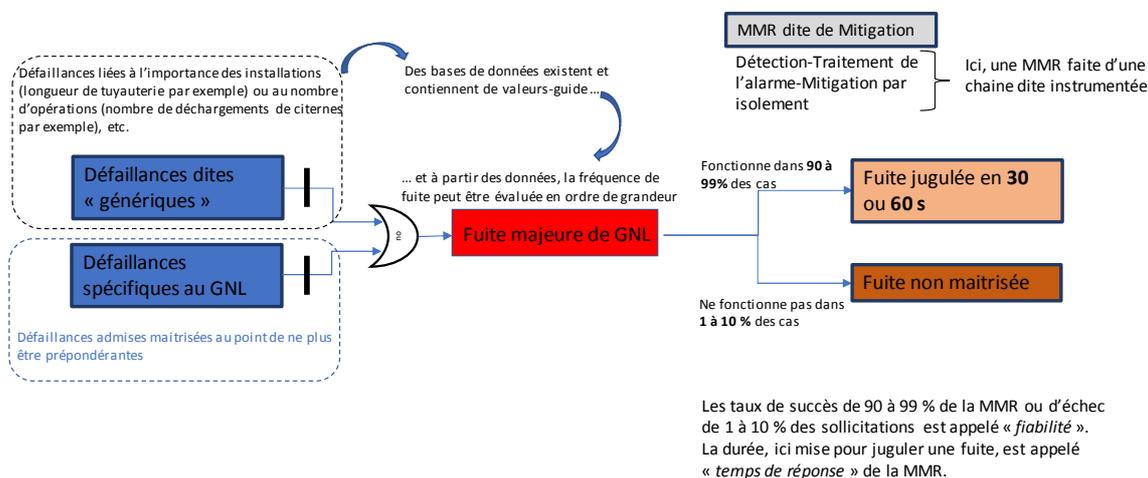
**Figure 19 : Approche générale par Nœud-papillon pour la détermination des fréquences de fuites**

Cela étant, développer cette approche requiert de :

- développer l'arbre des défaillances à gauche de l'événement fuite,
- et de développer aussi l'arbre dit d'événements à sa droite.

Ces développements ne sont pas viables dans le contexte d'une étude générique, applicable en divers lieux, et sans information explicite sur les moyens vraiment mis-en-œuvre.

Dans ces conditions, il est fait les hypothèses reportées en figure suivante.



**Figure 20 : Approche telle qu'appliquée dans le contexte d'étude**

Cette approche pour être valable doit être confortée par le respect des pratiques évoquées au chapitre 6 ou des pratiques équivalentes.

Les données évoquées en partie gauche de la figure précédente (longueurs de tuyauterie, nombre de transferts, etc.) sont précisées plus loin.

### c) Banques de données de référence

Les valeurs-guide de fréquence proposées sont issues de 2 documents :

- un document néerlandais « Reference Manual Bevi Risk Assessment » (RIVM, 2009),
- et un document du HSE britannique « Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessment (HSE, 2012)

(RIVM, 2009) est une référence classique pour les installations industrielles en France.

(HSE, 2012) est cependant mieux documenté sur les équipements (bras, flexible, pompe,...).

Retenir ces 2 références est a priori « pénalisant » pour les défaillances dites génériques dans le cas du GNL du fait des matériaux utilisés (acier inox à forte ductilité) et des différences de technologies (cuve double paroi,...) associés à ce produit.

En complément, est utilisé le retour d'expérience de SHELL auprès de ses clients livrés en GNL par citerne routière (voir § suivant).

Le tableau suivant mentionne pour chaque grand type d'équipements, la banque de données à utiliser.

Equipements	(RIVM, 2009)	(HSE, 2012)	Retour d'expérience SHELL
Réservoirs	×		
Tuyauteries	×		
Pompes	×	×	
Compresseurs		×	
Bras sur navire/barge		×(voir plus loin)	
Flexible sur véhicule		×	× (voir plus loin)

**Tableau 14 : banques de données**

d) Remarques sur les cas des flexibles sur véhicules

Les valeurs de fréquences figurant dans le document HSE (2012) sont modulées selon la présence de mesures de sécurité : cales sur véhicule, tests d'étanchéité, système « breakaway ». Cela étant, il ressort une fréquence de rupture (100 % section) de  $4.10^{-6}$  occurrence/transfert.

De son côté, le retour d'expérience de SHELL porte sur 4 961 400 transferts par flexible sans incident. Ces transferts sont supposés effectués avec 3 mesures de préventions (cales, asservissement frein à main, test d'étanchéité) sans « breakaway ».

Par une analyse statistique, SHELL obtient la valeur suivante pour une rupture de flexible :

- Niveau de confiance = 50% =>  $F_{ER}^{15} = 1.4 \times 10^{-7}$ /transfert
- Niveau de confiance = 90% =>  $F_{ER} = 4.7 \times 10^{-7}$ /transfert

Par cet exemple, il est explicitement montré que des valeurs peuvent différer d'un facteur 10. La recherche au mieux d'un ordre de grandeur constitue donc d'ores et déjà un objectif, parfois peu aisé à atteindre.

La valeur proposée par SHELL, issue d'un retour d'expérience est retenue.

e) Remarques sur les cas des bras pour navires et barges

Dans (HSE, 2012), les bras sont supposés équipés d'un système « Emergency Release Coupling » (ERC) avec alarme de débattement. Ce système est donc supposé défaillant avec les vannes d'isolement restant ouvertes.

f) Synthèse sur les fréquences de fuite

Les fréquences typiques de fuites les plus utiles dans le contexte sont données ci-après.

---

<sup>15</sup>  $F_{ER}$  pour Fréquence Evénement Redouté

## Fuites sur tuyauteries

Diamètre DN	Fréquence de fuite 100 % section [33 % DN-100 % DN]	Fréquence de fuite brèche intermédiaire 10 % section [10 % DN-33 % DN] (*)
< 75 mm	$1.10^{-6}/\text{an.m}$	$9.6 \times 10^{-6}/\text{an.m}$
75 à 150 mm	$3.10^{-7}/\text{an.m}$	$1.3 \times 10^{-6}/\text{an.m}$
> 150 mm	$1.10^{-7}/\text{an.m}$	$7.9 \times 10^{-7}/\text{an.m}$

**Tableau 15 : fréquences génériques de fuite sur tuyauterie**

(\*) : valeurs interpolées par TechnipFMC à partir des valeurs explicitement publiées.

## Fuites sur bras et flexibles

	Fréquence de fuite 100 % section (/opération)	Mesures prises en compte
<b>Flexible sur véhicule</b>	$4.10^{-7}/\text{opération}$	2 mesures de prévention (cale,...) + test d'étanchéité
<b>Bras sur navire</b>	$7.10^{-6}/\text{opération}$	ERC et alarme de débattement

**Tableau 16 : fréquences génériques de fuite sur bras et flexible**

Il ressort du tableau précédent des fréquences de fuite par opération plus élevées sur les bras que sur les flexibles. Ce constat contre-intuitif provient de la prise en compte des retours d'expérience de Shell sur les flexibles (cf remarque en d)), non disponible sur les bras.

