

ENJEUX DE L'ACTUALITE MARITIME

Le gaz naturel liquéfié (GNL)

Combustible alternatif de propulsion des navires : incidences et risques

Rédacteurs :

- > **Yannick Le Manac'h**, Inspecteur des Affaires maritime (en retraite)
- > **Francis Nativel**, ex-Vice-Président exécutif de la société Axens filiale de l'IPEN



Terminal de Montoir-Saint Nazaire - Photo : Mer & Marine

INTRODUCTION

Le gaz naturel liquéfié est d'ores et déjà considéré par les pays industrialisés et les grandes compagnies maritimes comme le combustible alternatif de propulsion le plus plausible, du fait de sa disponibilité et de son intérêt économique (réduction des coûts unitaires de transport) au-delà de ses atouts environnementaux.

Le développement du transport du GNL, la circulation des navires propulsés au GNL, le contexte des opérations d'avitaillement « navire/navire », mais aussi l'hypothèse d'un déversement de GNL, suscitent des interrogations légitimes quant aux conséquences d'un accident majeur lié à l'émergence de cette activité. Bon nombre d'études et de publications spécialisées sont accessibles sur le net. La démarche de Vigipol ne consiste en aucune façon à émettre un quelconque avis sur l'objectivité de ces travaux émanant d'organismes ayant une solide expérience dans le domaine du gaz mais de proposer, de manière synthétique, un éclairage sur un secteur d'activité en pleine mutation.

Tous droits réservés. Ce document, protégé par le droit d'auteur, est la propriété de Vigipol. Il ne peut être utilisé ou reproduit sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit sans autorisation écrite préalable de Vigipol ni sans citer la source.

© Vigipol - Février 2020

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
I. ÉTAT DES LIEUX	5
1. Impact du transport maritime sur la pollution de l'air et de l'environnement.....	5
2. Une transition énergétique nécessaire.....	5
II. FOCUS SUR LE GAZ NATUREL LIQUEFIE (GNL)	6
1. Caractéristiques et dangers potentiels.....	6
2. Inflammabilité : une loi fondamentale	6
III. LES ENJEUX DU GNL	7
1. Enjeux économiques.....	7
2. Géopolitique et sécurité énergétique	7
Sécurité et dépendance énergétique	7
Sûreté d'approvisionnement.....	8
3. Logistique et Industrie	8
Navires propulsés au GNL - État des lieux et prospective	8
Potentiel de la filière d'exportation du GNL	8
Les terminaux méthaniers flottants.....	9
Les terminaux méthaniers de regazéification	10
Élément clé de la logistique de transport : les méthaniers	11
4. Un secteur industriel et maritime en mutation.....	12
Développement de la filière GNL « combustible » - Entre projets et indécisions	12
Des infrastructures adaptées à la demande d'avitaillement en GNL carburant.....	12
Plus de méthaniers ou des méthaniers de grandes capacités de chargement	13
Des navires avitailleurs de « GNL carburant » ou « souteurs ».....	13
Des processus d'avitaillement spécifiques aux navires propulsés au GNL	13
IV. LE RISQUE DANS LE TRANSPORT MARITIME ET L'ACTIVITE INDUSTRIELLE ASSOCIEE	14
1. Dangers et risques : deux conceptions distinctes	14
Le risque majeur	14
L'accident majeur	15
Des accidents qui ont marqué l'histoire maritime et le secteur industriel	15
Rétrospective sur quelques catastrophes maritimes.....	15
Des accidents industriels majeurs	15
2. La prévention	16
Une prise de conscience internationale	16
Un évènement fondateur	16
Autres retours d'expérience significatifs.....	16
3. Processus de prévention.....	17
L'implication du facteur humain.....	17
4. L'accidentologie du Gaz naturel liquéfié	17

V. PROCESSUS D'ANALYSE ET D'ÉVALUATION DES RISQUES DANS LA « CHAÎNE TERRESTRE » D'APPROVISIONNEMENT DU GNL COMBUSTIBLE	19
1. Les terminaux méthaniers.....	19
2. Les engins terrestres d'avitaillement	20
VI. LES OPERATIONS DE SOUTAGE ET LA SECURITE PORTUAIRE	21
VII. ÉVALUATION DU RISQUE DANS LA CHAÎNE DU TRANSPORT, DU SOUTAGE ET DE LA PROPULSION AU GNL	22
1. Les transporteurs de gaz liquéfiés en vrac : méthaniers et souteurs.....	22
2. Les navires propulsés au GNL.....	23
VIII. FOCUS SUR LES PORTE-CONTENEURS PROPULSES AU GNL.....	24
1. Les « porte-conteneurs géants » entrent dans l'ère de la propulsion au GNL	24
2. Des installations complexes qui nécessitent des compétences particulières.....	25
IX. RISQUES ASSOCIES AU GNL COMBUSTIBLE.....	25
1. Risques associés à la circulation maritime	25
2. Risques associés au facteur humain.....	27
Formation et compétences spécifiques à l'utilisation du GNL combustible.....	27
X. PROBABILITE D'UN ACCIDENT MARITIME.....	27
1. Entre incertitudes et inconnues.....	27
XI. DANGERS DU GNL	28
1. Une évaluation des risques fondée sur des hypothèses	28
XII. PERTE DE CONFINEMENT DE GNL : SCENARIOS ACCIDENTELS	29
1. Des approches qui se veulent optimistes	29
2. Rapports d'évaluation de risques réalisés dans le cadre de projets	29
XIII. HYPOTHESES AVANCEES.....	30
1. Rappel fondamental	30
2. Explosion d'un mélange air-gaz en milieu confiné.....	30
3. Feu de torche ou Feu torche	30
4. BLEVE	31
5. Déversement de GNL à la mer : explosion par phase de transition rapide (RPT).....	31
6. Déversement de nappe, sans phase de transition rapide	31
7. Inflammation instantanée (feu de nappe).....	31
8. Effets cryogéniques.....	32
9. L'asphyxie.....	32
10. L'intoxication	33
11. Les projections.....	33
XIV. L'INCENDIE SECONDAIRE A BORD N'IMPLIQUANT PAS DIRECTEMENT LE GNL	33
XV. LES « SCENARIOS DU PIRE »	33
XVI. PREPARATION AUX SITUATIONS D'URGENCE	34
1. L'information et la formation des personnels embarqués et des services d'intervention	34