### *g) Influence des MMR dites de mitigation*

Relativement à l'arbre dit d'événements (parties droites des figures précédentes), plusieurs MMR différentes peuvent être citées. Mais il s'agit généralement d'une chaîne d'éléments avec :

- un moyen de détection (par exemple des capteurs de présence de gaz naturel dans l'air),

- un moyen de traitement des alarmes (automate de sécurité),
- et un moyen de réduction des conséquences (ici, l'isolement des fuites au moyen de vannes de sécurité).

De exemples de telles MMR sont données au chapitre 6.

Ensuite, une MMR est notamment caractérisée par :

- une fiabilité,
- et un temps de réponse.

Ces 2 éléments ressortent explicitement en figure 20 précédente. Dans le contexte d'étude, il a été admis :

- une fiabilité entre  $10^{-1}$  ou  $<10^{-1}$  (mais pas  $<10^{-2}$ ) sous quelques réserves expliquées plus loin,
- et des temps de réponse valant soit 30 s dans le cas des installations les plus modestes à 60 s dans le cas des installations les plus importantes ; ce temps de réponse dépend des durées cumulées de détection, traitement et fermeture des vannes (il est implicitement admis que la fermeture des vannes disposées sur les tuyauteries de grandes dimensions requiert plus de temps).

#### *h) Probabilité d'inflammation*

Des probabilités d'inflammation d'une fuite de gaz sont données ci-après. Ces valeurs sont relatives à l'inflammation retardée de fuites de courte ( $< 30$  s) et de longue durée ( $> 30$ s) et peuvent être déduite de (Flauw, 2015).

	<b>Zone ATEX (y compris poste de dépotage)</b>	<b>Zone non ATEX faiblement fréquentée (en site et hors site)</b>	<b>Autre zone non ATEX</b>
<b>Fuite courte durée (&lt;30 s)</b>	0.1	0.1	1
<b>Fuite longue durée (&gt;30 s)</b>	0.1	1	1

**Tableau 17 : probabilités d'inflammation**

Dans le cas des fuites de GNL, vu que les rejets sont au moins sur 30 s et vu que l'évaporation du liquide au sol (ou sur l'eau) peut perdurer après jugulation de la fuite, il ressort qu'une probabilité de 1 est à retenir, dans le contexte.

### 5.3.2 Fréquences des phénomènes dangereux

Les fréquences de chaque phénomène dangereux considéré jusqu'à présent sont reportées au tableau suivant.

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
Pressurisé	BLEVE	1	Citerne routière	Citerne mobile	non	D/E
		2	Citerne ferroviaire ou d'une taille de réservoir intermédiaire	Citerne mobile		D/E
		3	Stockage pressurisé en station Usine ou Port	Capacité fixe		D/E
		4	Stockage pressurisé de grande capacité en station Port	Capacité fixe		D/E
Pressurisé	VCE	5	Fuite « 100 % section » d'un flexible 65 mm utilisé au déchargement de camions-citernes	200 opérations par poste avec typiquement 5 postes	Fonct. nominal Fuite de 30 s	C/D

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
		6			Echec	D/E
		7	Fuite « 100 % section » d'un flexible 80 mm au déchargement de camions-citernes en station Port	Idem ci-avant	Fonct. nominal Fuite de 30 s	C/D
		8	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Port	10 à 50 opérations/an	Fonct. nominal Fuite de 30 s	C/D
Pressurisé	VCE	9	Fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 3''	Longueur de quelques dizaines de m au plus	Fonct. nominal Fuite de 30 s	D

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
		10	Fuites : - dites « 10 % section » depuis une longue tuyauterie de GNL de 8'', - ou « 100% section » depuis une courte tuyauterie de diamètre voisin de 3'' (tuyauterie procédé)	- 100 à 500 m longueur pour une tuyauterie de 8''.  - Plusieurs dizaines de m pour une tuyauterie de 3''.	Echec  Fuite « longue »	- C / D  - D / E
		11	Fuites « 100% section » depuis une canalisation de diamètre voisin de 6'' (tuyauterie procédé).	Plusieurs dizaines de m	Fonct. nominal  Fuite de 30 s	D/E
		12			Echec  Fuite « longue »	E

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
Pressurisé	VCE	13	Débordement depuis une soupape d'un réservoir seul, en stations Usine ou Port.	Ces cas dépendent des fréquences de transfert mais aussi des moyens de sécurité sur les niveaux de liquide en réservoir (considéré défectueux ci-contre)	Echec  Fuite « longue »	B -C
		14	Débordement depuis plusieurs soupapes en station Port.			D, typiquement
Pressurisé	Jet enflammé	15	Débit de 5 kg/s depuis une brèche de 25 mm	Tous ces cas dépendent du tronçon, siège de fuite.	Fonct. nominal	C, typiquement
		16	Débit de 12 kg/s depuis une brèche en refoulement de pompe			C, typiquement
		17	Débit de 32 kg/s depuis une brèche de 66 mm			D, typiquement
		18	Débit de 133 kg/s depuis une brèche de 132 mm			E, typiquement
Non pressurisé	VCE	19	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	10 à 50 opérations/an	Fonct. nominal  Fuite de 30 s	C / D

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
		20	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Ferry en station Grand Port.	Ordre de grandeur de la centaine d'avitaillement par poste/an (en tenant compte des trafics Ferry/RoRo et LoLo)	Fonct. nominal Fuite de 30 s	C
		21	Fuite « 100 % section » d'un bras de plus grandes dimensions utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	10 à 50 opérations/an	Fonct. nominal Fuite de 60 s	C / D
		22	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Grand Navire en station Grand Port.	Typiquement 5 opération / an	Fonct. nominal Fuite de 60 s	D

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
Non pressurisé	VCE	23	Cas typique d'une fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 8''	De 100 à 500 m de longueur de tuyauterie transfert	Echec	D
		24	Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »		Fonct. nominal	C / D
		25	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici de canalisation en 12''		Echec	D
		26	Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »		Fonct. nominal	C / D
		27	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici de canalisation en 16''		Echec	D
					Fuite « longue »	
					Fuite de 30 s	
					Fuite « longue »	
					Fuite de 60 s	
					Fuite « longue »	

Conditions	Phén. Dan.	N° cas	Contexte	Données importantes	Prise en compte d'une MMR	Classe de fréquence retenue
		28	Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »		Fonct. nominal Fuite de 60 s	C / D

**Tableau 18 : Fréquences de Phénomènes dangereux**

Au-delà des informations déjà consignées au tableau précédent, il convient de considérer aussi les diverses remarques suivantes.

-----

Les fréquences des BLEVE sont données sous forme de fourchettes allant de la classe D à celle repérée E (soit,  $10^{-5}$  oc./an en ordre de grandeur ou moins). Les classes fournies en caractères gras sont celles les plus couramment retenues dans les études à l'expérience de l'auteur. Les BLEVE de capacités mobiles ressortent comme a priori plus fréquentes (alors qu'il est rappelé que dans le cas spécifique des GNL le retour d'expériences réelles reste non significatif) car elles sont plus estimées plus exposées au risque d'incendie à proximité.

-----

D'autres fréquences sont exprimées avec des fourchettes car leurs évaluations dépendent :

- de longueur de canalisations,
- ou d'un nombre d'opérations de transfert,

qui sont elles-mêmes des données estimées au moyen de fourchettes approximatives.