2. Une stratégie défensive adaptée.....	34
XVII. UNE MENACE POTENTIELLE	35
1. L'acte intentionnel ou l'atteinte à la Sûreté Maritime	35
CONCLUSION	37

I. ÉTAT DES LIEUX

1. Impact du transport maritime sur la pollution de l'air et de l'environnement

En ce début de XXI^{ème} siècle, le transport maritime représente 90 % des échanges commerciaux mondiaux. Il génère dans l'atmosphère divers polluants, notamment des oxydes de soufre (SOx) et d'azote (NOx), du CO₂. Son empreinte environnementale est une préoccupation mondiale partagée qui a conduit l'Organisation Maritime Internationale¹ et l'Europe² à programmer l'obsolescence des combustibles utilisés jusqu'à présent par le transport maritime notamment les fiouls lourds générateurs d'oxyde de soufre (SOx) et de particules (PM). Parallèlement, les zones SECA (*Sulfur Emission Control*) également sollicitées par l'OMI ont pour effet de restreindre plus encore l'utilisation de carburants sulfurés à l'intérieur de ces périmètres. Pour plus de précisions, le lecteur pourra se référer à l'étude de Vigipol³.

2. Une transition énergétique nécessaire

Le gaz naturel liquéfié (GNL), à ne pas confondre avec le GPL⁴ (gaz de pétrole liquéfié) figure au nombre des carburants potentiels de substitution. Rappelons toutefois que le GNL est issu de la liquéfaction de gaz naturel : combustible ou « énergie fossile non renouvelable ». La combustion du GNL présente un intérêt environnemental intéressant comparée à celle du fioul lourd traditionnel : réductions de l'ordre de 100 % des oxydes de soufre (SOx) et de particules fines, sans toutefois réduire totalement les émissions de polluants dans l'atmosphère, si l'on considère la diminution du taux d'oxyde d'azote (NOx) entre 80 et 85 %, celui du CO₂ entre 20 et 25 %.



*Logistique GPL (Angola)
Photo : Gilles Le Manac'h pour Vigipol*

¹ Annexe VI de MARPOL 73/78 - règles relatives à la prévention de la pollution de l'atmosphère par les navires - adoptée en 1997 par la Conférence des Parties à la Convention MARPOL, est entrée en vigueur le 19 mai 2005. Une version révisée de cette annexe, avec des limites d'émissions plus strictes a été adoptée en 2008 pour une entrée en vigueur en 2010.

² Directive européenne 2016/802/UE, portant sur « la teneur en soufre de certains combustibles liquides » ; entrée en vigueur le 9 septembre 2016.

³ La transition énergétique du transport maritime : enjeux économiques et stratégiques - incidences sur la sécurité maritime - Vigipol - Janvier 2020

⁴ Le gaz de pétrole liquéfié (butane et propane), abrégé en GPL (appellation utilisée en France) ou LPG (dans les autres pays francophones, tels que la Belgique et le Luxembourg), est un mélange d'hydrocarbures légers, stocké à l'état liquide sous pression (5 bar efficace) et issu du raffinage du pétrole pour 40 % et de traitement du gaz naturel pour 60 %. Le GPL carburant est particulièrement destiné aux véhicules routiers.

Ces performances s'expliquent de la façon suivante :

- > Réduction des émissions à la combustion par rapport au fioul lourd : Le gaz naturel est traité sur champ⁵ pour pouvoir être transporté et liquéfié dans de bonnes conditions (éviter la corrosion des installations en aval en particulier).
Ce traitement dépend du champ mais comprend d'une façon standard une séparation des condensats, une désacidification (élimination des composés soufrés et du dioxyde de carbone), une déshydratation et un dégasolinage. Ces opérations qui répondent aux spécifications du gaz naturel commercial réduisent très fortement le niveau et la nature des impuretés.
- > Amélioration des rendements de combustion par rapport au fioul lourd : Elle est due à la stœchiométrie⁶ de la combustion. Le ratio H/C (hydrogène/carbone) est beaucoup plus important pour le méthane et les produits légers qui l'accompagnent (éthane, propane, butane) que pour le fioul lourd.

II. FOCUS SUR LE GAZ NATUREL LIQUEFIE (GNL)

1. Caractéristiques et dangers potentiels

Le gaz naturel liquéfié (GNL) désigne le gaz naturel transformé sous forme liquide. Cet état est atteint lorsqu'il est refroidi à une température d'environ - 162°C à la pression atmosphérique. À cette température, le GNL est un liquide dit « cryogénique »⁷. Après traitement, la liquéfaction permet de le condenser en réduisant son volume d'un facteur de près de 600 pour un même pouvoir calorifique, ce qui facilite son transport par voie maritime. En clair, 1 L de GNL correspond à 600 L de gaz à la pression atmosphérique et température ambiante. D'une densité de 0,442 (442 kg par m³), le GNL est essentiellement constitué de méthane (à plus de 90 %). Principales données de sécurité : liquide inodore, sans couleur, non corrosif et non toxique, ONU n° 1972 - Classe 2.1 (dangers d'inflammabilité, d'explosivité et de suffocation, point d'éclair inférieur à - 136°C), gaz inflammable (catégorie 1.H220), gaz liquéfié réfrigéré (catégorie H281). Si le GNL est considéré non toxique, la combustion incomplète et la thermolyse⁸ produisent des gaz tels que CO, CO₂, hydrocarbures variés, aldéhydes et des suies dont l'inhalation est très dangereuse à forte concentration ou en atmosphère confinée⁹.

2. Inflammabilité : une loi fondamentale

Nous avons vu que le gaz naturel liquéfié (GNL) est extrêmement inflammable et que le mélange « vapeur/air », au contact d'une source d'ignition, peut dégager une force explosive notamment en espace clos.

Pour mémoire, le triangle du feu : la réaction chimique de « combustion », au sens large, ne se produit que si l'on réunit les trois composantes du triangle du feu (fig.1) :

- > **un combustible ou réactif réducteur** : gazeux (butane, propane, méthane, hydrogène, etc.), liquide (GNL, essence, gas-oil, huile, pétrole, etc.) ou solide (papier, bois, matière plastique, métal, etc.)
- > **un comburant** : le dioxygène (O₂), l'ozone, le protoxyde d'azote, le chlorate de sodium, l'acide nitrique, etc.
- > **une énergie d'activation** : calorifique (flamme, rayonnement thermique, etc.), chimique (décomposition, polymérisation, etc.)

⁵ Un champ de gaz est un gisement d'hydrocarbures qui ne contient que du gaz naturel, et éventuellement un peu de condensat et non pas du pétrole.

⁶ La stœchiométrie est un calcul qui permet d'analyser les quantités de réactifs et de produits qui sont en jeu au cours d'une réaction chimique (Jeremias Benjamin Richter 1762-1807). Le coefficient stœchiométrique, ou nombre stœchiométrique, donne les proportions dans lesquelles les différentes molécules d'une réaction chimique sont présentes.

⁷ Liquide maintenu à une température inférieure à -150°C.

⁸ Décomposition chimique causée par la chaleur.

⁹ Connaissance des énergies & Butagaz SAS : GNL, fiche de données de sécurité.

La disparition ou la suppression de l'un des éléments suffit - en théorie - à arrêter la combustion (le lien entre combustion et inflammation est encore mal défini). Au début des années 1980, l'analyse physico-chimique du feu fait l'objet d'une nouvelle approche dite « tétraèdre du feu » (fig.2) qui consiste : en oxygène, carburant, chaleur ainsi qu'une nouvelle composante « les radicaux libres » (formés de néo-molécules » provenant de l'oxydation des molécules du combustible) sans lesquels aucune combustion avec flamme ou propagation du feu n'est possible. Notamment, lorsque la combustion est vive, elle se traduit par une flamme, voire une explosion, une déflagration ou une détonation si le front de flamme dépasse la vitesse du son (fig.3).



Fig.1 - Triangle du feu

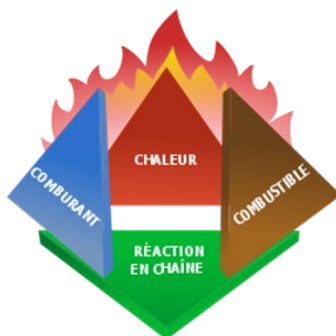


Fig.2 - Tétraèdre du feu



Fig.3 - Hexagone de l'explosion

III. LES ENJEUX DU GNL

1. Enjeux économiques

L'association internationale du secteur gazier « Cedigaz » considérait en 2015 « que la consommation de GNL en tant que carburant marin atteindrait quelque 77 millions de tonnes par an à l'échelle mondiale en 2035. Certains scénarios encore plus optimistes évoquent même le seuil de 160 millions de tonnes annuels d'ici à 2030. À cet horizon, la filière du GNL pourrait représenter entre 11 % et 40 % de la demande mondiale en carburant marin ».

Les innovations industrielles en cours de développement dans le domaine de la liquéfaction vont véritablement participer à cette croissance et rendre son coût plus compétitif. La mise en place d'une chaîne GNL requiert cependant des investissements financiers importants en termes d'exploitation (purification du gaz, liquéfaction, stockage, infrastructures d'exploitation, terminaux), de transport et d'avitaillement. La réalité du marché dépendra, in fine, de la demande en « GNL carburant » et des contraintes réglementaires et géopolitiques.

2. Géopolitique et sécurité énergétique

Sécurité et dépendance énergétique

Pour les pays qui ne disposent pas de ressources en gaz naturel (la plupart des pays européens à l'exception de la Norvège, du Royaume-Uni et des Pays-Bas) la sécurité d'approvisionnement, ou sécurité énergétique, dépend de la possibilité d'importer du gaz naturel en provenance de n'importe quel pays producteur et avec le moins de contraintes géographiques et géopolitiques. La livraison par gazoduc induit notamment une dépendance du pays consommateur envers le pays fournisseur ; elle peut être soumise à des aléas techniques et politiques¹⁰, qui plus est lorsque ces gazoducs traversent des zones à risque. Les navires méthaniers permettent une plus grande flexibilité d'approvisionnement. Le transport de GNL par voie maritime peut notamment s'affranchir partiellement de ces aléas eu égard à la multiplicité des sites de production dans le monde et du fait qu'une cargaison peut être redirigée en cours de route.

¹⁰ Exemple : conflits gaziers russo-ukrainiens de 2006 et 2014.

La France importe plus de 99 % du gaz naturel nécessaire à sa consommation¹¹. Le gisement de Lacq (Pyrénées atlantiques), qui participait de façon marginale à son approvisionnement, a cessé de produire en 2013 et l'exploitation de son potentiel en gaz de schiste fait l'objet d'une forte opposition.

« En 2018, environ un tiers du gaz consommé en France a été importé via ses terminaux méthaniers de regazéification, qui reçoivent plus de 200 bateaux par an¹² » ;

- > Fos-Cavaou (8,250 milliards de m³/an),
- > Fos-Tonkin (5,5 milliards de m³/an),
- > Montoir de Bretagne (10 milliards de m³/an)
- > Dunkerque Loon Plage (13 milliards de m³/an)

Sûreté d'approvisionnement

Sécurité d'approvisionnement et sûreté d'approvisionnement sont étroitement liées. Les routes maritimes ne sont pas spécialement sécurisées. Si le méthanier permet une relative sécurité d'approvisionnement elle peut être également impactée par des atteintes à la sûreté : actes de sabotage, de piraterie et de terrorisme ou conflits armés. Il en est de même pour les structures de méthanisation et d'avitaillement. L'instabilité actuelle dans le Golfe Persique (Détroit d'Ormuz) nous le rappelle, ainsi que le souligne Washington qui qualifie « le GNL américain gaz de schiste » de gaz de la liberté assurant la sécurité¹³.

3. Logistique et Industrie

Navires propulsés au GNL - État des lieux et prospective

Le nombre de navires actuellement propulsés au GNL, est relativement restreint. Les éléments de statistiques de Gaz-mobilité font état d'environ 140 navires en 2018, principalement utilisés en Mer du Nord et en Norvège (premier exploitant). Il s'agit surtout de ferries, de rouliers, de navires de croisière et autres navires de charges. À terme, plus de 10 000 navires pourraient être concernés par la propulsion au GNL¹⁴. La presse spécialisée confirme la tendance en annonçant chaque jour de nouveaux projets. Les plus gros utilisateurs devraient être les paquebots de croisière, certains sont déjà opérationnels, ainsi que les grands porte-conteneurs « *deep sea* » exploités principalement sur les lignes « Asie-Europe ». La CMA CGM, Maersk et Hapag-Lloyds, spécialisés dans le transport des conteneurs, ont déjà opté ou se prononcent pour une conversion partielle de leurs navires au GNL.