Il appartient alors au lecteur de retenir une classe de fréquence plutôt qu'une autre en confrontant ses propres données aux indications fournies en 5<sup>ième</sup> colonne du tableau précédent.

Par ailleurs, il est explicitement indiqué en 6<sup>ième</sup> colonne du tableau précédent, la prise en compte ou pas d'une MMR. Comme cela est rappelé au sous chapitre précédent ou encore visible en figure 20, une fuite « longue » par exemple ne sera observée que si :

l'événement accidentel « Fuite » survient (fréquence qui dépend des données sur les longueurs de tuyauteries, les opérations, etc.),  
Et si la MMR de mitigation ne sera pas opérationnelle pour juguler rapidement la fuite.

Le « ET » logique cité ci-avant implique une réduction de la fréquence des fuites « longues ».

Dans ces conditions, bien des fréquences peuvent être réduites en prévoyant une MMR. De plus, même les fréquences qui ont été réduites en raison d'une MMR pourraient être réduites encore au moyen d'une seconde MMR (indépendante de la 1<sup>ière</sup>).

Les fréquences citées au tableau précédent peuvent donc être modulées en fonction des MMR, réellement prévues.

-----

Dans certains cas, l'ajout d'une MMR peut permettre de réduire une fréquence (de fuite « longue » à nouveau). Toutefois, le gain sur une distance d'effets peut être relativement faible ou en tout cas estimé comme tel. Ceci permet d'expliquer au présent stade du document pourquoi certains scénarios d'accident ont été considérés avec et sans MMR : pour fournir des indications au lecteur.

-----

Il est rappelé que les probabilités d'inflammation ont été prises partout égales à 1. Ceci est une hypothèse raisonnable au regard des fuites (majeures) considérées. Elle est toutefois par excès par nature et encore plus par excès si des fuites à débits faibles devaient être retenues.

-----

Enfin, dans certaines réglementations<sup>16</sup>, il peut être attribué un diamètre maximum aux fuites les plus importantes. Ce diamètre peut être inférieur aux plus gros diamètres de fuite considérés dans ce document. C'est donc qu'une base de cas est fournie mais sans préjuger des choix à faire pour retenir ou pas certains cas, aussi en fonction des réglementations.

---

<sup>16</sup> En France, une tuyauterie enterrée, considérée comme une canalisation de transport, sera associée à des risques de fuite majeure depuis une brèche de 70 mm en l'absence de mouvement de terrain prévisible. Pour une tuyauterie aérienne, intégrée à une ICPE, le diamètre de fuite majeure sera généralement bien plus grand.

## 5.4 SYNTHÈSE SUR LES RISQUES

Les distances d'effets et les fréquences des phénomènes dangereux sont regroupées au tableau suivant.

Condition	Phénomène dangereux	N° cas	Contexte	Distances d'effets SELS (m)	Distances d'effets SEL (m)	Distances d'effets SEI (m)	Fréquences
Pressurisé	BLEVE	1	Citerne routière	86	130	206	<b>D/E</b>
		2	Citerne ferroviaire ou d'une taille de réservoir intermédiaire	125	184	294	<b>D/E</b>
		3	Stockage pressurisé en station Usine ou Port	166	240	386	<b>D/E</b>
		4	Stockage pressurisé de grande capacité en station Port	354	484	792	<b>D/E</b>
Pressurisé	VCE	5	Fuite « 100 % section » d'un flexible 65 mm utilisé au déchargement de camions-citernes	100	110	C/D	
		6		123	135	D/E	
		7	Fuite « 100 % section » d'un flexible 80 mm au déchargement de camions-citernes en station Port	148	163	C/D	
		8	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Port	440	484	C/D	

Condition	Phénomène dangereux	N° cas	Contexte	Distances d'effets SELS (m)	Distances d'effets SEL (m)	Distances d'effets SEI (m)	Fréquences
		9	Fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 3''	60		66	D
		10	Fuites : - dites « 10 % section » depuis une longue tuyauterie de GNL de 8'', - ou « 100% section » depuis une courte tuyauterie de diamètre voisin de 3'' (tuyauterie procédé)	180 à 210		200 à 230	- C / D  - D / E
		11	Fuites « 100% section » depuis une canalisation de diamètre voisin de 6'' (tuyauterie procédé).	290		319	D/E
		12		360		396	E
		13	Débordement depuis une soupape d'un réservoir seul, en stations Usine ou Port.	52		57	B -C
		14	Débordement depuis plusieurs soupapes en station Port.	220		242	D, typiquement

Condition	Phénomène dangereux	N° cas	Contexte	Distances d'effets SELS (m)	Distances d'effets SEL (m)	Distances d'effets SEI (m)	Fréquences
Pressurisé	Jet enflammé	15	Débit de 5 kg/s depuis une brèche de 25 mm	49	53	60	C, typiquement
		16	Débit de 12 kg/s depuis une brèche en refoulement de pompe	73	80	90	C, typiquement
		17	Débit de 32 kg/s depuis une brèche de 66 mm	125	138	155	D, typiquement
		18	Débit de 133 kg/s depuis une brèche de 132 mm	215	240	270	E, typiquement
Non pressurisé	VCE	19	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	380		418	C / D
		20	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Ferry en station Grand Port.	310		340	C
		21	Fuite « 100 % section » d'un bras de plus grandes dimensions utilisé au déchargement d'un navire en station Grand Port.	860		946	C / D

Condition	Phénomène dangereux	N° cas	Contexte	Distances d'effets SELS (m)	Distances d'effets SEL (m)	Distances d'effets SEI (m)	Fréquences
		22	Fuite « 100 % section » d'un bras utilisé au chargement d'un navire type Grand Navire en station Grand Port.	590		649	D
		23	Cas typique d'une fuite dite « 10 % section » depuis une canalisation de GNL de 8''	175		192	D
		24	Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »	140		154	C / D
		25	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici de canalisation en 12''	270		297	D
		26	Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »	143		157	C / D
		27	Idem cas précédents sauf qu'il s'agit ici de canalisation en 16''	410		451	D
		28	Idem ci-avant mais avec épandage contenu en « pipeway »	151		166	C / D

**Tableau 19 : Risques associés à chaque cas**

## 6 RECOMMANDATIONS-BONNES PRATIQUES

### 6.1 GENERALITES

Les recommandations des normes sont à suivre. A titre d'exemples et aucunement dans le but de fournir une liste, il convient de se référer notamment à :

- EN 1473 : Installations et équipements relatifs au gaz naturel liquéfié - Conception des installations terrestres,
- ou EN 1474 : Installations et équipements relatifs au gaz naturel liquéfié - Conception et essais des bras de chargement/déchargement.

Ensuite, quelques recommandations et bonnes pratiques sont évoquées en substance aux sous chapitres suivants en considérant :

- les règles générales de sécurité,
- les réservoirs et les lignes connectées,
- les mesures de maîtrise des risques composées d'éléments de détection, de traitement des alarmes et autres franchissements de seuils et de systèmes d'actions d'urgence (arrêts d'urgence, dépressurisation d'urgence, etc.),
- la collecte des événements,
- la collecte des fuites,
- les systèmes de protection Incendie.
- et les effets dominos.

### 6.2 REGLES GENERALES DE SECURITE

La classification des zones dangereuses doit être réalisée en considérant notamment les aires de chargement/déchargement.

En outre, la circulation et le stationnement de véhicules à l'intérieur du site doivent être définis en conformité avec le plan de sécurité portuaire.

## **6.3 LES STOCKAGES ET LIGNES CONNECTEES**

### **6.3.1 Règles de conception**

Des règles de conception des différents stockages (pressurisés ou non) sont disponibles dans les normes telles que celles citées en 6.1.

### **6.3.2 Lignes de connexion des stockages pressurisés**

#### *a) Remplissage*

Dans la station « usine », les réservoirs disposent d'une double alimentation : en phase liquide et en phase gazeuse. Ce dispositif permet en effet au chauffeur du camion-citerne d'ajuster la pression finale de la citerne après remplissage.

Dans la station « port », le remplissage s'effectue uniquement par la phase gazeuse du réservoir.

#### *b) Equilibrage*

Si plusieurs réservoirs sont installés en parallèle, il est recommandé que ceux-ci soient connectés entre eux pour les parties liquide et vapeur, afin d'équilibrer leurs niveaux de liquide et de pression. La conception doit permettre d'utiliser tous les réservoirs comme un réservoir unique.

Cependant, par mesure de sécurité, chaque réservoir doit pouvoir être isolé individuellement, si nécessaire.

#### *c) Soutirage*

Pour toute ligne depuis laquelle le débit de transfert est déterminé (plutôt faible dans le contexte d'une station « usine ») et régulier, il peut être recommandé d'installer un limiteur de débit sur le piquage de soutirage.

### 6.3.3 Lignes de connexion des stockages non pressurisés

#### a) *Remplissage*

Pour des raisons de sécurité, toutes les connexions se font par le haut du ou des réservoirs. Il n'y a aucune pénétration de ligne ou autre insertion sur les côtés, ni le fond du réservoir. Les réservoirs disposent d'une double alimentation : en phase gazeuse ou en phase liquide (avec une ligne spécifique qui descend par l'intérieur, depuis le haut jusqu'au au fond du réservoir) pour éviter des phénomènes de stratification du GNL.

#### b) *Equilibrage*

Si plusieurs réservoirs sont installés en parallèle, il est recommandé que ceux-ci soit connectés entre eux pour la partie vapeur, afin d'équilibrer leur niveau de pression. Par contre, par mesure de sécurité, chaque réservoir doit pouvoir être isolé individuellement, si nécessaire.

#### c) *Soutirage*

Il est nécessaire d'installer des pompes immergées pour soutirer le GNL, depuis l'intérieur de réservoir. Chaque pompe est installée dans une conduite ouverte au fond du réservoir et connectée en haut à la ligne de transfert de GNL.

Le réservoir pourra être équipé de plusieurs pompes si nécessaires, avec autant de conduites à l'intérieur.

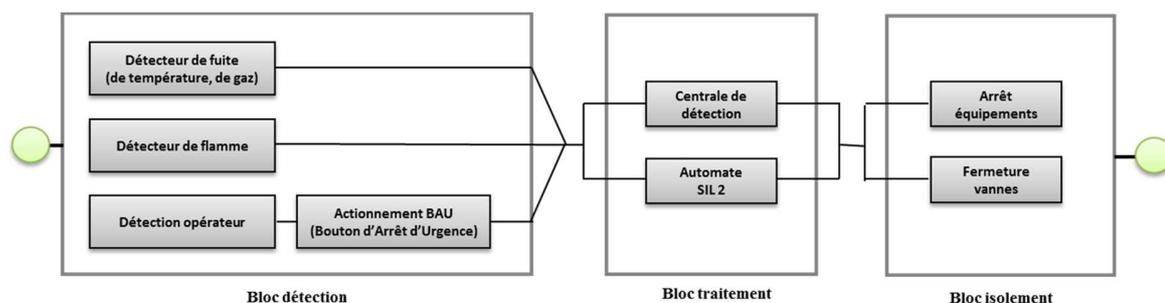
## 6.4 CHAINE DE SECURITE / MMR DITES INSTRUMENTEES

### 6.4.1 Présentation générale

Les MMR instrumentées correspondent la plupart du temps à une chaîne de 3 « blocs » :

- le bloc « détection », incluant la détection par un opérateur,
- le bloc « traitement »,
- et le bloc « isolement/actions de mise en sécurité ».

Une chaîne de ce type (instrumentée), conçue pour réduire les conséquences d'une fuite (suivie potentiellement d'un feu), est décrite en figure suivante. Puisqu'il s'agit de réduire les conséquences d'un événement accidentel, ces MMR sont souvent aussi appelée MMR de mitigation.



**Figure 21: Architecture des chaînes de sécurité ou MMR dites instrumentées**

Les sous chapitres suivants détaillent chaque bloc de sorte qu'une revue des recommandations sur les équipements de sécurité s'y trouve reportée.

## 6.4.2 Propriétés

Quelle que soit la technologie des éléments de chaque bloc, toutes les chaînes peuvent être caractérisées au moyen de 3 propriétés ou caractéristiques :

- leur efficacité,
- leur fiabilité,
- et leur temps de réponse

L'efficacité est sans doute la propriété la plus difficile à définir de façon univoque. Elle permet généralement de comparer les conséquences d'accident avec ou sans la chaîne ou MMR. Il peut s'agir par exemple de comparer :

- une distance à la LIE si une fuite n'est pas jugulée,
- avec celle obtenue pour une fuite jugulée grâce aux éléments de la MMR.

Toutefois, ces comparaisons sont parcellaires. Dans l'exemple cité, il ne ressort pas que dans le premier cas, le risque perdure sur une durée « longue » alors que dans le second il est effectif sur une durée bien plus courte.

En outre, l'efficacité est parfois retenue pour décrire l'adéquation de la MMR aux accidents. Une MMR peut par exemple être efficace pour les fuites importantes mais non efficace pour des fuites modestes au motif que le maillage des détecteurs peut être trop grossier pour ces

dernières. L'efficacité revient alors à justifier de la conception/ du dimensionnement parfois de la MMR.

La fiabilité et le temps de réponse sont des propriétés déjà définies et illustrées au sous chapitre 5.3.

Il sera juste précisé ici que les niveaux de fiabilité dépendent :

- des caractéristiques technologiques des éléments composant la MMR, qui est une chaîne,
- et aussi des durées entre 2 tests pour en vérifier le bon fonctionnement.

En substance, plus la durée entre 2 tests est longue moins la fiabilité est grande. Les niveaux de fiabilité retenus a priori dans ce document au sous chapitre 5.3 sont à associés à des durées entre tests d'un an.

## **6.5 DETECTION**

### **6.5.1 Généralités**

Les détecteurs qui ont des fonctions de sécurité (pression, niveau du GNL, etc.) doivent être indépendants des séquences de mesure pour l'exploitation.

Les mesures et alarmes doivent être transmises au lieu de contrôle.

Les alarmes doivent aussi être transmises à l'opérateur qui peut se trouver sur place ou sur un site éloigné (bureau d'exploitation, ...).

La maintenance de l'instrumentation doit être possible pendant le fonctionnement normal du stockage.

Toutefois, quand la mise hors service du stockage est requise, l'instrumentation doit présenter une redondance suffisante pour une intervention en sécurité.