Potentiel de la filière d'exportation du GNL

En 2018, avec 316,5 millions de tonnes¹⁵, le marché du GNL atteint un record pour la cinquième année consécutive. Cette croissance de la capacité de production des terminaux de liquéfaction¹⁶ devrait se poursuivre. Actuellement, 25 pays exportent du GNL dans le monde. Tous disposent par définition d'une façade maritime. Le Qatar, l'Australie et la Malaisie contribuent à eux trois à 54 % des exportations. Les États-Unis connaissent également un développement rapide de la production nationale de GNL issu des « gaz de schiste » obtenus par fracturation hydraulique, ce qui pourrait les placer au deuxième rang des pays exportateurs¹⁷. Notons que Total, après avoir racheté les actifs de gaz naturel liquéfié de Toshiba au Texas va devenir le deuxième acteur privé mondial du GNL¹⁸.

¹¹ Contrairement aux idées reçues, le premier fournisseur de la France n'est pas la Russie mais la Norvège (31 %).

¹² Selectra - Le transport du gaz par méthaniers : bateaux et terminaux - 09.01.2019

¹³ Sputnik News, France - 30 mai 2019

¹⁴ Julien Burdeau : ex. directeur général délégué du Groupe GTT (Gaztransport & Technigaz), société d'ingénierie spécialisée dans les systèmes de confinement à membranes pour le transport maritime et le stockage du GNL (gaz naturel liquéfié).

¹⁵ World LNG report - 2 avr. 2019

¹⁶ Terminal de liquéfaction : site d'exportation de manière exclusive du GNL.

¹⁷ Les Échos - Gaz liquéfié : les États-Unis bientôt numéro deux mondial - 07.02.2019

¹⁸ L'usine nouvelle - 01.06.2019

Le GNL est de plus en plus transporté par navire méthanier. Si aujourd'hui il représente un tiers des flux mondiaux, cette progression pourrait atteindre 40 % à l'horizon 2023¹⁹.

Les terminaux méthaniers flottants

Des innovations techniques dans l'industrie « Offshore » devraient permettre une exploitation plus rapide des champs gaziers et l'augmentation des capacités de production de gaz naturel liquéfié.

Les FSRU (Floating Storage and Regasification Units) - certaines unités sont déjà fonctionnelles ou en cours de développement. Le FSRU est un navire stationnaire capable de charger du GNL sous forme liquide, le stocker et le regazéifier afin de le rendre immédiatement transportable dans les réseaux de gazoducs pour être distribué aux consommateurs.

Les FLNG (Floating Liquefied Natural Gas) - autre technologie en fin d'expérimentation, le FLNG, pendant du FPSO²⁰ (Floating Production Storage and Offloading), est une unité flottante stationnaire (navire, barge, sans propulsion propre) complexe : à la fois plateforme d'extraction, usine de liquéfaction du gaz naturel et citerne de stockage. L'intérêt du FLNG est de remplacer avantageusement une usine de liquéfaction à terre et d'éviter la construction de gazoducs. Les méthaniers se ravitaillent en GNL en s'y raccordant directement. Le développement des FLNG est cependant tributaire du prix du gaz. Shell (*FLNG Prelude*) et le Malaisien Petronas²¹ (*Statuet*) sont pour le moment les seuls groupes pétroliers à avoir développé un FLNG.

- > **Focus sur le FLNG *Prelude*.** Le FLNG *Prelude* a été livré en juin 2017 et mis en service fin 2018 après de nombreux tests. Nicolas Stiel dans Challenges Energie²² le présente comme suit : « [...] Dernier joyau de l'industrie des hydrocarbures [...] C'est le plus grand objet flottant du monde. Un monstre, un animal qui défie l'imagination. Fabriqué en Corée par l'armateur *Samsung Heavy Industries* (SHI) et le parapétrolier TechnipFMC pour le compte du géant Shell, la « chose » baptisée *Prelude* fait **488 m de long et 74 m de large** pour un port en lourd de 600 000 tonnes... Elle dispose de deux pistes d'atterrissage pour les hélicoptères et peut résister à un cyclone de classe 5 avec des vents supérieurs à 250 km/h [...] ». Le FLNG *Prelude*, dont le premier transfert de gaz est intervenu en juin 2018, est ancré par 250 m de fond à environ 475 km au nord-nord-est de Broome, en Australie occidentale. Sa capacité de production annuelle est estimée à 3,6 millions de tonnes de GNL, auxquelles s'ajoutent 1,3 million de tonnes de condensats et 400 000 tonnes de GPL ; production notamment destinée à alimenter le marché asiatique²³.
- > **Autres unités flottantes de liquéfaction (FLNG).** Après son premier FLNG, le « *PFLNG Satu* », la compagnie malaisienne Petronas vient de mettre en service le « *PFLNG Dua* », une unité de 393 m construite par le chantier sud-coréen de Samsung Heavy Industries (SHI), conçue pour exploiter des gisements situés jusqu'à 1 500 m de profondeur. Le « *PFLNG Dua* » devrait rejoindre très prochainement le champ malaisien Rota, en mer de Chine méridionale au large de Sabah où il sera ancré par 1 300 m de fond pour une production annuelle de GNL estimée à 1,5 millions de tonnes. Deux autres FLNG, plus modestes, sont actuellement en service : « *Hilli Episeyo* » au Cameroun (conversion d'un méthanier, géré par Perenco) et « *Tango* » en Argentine (alimenté par du gaz de schiste du gigantesque gisement de Vaca Muerta).

¹⁹ Rapport de l'Agence internationale de l'énergie 2018

²⁰ Un FPSO est une unité offshore stationnaire flottante autonome capable de traiter le pétrole brut et de le stocker avant son transbordement sur un navire pétrolier.