Au-delà des généralités ci-avant, les cas de stockages pressurisés ou non-pressurisés sont à nouveau distingués avant de passer en revue chaque type de détecteur.

## 6.5.2 Détection/mesure de niveau

### a) *Réservoirs pressurisés*

Des dispositifs de mesure de niveau de liquide indépendants et de précision élevée sont recommandés comme moyens de protection contre le risque de débordement plutôt qu'un système de trop-plein.

Les réservoirs doivent être dotés d'une instrumentation qui permet de contrôler le niveau du GNL et de prendre les mesures de prévention/évitement (du débordement) nécessaires. Cette instrumentation doit notamment pouvoir :

- mesurer en continu le niveau du liquide au moyen d'un système de fiabilité appropriée, ce système devant comporter deux alarmes de niveau haut et très haut,
- disposer d'une détection de niveau très haut qui doit être basée sur une instrumentation de fiabilité appropriée, indépendante du système de mesure de niveau précédent ; elle doit, en cas d'activation, mettre en œuvre la fonction de fermeture des vannes de remplissage sur les lignes d'alimentation et de recirculation.

Si l'analyse de risque le demande, le dimensionnement des soupapes au débit liquide de remplissage peut constituer une mesure de prévention/évitement de dommage structurel au réservoir.

Si une tuyauterie de trop-plein est montée, elle doit traverser l'enceinte du réservoir à une hauteur au moins égale à celle du niveau de l'alarme « niveau très haut ». Une sonde de température doit détecter la présence de liquide dans la tuyauterie et actionner l'ouverture d'une vanne et l'évacuation vers un emplacement sûr.

### b) *Réservoirs non pressurisés*

Les mêmes recommandations que pour les réservoirs pressurisés s'appliquent pour les réservoirs non-pressurisés. Toutefois, en raison de la faible résistance à la pression, l'analyse de risque peut conduire à doubler de manière indépendante, le système de mesure de niveau.

## 6.5.4 Détection/mesure de pression

### a) Réservoirs pressurisés

Le réservoir doit disposer d'une instrumentation, installée de manière permanente aux endroits appropriés, permettant de contrôler la pression comme suit :

- une mesure en continu de la pression,
- une détection de la pression « trop haute », par une instrumentation indépendante des systèmes de mesure en continu de la pression ; elle doit activer l'arrêt des opérations en cours (déchargement camion-citerne, méthanier, etc...) et des équipements (pompes).

Pour prévenir des risques associés aux changements de pression atmosphérique, l'instrumentation utilisée pour les détections devra être effectuée en unité de mesure relative.

### b) Réservoirs non pressurisés

Les mêmes recommandations que pour les réservoirs sous pressions s'appliquent pour les réservoirs sous faible pression.

De plus, il est nécessaire d'installer :

- une mesure de la pression différentielle entre l'espace d'isolement et l'intérieur de l'enceinte primaire<sup>17</sup> lorsqu'ils ne sont pas en communication ; pour cela, doivent être installés soit des capteurs de pression différentielle, soit des capteurs de pression séparés dans l'espace d'isolation thermique,
- une détection « pression trop basse », par une instrumentation indépendante des systèmes de mesure en continu de la pression. ; elle doit activer l'arrêt des machines (pompes, compresseur de gaz d'évaporation,...) et l'injection automatique du gaz service.

---

<sup>17</sup> Les réservoirs non pressurisés sont souvent constitués des 2 enceintes de confinement, l'une, primaire, contient le produit en situation nominale et l'autre, secondaire, pourrait le contenir en cas de perte d'étanchéité de l'enceinte primaire. L'espace entre les 2 enceintes contient de l'isolant.

### 6.5.6 Détection/mesure de Température

Un réservoir non pressurisé doit disposer d'une instrumentation installée de manière permanente, aux endroits appropriés permettant de mesurer la température :

- du liquide à différentes hauteurs, la distance verticale entre deux sondes de température consécutives ne devant pas excéder 2 m
- de la phase gazeuse.

De plus, les réservoirs du type intégrité totale doivent avoir des mesures de températures:

- de la paroi et du fond de l'enceinte primaire
- de la paroi et du fond de l'enceinte secondaire.

### 6.5.7 Détection/mesure dite LTD

Pour les réservoirs non pressurisés, la température et la masse volumique du GNL doivent pouvoir être mesurées sur la totalité de la hauteur de liquide.

Cet instrument dit LTD (« Level, Temperature, Density ») doit en outre fournir le profil de température et de densité du GNL dans le réservoir, en fonction du niveau.

Cet instrument est utilisé pour détecter la formation de strates de GNL et prévenir un roll over qui pourrait en résulter.

### 6.5.8 Détection de fuite/ de feu

#### a) Généralités

Ce paragraphe permet de lister les types de détecteur adaptés aux fuites possibles de GNL sur les équipements et les canalisations.

Dans les zones associées aux équipements, les détecteurs présentés sont des détecteurs de champs (ou d'ambiance).

Pour les canalisations, des détecteurs dits en ligne (pressostat, débitmètre,...) peuvent également être envisagés. Ils ne sont pas présentés ici car leur mise en œuvre dans une chaîne de sécurité peut être inadéquate sur des canalisations à fonctionnement intermittent.

### *b) Détecteurs sur zone/équipements*

De manière systématique, ces zones sont équipées de 3 types de détecteurs:

- les capteurs catalytiques (« explosimètre ») ou IR ponctuel,
- les capteurs de basse température,
- les détecteurs de flamme UV/IR ou IR3<sup>18</sup>.

Dans certaines zones particulières (zone à confinement, surveillance périmétrique,...), des capteurs à faisceau IR<sup>19</sup> peuvent être utilisés.

### *c) Détecteurs sur canalisations*

Certaines canalisations sont de longueurs telles qu'elles ne peuvent être couvertes par des détecteurs de zone associés aux équipements.

Ces canalisations peuvent être équipées de fibre optique permettant de détecter une fuite par la chute de température associée à l'écoulement de GNL, très froid.

Les canalisations transportant du GNL à faible pression disposent d'une 2<sup>ème</sup> détection par capteurs catalytiques ou IR installée dans les compartiments de pipeways quand ils existent.

En des points singuliers comme les passages de route, les canalisations, à double enveloppe sous vide, disposent d'un capteur de pression assurant une détection de fuite.

### *d) Nombre et Positions des détecteurs*

Le nombre et l'implantation des détecteurs doivent faire l'objet d'une étude spécifique qui ne sera pas abordée au présent document. De fait, des détecteurs sont à planter :

- aux aires de chargements/déchargements ,
- aux stockages,
- auprès des équipements de procédé associés (réchauffeurs, échangeurs de chaleur, etc.)

<sup>18</sup> Les détecteurs UV/IR combinent un capteur UltraViolet et un détecteur InfraRouge. Les détecteurs IR3 combinent 3 capteurs IR.

<sup>19</sup> Ces faisceaux intègrent en interprétant des signaux InfraRouges la concentration en gaz inflammable sur une ligne définie entre 2 points.

En cas de franchissement de seuils d'alarme des actions d'urgence, telles qu'indiquées en 6.7, sont aussi à définir.

## 6.6 TRAITEMENT

### 6.6.1 Généralités

En pratique, le traitement peut-être :

- automatique sur franchissements des alarmes délivrées par les détecteurs de fuite ou de flammes et certains détecteurs d'anomalie,
- ou par les opérateurs qui décident des actions à faire (coup de poing ou bouton d'arrêt d'urgence : BAU).

Dans ce contexte, le nombre et les emplacements de BAU doivent faire l'objet d'une étude avec a minima des BAU dédiés:

- aux postes de transfert,
- au stockage,
- à proximité de l'unité regroupant les équipements pour assurer le refroidissement du GNL,
- à proximité des bureaux d'exploitation.

Ensuite, qu'un traitement soit automatisé ou qu'il repose sur les décisions des opérateurs, il doit être défini à l'avance en considérant des actions d'urgence les plus adéquates.

Celles-ci peuvent ensuite correspondre à des mises en sécurité :

- partielles quand elles n'agissent que sur une partie ou une fonction partielle des installations,
- générales quand elles agissent sur toute l'installation y compris les postes de chargement/déchargement.

*Remarque : les actions d'urgence sont généralement précédées par une alarme (sans action), activée avec un seuil inférieur, afin de prévenir à l'avance qu'une déviation par rapport aux bonnes conditions d'opérations est en train de se produire.*

Dans le contexte, un traitement doit être explicitement prévu en cas de :

- niveau très haut à très très haut,
- pression très haute à très très haute,
- pression très basse à très très basse,
- détection de fuite, de feu,
- etc.

Enfin, s'agissant des unités de traitement, deux types sont possibles :

- une centrale de détection,
- ou un automate de sécurité.

Si l'analyse de risque montre la nécessité de disposer de 2 MMR indépendantes de « détection-traitement-isolément » pour exclure un scénario, il est nécessaire de disposer de ces 2 unités en parallèle.

Dans le cas contraire, lorsque par exemple les rejets prolongés sont acceptés, une seule unité est suffisante.

L'automate est de niveau de SIL<sup>20</sup> « 2 » pour ne pas pénaliser la fiabilité de la chaîne complète.

### **6.6.2 Traitement des événements accidentels concernant le méthanier**

Pour une station « port », une interface avec le méthanier est à considérer. Les mesures de sécurité associées aux transferts devront être conçues avec :

- un poste de déchargement équipé de vannes d'arrêt d'urgence commandées à distance ; les arrêts d'urgence étant intégrés dans des séquences automatisées,
- un câble de communication/AU (tel que recommandé par le SIGTTO<sup>21</sup> et rendu obligatoire par les codes et normes) entre le méthanier et la station pour déclencher un arrêt d'urgence si besoin.

---

<sup>20</sup> De l'anglais "Safety Integrated Level". Différents niveaux de SIL existent (1, 2, 3, ...) repérant des fiabilités croissantes suivant la norme IEC 511.

<sup>21</sup> De l'anglais : «Society of International Gas Tanker and Terminal Operators».

- système de break-away sur les flexibles ou PERC<sup>22</sup> sur les bras (relève des systèmes d'actions d'urgence considérés au sous chapitre suivant).

Les arrêts d'urgence intervenant sur le méthanier et les bras ont 2 niveaux d'action selon l'ampleur de la déviation/anomalie détectée.

## **6.7 SYSTEMES D' ACTIONS D'URGENCE**

### **6.7.1 Généralités**

Par systèmes d'actions d'urgence, sont désignés les dispositifs de mise en sécurité des installations par fermeture des vannes d'isolement, arrêt des pompes de transfert, des compresseurs, ...

De façon générale et analogue à la situation de l'instrumentation, le système des actions d'urgence est à distinguer du système de suivi des procédés.

Le système de protection incendie n'est pas inclus (non pas qu'il ne soit pas associé à des actions d'urgence) car un sous chapitre spécifique lui est dédié.

### **6.7.2 Organes d'isolement**

Les vannes commandées par les arrêts d'urgence ont des caractéristiques principales qui doivent être passées en revue avant mise en place et exploitation :

- type d'organe : boule,...
- motorisation : électrique, pneumatique,...
- sécurité positive : la vanne se met en position d'isolement en cas de perte de la motorisation,
- sécurité feu (commande) : la vanne soumise à un feu de GNL conserve sa capacité de commande pendant un laps de temps,
- sécurité feu (étanchéité) : la vanne soumise à un feu de GNL conserve son étanchéité pendant un laps de temps.

---

<sup>22</sup> De l'anglais : « Powered Emergency Release Coupling ».

Lorsque le site le permet, les vannes d'isolement sont pneumatiques de manière à faciliter une sécurité positive (la vanne possède une position « fail safe »).

Le gaz naturel (appelé alors « gaz service ») peut être utilisé pour la motorisation de vannes pneumatiques.

Parmi, les organes d'isolement, il convient aussi de rappeler les dispositifs :

- dits « break-away » ou encore « raccords flip-flap » implantés sur les flexibles, consistant en des raccords conçus pour se rompre au droit d'une section précise en cas de traction excessive et équipés de clapets se refermant concomitamment à la rupture et bien sûr disposés de part et d'autre de la section où celle-ci est prévue,
- ou dits « PERC » qui est un dispositif hydraulique permettant la déconnexion rapide d'un bras de chargement sur ordre opérateur, défaut d'énergie ou lorsque l'enveloppe opérationnelle<sup>23</sup> d'un bras de chargement est dépassée ; ce dispositif est en outre équipé de 2 vannes commandées à distance disposées de chaque côté du point de déconnexion pour limiter les déversements.

### 6.7.3 Dispositifs de contrôle en cas de pression haute

Il est rappelé que la pression des réservoirs devra être maintenue entre les valeurs opérationnelles autorisées.

Pour cela, en exploitation nominale, le contrôle de la pression se fera par l'intermédiaire de vannes automatiques, qui permettent le délestage de gaz (en cas de pression trop haute), ou un apport de gaz (en cas de pression trop basse, voir sous chapitre suivant).

En exploitation nominale (hors situation de protection ultime), le délestage de gaz ne peut être envoyé à l'atmosphère que s'il s'agit d'épisodes très occasionnels. Les volumes de gaz évacués à l'atmosphère doivent être réduits autant que possible. Le délestage à l'atmosphère n'est acceptable que pour les installations modestes (type usine). Les installations plus importantes doivent considérer des dispositifs du type :

- délestage par envoi du gaz vers des réseaux ou des utilisateurs,
- refroidissement de la phase gaz (par échangeur à azote liquide, par exemple),
- refroidissement de la phase liquide (par cycle de Brayton, par exemple),
- ...

---

<sup>23</sup> Zone de l'espace au sein de laquelle il est prévu que le bras puisse se déplacer au gré des besoins

Ensuite, revenant aux situations d'urgence, lorsque la pression devient excessive malgré le système de contrôle de la pression, des soupapes de sécurité ou éventuellement des disques de rupture sont implantés pour évacuer le gaz dans les situations ultimes suivantes :

- l'évaporation due à un apport thermique, y compris en cas d'incendie,
- le mouvement dû à un éventuel sur-remplissage,
- un flash brusque lors du remplissage,
- les variations brutales de la pression atmosphérique,
- le recyclage soudain et à débit important d'une pompe,
- un débordement dans l'espace inter-parois pour les réservoirs non pressurisés,
- le phénomène de roll over pour les réservoirs non pressurisés

Le réservoir doit comprendre au moins deux soupapes de surpression. Elles peuvent rejeter directement à l'atmosphère sauf lorsque l'émission gazeuse en cas d'urgence conduit à une situation inacceptable. Dans ce cas, les soupapes doivent être reliées au réseau de torche ou au système d'évent (voir plus loin). Le dimensionnement des deux organes de sécurité doit être défini en supposant que l'un d'entre eux est hors service.