²¹ Petronas names *PFLNG Dua* in South Korea - Energie Global New - the quest for energy - 02.12.2019

²² Challenges Energie - Dans l'antre du *Prelude*, le plus grand bateau au monde - Nicolas Stiel - 23.05.2017

²³ Offshore Energy to Day.com Shell kicks off production at *Prelude* FLNG



*Méthanier Hoëgh Gallant (Norvège) - compromis entre Offshore Supply Vessel et FSRU, en travaux de maintenance à Brest
Photo : Thomas Le Manac'h pour Vigipol*

Les FLNG Near-shore (Floating Liquefied Natural Gas Near-Shore) ou concept de liquéfaction du gaz naturel à proximité des côtes - la société de classification DNV-GL²⁴ a délivré une approbation de principe (AIP) au concept de barge de liquéfaction « *FLNG Near-Shore* » également développé par le chantier sud-coréen *Hyundai Heavy Industries* (HHI), comme répondant aux règles de classification des navires ainsi qu'aux normes offshore. Mike Brogan - directeur technique de DNV-GL, *Newbuilding Classification Offshore* - estime « que les solutions flottantes telles que le concept HHI, pourraient fournir à l'industrie du GNL des solutions flexibles et rentables, particulièrement utiles dans les zones de ressources gazières terrestres où la construction de terminaux de liquéfaction n'est pas réalisable ou souhaitable ». ²⁵ Dans l'émergence du marché des FLNG, le concept « *FLNG Near Shore* », comparé à la complexité du « *FLNG offshore* », pourrait se placer en tête de ces innovations technologiques en développement. L'Amérique du Nord est fortement susceptible de recourir à ce processus pour l'exploitation de ses gaz de schiste (études d'optimisation en cours) ²⁶.

Les terminaux méthaniers de regazéification ²⁷

Une fois à destination, les méthaniers déchargent leur cargaison sur un terminal doté d'une installation de réception et de stockage cryogénique du GNL dans des réservoirs similaires à ceux utilisés sur les sites de liquéfaction.

Plus de 130 terminaux de regazéification sont en activité dans le monde, dont une trentaine au Japon. En Europe, les principaux terminaux se trouvent en Espagne (7 terminaux et 27 réservoirs de stockage), au Royaume-Uni, en France et en Italie. En 2018, la capacité totale de regazéification de GNL en Europe était de l'ordre de 227,8 milliards de m³, soit environ 20 % des capacités mondiales. Actuellement, le développement de la filière d'avitaillement en GNL « carburant maritime » concerne surtout l'Europe du Nord à partir des principaux ports que sont Stockholm, Hambourg, Rotterdam et Anvers.

²⁴ Det Norsk Veritas - Germanischer Lloyds : Société de classification reconnue, membre de l'Association internationale des sociétés de classification (IACS).

²⁵ LNG World Shipping - FLNG barge concept gets AIP - 13 May 2019 by John Snyder

²⁶ OnePetro - Cost Optimized Solutions for Near Shore FLNG - 2018

²⁷ Terminal de regazéification : site d'importation de manière exclusive du GNL.

Élément clé de la logistique de transport : les méthaniers

Les méthaniers sont des navires citernes spécialisés dans le conditionnement et le transport du gaz naturel liquéfié (GNL), sur de grandes distances, entre les sites de gisements et de liquéfaction de gaz naturel et les ports méthaniers. Le premier méthanier fut le *Methane Pioneer* qui, lors de son voyage inaugural en 1959, des Etats-Unis au Royaume Uni, avait chargé 5 000 m³ de GNL. Les méthaniers sont toutefois adaptés aux sites les plus éloignés. Un méthanier se déplace à une vitesse moyenne assez rapide de 19 nœuds, contre 13-14 nœuds pour les pétroliers traditionnels. La différence de vitesse s'explique par la légèreté du méthanier, qui profite de la faible densité du GNL.

Les méthaniers sont traditionnellement répartis en trois catégories²⁸. De nouveaux concepts sont à l'étude.

- > Les **méthaniers à membrane** comprennent une cuve intégrée à la coque. Ils représentent plus de la moitié de la capacité mondiale du transport de GNL. La part de marché des méthaniers à membrane est appelée à se développer eu égard à leur technique de conception qui permet notamment la construction de navires de très grandes dimensions.



Méthanier à membranes en attente de chargement (Angola)

Photo : Gilles Le Manac'h pour Vigipol

- > Les **méthaniers à sphères** comprennent quatre à cinq cuves de forme sphérique, non intégrées à la coque, construites en aluminium recouvert d'un matériau isolant. Ils sont reconnaissables à leurs grandes sphères qui dépassent largement du pont du navire. L'inconvénient des méthaniers à sphères réside dans leur volume et leur poids supérieurs aux méthaniers à membranes pour une même capacité de GNL transporté.



Méthanier à sphères - LNG Rivers dans le goulet de Brest

Source : Pline (Wikimedia Commons, free media repository)

²⁸ Le transport du gaz par méthaniers : bateaux et terminaux - Selectra - 9 janvier 2019

- > Les **méthaniers prismatiques** transportent du GNL dans des conteneurs en aluminium indépendants de la coque du navire. Issus de technologies japonaises et coréennes ils nécessitent moins de matériaux isolants.

Quel que soit la technologie et la qualité de l'isolation, une partie du GNL se réchauffe et se vaporise durant le transport. Le gaz qui se trouve dans le ciel des cuves est soit utilisé pour la propulsion du méthanier, soit libéré dans l'atmosphère. Sur certains modèles récents le gaz est reliquéfié.

4. Un secteur industriel et maritime en mutation

Le recours au GNL implique : l'instauration d'une nouvelle chaîne logistique de transport et d'avitaillement, plus de méthaniers, des navires avitailleurs ou « souteurs », plus de terminaux portuaires, mais aussi une gestion de la sécurité optimisée à bord des navires propulsés au GNL. En clair : une modification significative des us et coutumes du transport maritime.

Développement de la filière GNL « combustible » - Entre projets et indécisions

Le développement de la filière GNL comme combustible marin est étroitement tributaire du potentiel de stockage des terminaux méthaniers, du déploiement des infrastructures correspondantes et d'une logistique de transport et d'avitaillement appropriée, in fine : de la volonté décisionnaire des États. A l'heure actuelle l'existant des infrastructures et des navires d'avitaillement ou de soutage constitue l'un des principaux freins au développement du GNL combustible marin. La situation semble toutefois s'inverser.

Des infrastructures adaptées à la demande d'avitaillement en GNL carburant

De nombreux projets sont en cours de réalisation dans le monde. L'Union européenne (UE) est très engagée sur le sujet. La Directive 2014/94/UE²⁹ demande notamment aux États membres d'élaborer un cadre d'action national facilitant le déploiement d'infrastructures pour carburant alternatif (CANCA) qui devra désigner, pour le volet maritime et fluvial, un nombre approprié de points de ravitaillement en GNL dans les ports maritimes et intérieurs. Quelques projets d'intérêt commun ont ainsi été adoptés récemment par l'Union européenne : Shannon (Irlande), Go4LNG Göteborg (Suède) et KrK (Croatie).

En 2015, L'État français déclarait soutenir l'installation de systèmes de distribution de GNL³⁰, soutien réitéré lors du Comité interministériel de la Mer du 21 novembre 2017. La France peine cependant à se positionner dans le marché du soutage. Des projets de terminaux méthaniers un temps envisagés ont été abandonnés, parfois sous la pression d'associations et de mouvements divers : Fos (nouveau site), Antifer, le Verdon. Actuellement, les solutions d'avitaillement ne peuvent dépendre que des terminaux en place sur les trois façades maritimes françaises : Marseille (Fos-Cavaou, Fos-Tonkin), Montoir de Bretagne (Nantes - Saint-Nazaire) et Dunkerque. Notons que depuis 2007 l'Union européenne, dans le cadre du programme RTE-T³¹, accorde des soutiens financiers importants pour des études et des projets d'installations de soutage dans les ports, et d'adaptation ou de construction de navires à propulsion GNL. Seuls six projets français ont bénéficié de subventions pour un montant très en-deçà du montant total européen accordé sur la même période, parmi lesquels : Seagas de Brittany Ferries (BAI) pour des études d'avitaillement GNL à Roscoff et Santander, Dunkerque Grand Port Maritime (GPM), Samuel LNG : *retrofit*³² de la drague Samuel de Champlain. Brittany Ferries a notamment confié à Repsol la construction de deux terminaux de soutage, d'une capacité unitaire de 1 000 m³, à Bilbao et Santander pour l'avitaillement (*shore-to-ship*) de ses futurs ferries *Salamanca* et *Santona*³³.

²⁹ Directive 2014/94/UE du Parlement européen et du Conseil du 22 octobre 2014 sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants

³⁰ Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, aussi dite de manière abrégée « loi de transition énergétique » ou « loi sur la transition énergétique et pour la croissance verte »

³¹ Le « réseau transeuropéen de transport » RTE-T (en anglais TEN-T) est un programme de développement des infrastructures de transport de l'UE. Il concerne notamment les réseaux routiers, ferroviaires et de voies navigables, ainsi que les ports et les aéroports.

³² Anglicisme couramment utilisé dans l'industrie navale pour modifier, réajuster, un navire ou une installation.

³³ Le Marin - 01.08.2019

Plus de méthaniers ou des méthaniers de grandes capacités de chargement

Selon le rapport annuel du Groupe international des importateurs de GNL (GIIGNL), fin 2017 (derniers éléments de statistiques accessibles), 511 navires méthaniers sillonnaient les océans soit une augmentation de 6,9 % par rapport à 2016, tandis que les carnets de commandes affichaient 120 navires, dont 109 de plus de 50 000 m³, 72 attendant d'être livrés en 2018. La tendance est cependant au gigantisme, après les méthaniers Q-FLEX apparaissent les méthaniers Q-MAX. Le Q-MAX de la compagnie qatarienne Qatargas (son nom provient de la taille maximale autorisée dans le port Qatari) est le plus grand méthanier au monde (345 m de longueur pour 54 m de largeur). Il permet de transporter près de 266 000 m³ de GNL en un seul trajet. Un chargement de ce méthanier répond à la demande de gaz naturel annuelle d'une ville comme Lyon. Ce type de navire supprime les Q-FLEX, autres géants d'une capacité de 215 000 m³. De son côté, la compagnie pétrolière nationale du Qatar « Qatar Petroleum » a récemment annoncé le lancement, durant la prochaine décennie, d'un programme de construction de 100 méthaniers destinés au transport du GNL dont 50 à 60 méthaniers géants de la série Q-FLEX et Q-MAX (Mer & Marine - 02.05.2019).

Après les porte-conteneurs, les méthaniers entrent ainsi dans l'ère du « gigantisme ». La Chine envisage notamment de construire le plus grand méthanier au monde, pour réduire les coûts du transport. Il sera capable de transporter 270 000 m³ de GNL.

Des navires avitailleurs de « GNL carburant » ou « souteurs »

L'émergence d'une flotte d'avitailleurs de GNL carburant se précise. Actuellement 10 avitailleurs sont en service dans le monde exploités essentiellement en Europe du nord (7), Etats-Unis (1) Espagne (2) pour une capacité de chargement comprise entre 180 et 7500 m³ (il n'y avait qu'un seul souteur en 2017). Les commandes ne cessent de se multiplier. 12 autres avitailleurs sont en projet ou en construction dont la capacité varie entre 370 et 20 000 m³, notamment : un souteur de 12 000 m³ pour le duo « Mol-Total marine fiouls » qui sera positionné à Singapour – un souteur de 18 600 m³ prévu à Rotterdam pour l'avitaillement des neuf porte-conteneurs au gaz de 22 000 EVP commandés par la CMA CGM - un souteur de 2 500 m³ destiné à la baie de Tokyo (Japon) - deux souteurs de 20 000 m³, avec quatre options de navires supplémentaires pour l'opérateur norvégien Stolt Nielsen. Trois autres projets concernent le transport fluvial³⁴.

Les souteurs sont conçus comme les méthaniers. Ils présentent un niveau de sécurité équivalent (double coque, cuves à membrane, inertage, isolation thermique, etc.).

Des processus d'avitaillement spécifiques aux navires propulsés au GNL

Les opérations de soutage ou « *bunkering*³⁵ » du GNL combustible se rapprochent des pratiques d'avitaillement des produits pétroliers. Certaines sont déjà opérationnelles notamment en Europe du nord et aux USA. Le développement du soutage de GNL demeure cependant étroitement associé à l'existant des terminaux et des satellites d'avitaillement, à leur proximité, aux considérations techniques propres à l'activité et au profil des navires utilisateurs de GNL combustible : infrastructures portuaires, volumes nécessaires par opération, navires souteurs d'une capacité d'avitaillement adaptée, fréquence des demandes. La compétitivité des ports en termes de prix du GNL combustible sera également un facteur contributif.

Plusieurs possibilités d'avitaillement peuvent être envisagées, mais quelle que soit la chaîne logistique développée celle-ci démarrera toujours d'un terminal GNL, pour arriver jusqu'à la bride du navire à souter.

- > Soutage ***Truck-to-Ship ou LNG easy*** - Particulièrement utilisée pour alimenter les navires à passagers et les ferries, cette solution, à moindre coût, consiste généralement en un transfert direct d'un camion-citerne au navire ou à partir de plusieurs camions-citernes connectés à un dispositif de distribution. Elle est rapide et facile à mettre en œuvre dans un large périmètre autour des terminaux GNL (plusieurs centaines de kilomètres) ; les quantités livrables restent cependant limitées (soutages unitaires de 250 tonnes maxi environ).