En alternative, il est aussi possible d'installer seulement une soupape de surpression et un disque de rupture (en lieu et place des deux soupapes). Par contre, les retours d'expérience montrent des difficultés d'opération et de fiabilité de ces systèmes. Ils ne sont, par conséquent, pas recommandés.

Afin de limiter au maximum les ouvertures de soupapes, ou rupture de disque, il est recommandé que le système de contrôle soit fourni avec une vanne de délestage à l'évent réduisant la pression avant ouverture des soupapes.

#### **6.7.4 Dispositifs de contrôle en cas de pression basse**

En cas de pression basse, le gaz d'apport peut être généré en vaporisant du GNL par l'intermédiaire d'une unité de PBU (pressure build up). Cette unité est constituée d'un vaporisateur à air ambiant. Ce vaporisateur est installé sur un piquage de la ligne de soutirage avec un retour en phase gazeuse du réservoir. Ce vaporisateur comportant des pièces en aluminium vulnérables en cas d'incendie, la ligne de vaporisation doit être équipée de vannes d'isolement commandables à distance.

## 6.8 SYSTEMES DE COLLECTE DES EVENTS

Comme évoqué ci-avant, pour des raisons opératoires ou de sécurité, il est nécessaire dans certain cas d'avoir à évacuer du gaz. Par exemple, en cas de surpression dans les réservoirs, l'excès de gaz doit être évacué, soit par l'intermédiaire d'un système de contrôle, soit par des soupapes en dernier recours, afin d'empêcher une rupture mécanique de la cuve.

Le gaz doit être évacué par l'intermédiaire d'un évacuateur, ou éventuellement une torche pour les très grosses installations (si les volumes de gaz libérés deviennent trop importants).

Si des gouttelettes de liquides sont présentes dans le flux gazeux, le système de collecte doit pouvoir les séparer et ne pas les envoyer à l'atmosphère avec le gaz. Il est alors nécessaire d'installer des systèmes de séparation liquide-gaz en amont de l'évacuateur tel qu'un ballon séparateur.

Les fonctionnalités de(s) évacuateurs et torches sont alors de :

- récupérer/canaliser les volumes de gaz pour que ceux-ci ne soient pas libérés dans l'atmosphère de manière aléatoire à travers tout le site de la station,
- orienter/diriger les volumes de gaz récupérés pour que ceux-ci soient libérés dans l'atmosphère à des endroits précis, localisés et contrôlés,
- éviter la dispersion de gouttelettes liquides de GNL à travers le site,
- favoriser la dispersion du gaz pour atteindre des concentrations inférieures aux limites d'inflammabilité.

Les objectifs de sécurité sont de plusieurs natures :

- prévenir des effets dominos en empêchant d'envoyer un nuage de gaz inflammable dans une zone, ou au contact d'équipements ou engins qui pourraient entraîner son inflammation,
- prévenir des effets irréversibles ou létaux sur des personnes en empêchant d'envoyer un nuage de gaz inflammable dans une zone, ou vers le sol, où du personnel pourrait être présent,
- empêcher d'envoyer du gaz à l'extérieur de l'enceinte de la station avec des concentrations supérieures aux limites d'inflammabilité
- empêcher la formation d'une « pluie » de gouttelettes d'hydrocarbure vers des zones ou personnes physiques.

Le système de collecte d'évent peut être constitué d'un seul événement commun (ou une torche) ou de plusieurs petits événements répartis sur le site. Dans tous les cas, son(leurs) orientation(s) doit(doivent) répondre aux fonctionnalités et objectifs cités ci-dessus.

Aussi, aucun élément pouvant provoquer un blocage intempestif ne peut être installé entre le dernier organe de sécurité (typiquement une soupape) et la sortie de l'évent (ou torche).

L'évent (ou torche) devra aussi être conçu pour empêcher l'accumulation d'eau (de pluie) dans les collecteurs ou la construction de nid d'oiseau ou d'abris d'animaux, etc... pouvant obstruer la sortie de l'évent.

## **6.9 SYSTEMES DE COLLECTE DE FUITE**

### **6.9.1 Fonctions et objectifs**

Le système de récupération de fuite est destiné à retenir le GNL localement à l'aplomb de la brèche ou dans une capacité déportée.

Les objectifs de sécurité sont de 2 natures :

- réduire l'extension d'une nappe et par suite la taille d'un nuage explosible,
- prévenir la formation d'un feu de nappe engendrant un flux intense et prolongé sur une capacité de GNL (réservoirs, citerne,...).

Le dimensionnement d'un tel système nécessite de se référer aux scénarios de fuite sur phase liquide et d'examiner les conditions et le délai d'isolement pour ces scénarios (en pratique, le temps de réponse des MMR évoqué plus haut). Ces éléments peuvent être extraits de l'Etude de dangers, telle qu'établie en France. En particulier, il convient d'examiner les fuites par tous les piquages qui ne sont pas isolables par 2 organes d'isolement : clapet et/ou vanne commandable à distance. Les fréquences de ces fuites peuvent en effet être assez hautes pour, combinées aux gravités, engendrer un risque non acceptable.

Des recommandations supplémentaires sont reportées aux sous chapitres suivants en distinguant :

- les aires de récupération, qui doivent collecter et « canaliser » le GNL,
- et les aires de rétention qui doivent temporairement « stocker » le GNL.

### 6.9.3 Aires de récupération

Concrètement, des aires sont à concevoir à partir :

- d'aires en béton, ceinturées par des caniveaux,
- ou de cuvettes en béton à l'aplomb des principaux équipements avec des pentes suffisantes dirigées vers des caniveaux.

Ces caniveaux peuvent être couverts de panneaux légers pour :

- limiter l'évaporation,
- et éviter une situation de propagation de flamme en milieu confiné et de forme allongée qui est propice aux fortes accélérations de flammes et par suite à des explosions avec de fortes surpressions.

### 6.9.4 Capacités de rétention

Les capacités ou cuvettes de rétention sont le plus souvent à déporter de sorte qu'en cas d'inflammation, les flux thermiques associés au feu de nappe ne viennent pas impacter les équipements environnant en les chauffant dangereusement.

Ensuite, comme déjà indiqué plus haut, les capacités sont à dimensionner en tenant compte des quantités de GNL pouvant être accidentellement déversées à extraire des études de dangers ou de sécurité. De façon pratique, les rétentions prévues pour les postes de transfert doivent avoir au moins la capacité d'une citerne (ferroviaire ou routière selon les cas).

Le débit d'évaporation depuis chaque cuvette peut être réduit au maximum par un dispositif du type écran flottant. La nécessité ou pas de ce type d'équipement dépend du contexte et des résultats des études des dangers.

Par ailleurs, lorsque la cuvette est étanche, le point bas est équipé d'une pompe à eau pluviale. Cette pompe est dite « sacrificielle » car elle serait endommagée par une fuite de GNL.