³⁴ Source - Le Marin : Le boom des souteurs de GNL carburant – Frédérick AUVRAY - 28.02.2019

³⁵ Bunkering : anglicisme couramment utilisé pour opération d'avitaillement.

- > Soutage **Shore-to-Ship** - Cette solution comprend une station satellite de stockage à terre où le navire à souter vient s'approvisionner. Cette station est elle-même approvisionnée à partir d'un terminal GNL. Elle peut aussi permettre le développement d'une solution *Truck-to-Ship*. Les opérations *Shore-to-Ship* ont lieu généralement dans des environnements sensibles qui nécessitent une évaluation approfondie des risques.
- > Soutage **Ship-to-Ship (STS)** - Le procédé consiste à transférer le GNL combustible d'un navire ou d'une barge d'avitaillement à un autre navire en attente sur rade ou en en opération commerciale à quai. Il s'adresse plus particulièrement aux grands navires (navires de croisière, grands porte-conteneurs...) qui nécessitent d'importantes quantités de GNL en un seul avitaillement. Le STS suppose une disponibilité de volumes importants de GNL combustible à terre (terminaux portuaires méthanières ou unités de stockage satellites) à même d'approvisionner un souleveur de grande capacité de chargement qui peut, le cas échéant, servir de satellite flottant. Les opérations de soutage *Ship-to-Ship* exigent des normes de sécurité strictes et une exécution sans faille tenant compte des spécificités des deux navires impliqués.

IV. LE RISQUE DANS LE TRANSPORT MARITIME ET L'ACTIVITE INDUSTRIELLE ASSOCIEE

Le transport maritime consiste à faire circuler par mer toutes sortes de marchandises, dangereuses ou non, en grandes quantités que les navires chargent et déchargent dans les ports. Cette activité, tout au long de la chaîne de transport, est source de risques qui parfois génèrent des incidents ou des accidents plus ou moins conséquents. Ceux-ci résultent généralement d'un aléa, d'une vulnérabilité, d'une erreur humaine. Ils peuvent interagir entre eux, s'amplifier et s'aggraver.

1. Dangers et risques : deux conceptions distinctes

Les dangers sont les effets potentiellement inhérents à une activité ou à l'utilisation d'un produit ; ils ne peuvent être fondamentalement supprimés. L'identification d'un danger doit permettre d'analyser, d'évaluer le risque d'accident et sa probabilité pour prévenir ses effets préjudiciables sur les personnes et l'environnement. Les risques qu'il est impossible d'éliminer doivent pouvoir être atténués. Dangers et risques (d'accident) sont deux concepts distincts mais étroitement liés. Les risques peuvent être maîtrisés, voire réduits, par des mesures de prévention adaptées (directives et normes d'encadrement réglementaire et de sécurité, procédures, consignes, etc.). Un exemple souvent cité : l'installation électrique de 220 volts d'une habitation présente un danger d'électrocution, c'est un fait immuable. Qu'elle soit réalisée selon les normes, et correctement utilisée, réduit de manière très significative le risque d'accident, l'information y contribue également ; nous avons tous été sensibilisés au fait de ne pas toucher des fils dénudés sous tension et de ne pas utiliser un appareil électrique près de l'eau. Autre exemple : le passage à niveau sur une ligne de chemin de fer.

Le risque majeur

Le risque majeur est la possibilité d'un événement grave d'origine terrestre, maritime, anthropique, naturelle, dont les effets peuvent dépasser les capacités de réaction de la société. Ce risque doit être objectivement étudié, évalué et faire l'objet de communication et d'information au public.

L'accident majeur

L'accident majeur est le pendant du risque majeur. Pour l'Union européenne³⁶ et la France³⁷, un accident majeur est un événement tel qu'une émission de gaz, de produit radioactif, d'agent pathogène, de polluant, un incendie ou une explosion, pouvant associer une ou plusieurs substances dangereuses, qui résulte de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement, et entraîne pour la santé humaine un danger grave immédiat ou différé.

Des accidents qui ont marqué l'histoire maritime et le secteur industriel

De nombreuses catastrophes humaines et environnementales ont marqué et continuent de marquer l'histoire.

Rétrospective sur quelques catastrophes maritimes

- > **Naufrage du *Titanic*** : dans la nuit du 14 au 15 avril 1912, lors de son voyage inaugural de Southampton à New York, le paquebot *Titanic* heurte un iceberg au large de Terre Neuve et coule, en moins de 3 heures, causant la mort de 1 503 personnes. Le navire était considéré comme insubmersible.
- > **Collision entre le cargo *Mont-Blanc* et le cargo *Imo*** : le 6 décembre 1917, le cargo français *Mont-Blanc*, entre en collision avec le cargo norvégien *Imo* dans le port d'Halifax (Canada). Le *Mont Blanc*, chargé de 2 300 tonnes d'acide picrique sec, 200 tonnes de trinitrotoluène (TNT), 10 tonnes de nitrocellulose et 35 tonnes de benzol, explose, bilan : 2 000 morts et 9 000 blessés, pour la plupart, des curieux attirés par un premier incendie³⁸.
- > **Explosion de l'*Ocean Liberty*** : en Août 1947, l'*Ocean Liberty* chargé, de 3 000 tonnes d'ammonitrates, et de pièces mécaniques diverses, explose dans le port de Brest, faisant 26 morts et de nombreux blessés.
- > **Naufrage du ferry *Herald Of Free Enterprise*** : le 6 mars 1987, le navire coule à la sortie du port de Zeebrugge (Belgique), faisant 188 victimes.
- > **Naufrage du ferry *Estonia*** : dans la nuit du 28 septembre 1994, l'*Estonia* qui transportait 989 personnes fait naufrage entre Tallinn (Estonie) et Stockholm (Suède). Ce dramatique accident coûte la vie à 852 personnes et suscite encore aujourd'hui de nombreuses controverses sur les causes réelles du naufrage et le déroulement exact des faits.
- > Rappelons aussi les catastrophes écologiques dont furent victimes les côtes bretonnes provoquées par l'*Amoco Cadiz* le 16 mars 1978, le *Tanio* le 7 mars 1980 et l'*Erika* le 12 décembre 1999.