Enfin, dans le cas des stockages non pressurisés, les rejets de GNL sont a priori les plus à même d'engendrer des épandages au sol. Dans ce contexte, la meilleure technologie est de disposer les canalisations (en particulier les longues canalisations reliant les postes de transfert navire au stockage) dans un « pipeway », à parois latérales en béton, situé au-dessus du sol ou en décaissé. Le sol est en terrain naturel. Ces pipeways sont compartimentés avec une capacité de chaque

compartiment déterminée par l'analyse des risques. Le volume nécessaire dépend en effet du temps de réponse du système de détection-isolément dans les compartiments.

## **6.10 SYSTEME DE PROTECTION INCENDIE**

Le tableau ci-après présente :

- les fonctions pouvant être assurées par un système dit de protection incendie (alors qu'il s'agit parfois aussi de protection explosion),
- le type d'équipements assurant ces fonctions,
- et des remarques/informations.

Fonctions	Equipements	Remarques
<b>Dilution/dispersion nuage</b>	Rideau d'eau	La dilution s'opère par l'air entraîné par les gouttelettes d'eau.  Ce dispositif n'a d'efficacité que si le nuage se présente à une vitesse faible. Il est inefficace sur les émissions en jet. En conséquence, il est surtout utile en cas d'épandage important de GNL sous faible pression engendrant un nuage sans quantité de mouvement notable. Il permet ainsi d'éviter une dérive du nuage vers une zone à point d'inflammation ou à présence de personnes (voie de circulation,...).
<b>Prévention allumage cuvette GNL</b>	Déversoirs à mousse	Ce dispositif est réservé aux installations de grandes dimensions qui nécessite une cuvette déportée profonde et/ou de grande superficie. Pour une telle cuvette, l'analyse de risque peut en effet montrer qu'un flux thermique intense et prolongé engendre des effets dominos aggravant.
<b>Mitigation feu de cuvette GNL</b>	Déversoirs à mousse	
<b>Extinction feu de camion-citerne</b>	Extincteur mobile	L'accidentologie des dépôts d'hydrocarbure indique qu'une prise en feu de camion-citerne peut se produire à l'arrivée sur le site. En supplément des extincteurs portatifs présents au poste de chargement/déchargement, au moins un extincteur de 50 kg est présent à proximité, dans un lieu sûr (abrité du rayonnement de l'incendie à arrêter).
<b>Refroidissement de capacités</b>	Arrosage à eau	Dans le cas des réservoirs et citernes de transport, l'arrosage peut être peu indiqué car :  - s'il y a impact direct des flammes, les parois externes se trouvent portées à haute température (à cause des flammes mais aussi du fait que l'isolant

Fonctions	Equipements	Remarques
		<p>derrière les parois empêche/limite les transferts de chaleur) ; il s'ensuit potentiellement de la caléfaction de l'eau d'arrose et par suite un refroidissement peu efficace,</p> <p>- et s'il n'y a pas impact et que les flux thermiques transmis par rayonnement sont modérés alors l'isolation (perlite) des capacités de GNL permet d'emblée une tenue, relativement longue.</p>
<b>Protection bureau exploitation, local instrumentation</b>	Arrosage à eau	En comparaison des remarques en ligne précédente, il est en revanche généralement indiqué de refroidir des installations comme des capacités de procédé par exemple, une installation dangereuse voisine, ou encore un bureau d'exploitation en tant que refuge pour le personnel d'exploitation.
<b>Protection installations voisines</b>	Rideau d'eau Arrosage à eau	

**Tableau 20: fonctions de protection incendie**

## 6.11 EFFETS DOMINOS

Il ressort des considérations au sous chapitre précédent qu'une des fonctions importantes du système de protection incendie est d'éviter une séquence avec enchaînements de plusieurs phénomènes dangereux, le plus souvent appelée « effets dominos ».

L'objet n'est de détailler ici les critères ou seuils qui permettent de juger de la plausibilité d'effets dominos ou encore de méthodes pour prendre en compte ceux-ci. Pour mémoire, il convient juste de rappeler que la maîtrise des effets dominos est en pratique souvent assurée par :

- les choix d'implantations,
- ou par des barrières comme un mur de protection par exemple

Cela étant, il est ajouté comme recommandation de considérer :

- de façon « classique », les impacts entre 2 installations dangereuses (comme un poste de transfert et un stockage par exemple),
- mais aussi entre une installation dangereuse et les éléments sensibles comme par exemple, les principaux moyens de protection incendie (pomperie notamment) ou les lieux abritant les opérateurs et les commandes à distance des moyens de sécurité.

## 7 CONCLUSIONS -RESUME

Le présent document est consacré à l'étude des risques associés à différentes installations et opérations dans les ports, impliquant le GNL, comme celui de Toulon.

Outre les introductions, conclusions et références bibliographiques, il comporte :

- un chapitre 2 décrivant une situation pratique, qui est celle du port de Toulon ; au travers de la description du port, il ressort les éléments typiques à prendre en compte pour une étude comme les flux de GNL envisagés, la localisation ou l'environnement des installations,
- il est ensuite déduit ce à quoi pourraient correspondre des installations de stockage et transferts typiques de GNL, ainsi que les flux entre divers équipements ; les descriptions reportées au chapitre 3 sont elles aussi a priori typiques sachant que dans un cas réel des flux différents, des dimensions de canalisations différentes, etc pourraient être à considérer ; les valeurs retenues dans ce document doivent toutefois encadrer bien des cas pratiques,
- puis, les dangers associés au GNL et aux procédés sont passés en revue et identifiés quant à leurs natures au chapitre 4 ; il ressort ainsi 28 phénomènes dangereux introduisant autant de risques types ; parmi ceux-ci se trouvent principalement des jets enflammés et différentes explosions,
- ces risques sont ensuite caractérisés en matière de fréquences et conséquences au chapitre 5 suivant ; les fréquences sont exprimées en classes de fréquences d'occurrence par an (en considérant différentes puissances de 10, : 1 oc. tous les 100 ans,, tous les 1000 ans, etc.) ; les conséquences sont exprimées en termes de distances en deçà desquelles des effets sur la santé humaine pourraient être ressentis ; les risques ainsi caractérisés pourraient, en situation réelle, être acceptés ou pas selon le référentiel réglementaire à appliquer (ce référentiel est variable d'un pays de l'UE à l'autre et n'est pas défini au présent document),
- enfin, le chapitre 6 est consacré aux recommandations pouvant permettre de réduire les risques.

## 8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Flauw Y. (2015)

Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation  
DRA 71 - Opération B  
Rapport INERIS référencé DRA-13-133211-12545A.

Health and Safety Executive (2012),

Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments.  
PCAG chp\_6K Version 12 – 28/06/12

Heirman J.P. (2009)

HANDBOOK FAILURE FREQUENCIES 2009 for drawing up a SAFETY REPORT.  
Deposit Number : D/2009/3241/355  
Flemish Government.

MEEDDM (2010)

Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

Mouilleau Y., Lechaudel J.F. (1999)

Guide des Méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre  
Rapport INERIS référencé INERIS DRA – YMo/YMo-1999-20433.

RIVM (2009)

Reference Manual Bevi Risk Assessments, version 3.2, 01.07.2009  
National Institute of Public Health and the Environment (RIVM)