Des accidents industriels majeurs

- > **La catastrophe de la raffinerie de Feyzin** : Le 4 janvier 1966 à la suite d'une opération d'entretien sur une prise d'échantillon d'une sphère de stockage de propane, celui-ci s'est répandu dans l'enceinte de la raffinerie et sur les voies de circulation à proximité (l'autoroute A7 et la RD4). La nappe de gaz s'est enflammée au contact d'un véhicule et a entraîné l'explosion d'autres sphères de stockage de propane. La catastrophe a fait 18 morts et 84 blessés. L'onde de choc a provoqué des dégâts jusqu'à 8 km.
- > **La catastrophe de Seveso** : le 10 juillet 1976, un nuage d'herbicide qui sera identifié comme agent « 2,3,7,8-TCDD³⁹ » - surnommé plus tard dioxine de Seveso - s'échappe durant vingt minutes d'un réacteur de l'usine chimique ICMESA, située dans la commune de Meda (Italie), et se répand sur la plaine lombarde ; quatre communes, dont Seveso, sont touchées ; l'émission de TCDD n'est déclarée aux autorités que le 19 juillet ; le même jour, alertées par le Centre de recherche médicale de Roche, à Bâle qui déclare que la population doit être évacuée et qu'il faut détruire les maisons et enterrer l'usine, les autorités procèdent le 23 juillet à l'évacuation de plus de 200 personnes ; la zone touchée étant plus vaste,

³⁶ Directive 96/82/CE du Conseil du 9 décembre 1996 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses

³⁷ Arrêté du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement

³⁸ ICI - Nouvelle Ecosse (2017) – Il y a 100 ans une explosion défigurait la ville d'Halifax.

³⁹ TCDD ou 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine, surnommée dioxine de Seveso - adoption de la Directive Seveso.

500 nouvelles personnes sont évacuées ; le directeur de production est arrêté ; le directeur général du Groupe industriel reconnaît qu'il n'existe aucun plan d'urgence.

- > **La catastrophe de Los Alfaques (Espagne)** : l'explosion d'un camion-citerne le 11 juillet 1978 près du camping de Los Alfaques, due à une surcharge en propylène (gaz inflammable), provoque une rupture de l'enveloppe de la citerne sous l'effet de la pression interne du gaz qui s'échappe et entraîne un phénomène de BLEVE⁴⁰ - Bilan : 217 morts et de nombreux blessés parmi les résidents du camping.
- > **La catastrophe de l'usine AZF de Toulouse**⁴¹ : explosion de nitrate d'ammonium le 21 septembre 2001 qui fera 31 victimes et 2 500 blessés.
- > **La catastrophe nucléaire de Fukushima (Japon)** : le 11 mars 2011, un tsunami provoque l'accident majeur de la centrale nucléaire.
- > **La catastrophe de Tianjin (Chine)** : en août 2015, une explosion de produits chimiques suivie d'une terrible onde de chocs dévaste la zone portuaire de Tianjin (Chine) et de ses environs.
- > Etc.

2. La prévention

Une prise de conscience internationale

Lors d'un accident, de nombreuses questions sont immanquablement posées : l'évaluation et l'analyse des risques étaient-elles suffisamment appréhendées, les personnes impliquées avaient-elles la compétence nécessaire, leur comportement a-t-il été déterminant ?

Un évènement fondateur

En 1914, deux ans après le naufrage du Titanic, les nations maritimes, réunies à Londres, adoptent la Convention internationale SOLAS⁴² (Safety of Life at Sea) ou Convention sur la sauvegarde de la vie humaine en mer. Au fil du temps, l'Organisation Maritime Internationale⁴³ (OMI) n'aura de cesse de faire évoluer le texte et favorise l'adoption d'une quarantaine de conventions et protocoles et de plus de 1 000 recueils de règles et recommandations ayant trait à la sécurité maritime, à la prévention de la pollution en mer et autres questions connexes et s'efforce de garantir que les mesures qu'elle a adoptées sont convenablement mises en œuvre au niveau international.

Autres retours d'expérience significatifs

Notons, entre autres décisions opportunes, l'obligation des doubles coques faite aux navires citernes, suite au naufrage de l'Erika et les mesures de prévention adoptées suite aux catastrophes de Seveso et d'AZF Toulouse.

⁴⁰ BLEVE (acronyme de l'anglais : « boiling liquid expanding vapor explosion ») peut être défini comme une vaporisation violente à caractère explosif consécutif à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique (cas du GNL).

⁴¹ Adoption de la Loi Risques.

⁴² Sous ses formes successives, la Convention SOLAS est généralement considérée comme le plus important de tous les instruments internationaux ayant trait à la sécurité des navires de commerce. La première version a été adoptée en 1914, en réponse au naufrage du Titanic, la deuxième en 1929, la troisième en 1948 et la quatrième en 1960. La version de 1974 inclut la procédure d'acceptation tacite, qui prévoit qu'un amendement entrera en vigueur à une date spécifiée à moins que, avant cette date, des objections à l'amendement ne soient reçues d'un nombre convenu de Parties.

⁴³ Créée en 1948, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) est une institution spécialisée des Nations unies, spécialisée dans les questions maritimes. Son siège se situe à Londres.

3. Processus de prévention

Gérer les risques consiste à évaluer de manière exhaustive les dangers que présentent un secteur d'activité dans ses dimensions techniques, humaines et organisationnelles, en s'appuyant le cas échéant sur le principe connu du « retour d'expérience » ou REX⁴⁴ (accidentologie, incidents et presque incidents), mais aussi (ou à défaut) sur l'identification des hypothèses techniques et opérationnelles sensées assurer un niveau de sécurité optimal. La démarche contribue à l'élaboration des directives et règles internationales, européennes et nationales qui évoluent en fonction des circonstances et des innovations.

L'implication du facteur humain

Depuis quelques années on assiste à une volonté de développer une culture de « gestion de la sécurité » qui associe directement les facteurs humains et organisationnels dans un système de planification de procédures dont l'efficacité est contrôlée régulièrement par des audits. On retiendra notamment, la norme ISO 9001⁴⁵ (management qualité-sécurité) pour l'industrie et les Compagnies maritimes, ainsi que le Code ISM⁴⁶ (Code international de gestion de la sécurité) applicable aux compagnies et leurs navires. Pour autant, dans le secteur maritime, 85 % des accidents demeurent imputables au facteur humain.

4. L'accidentologie du gaz naturel liquéfié

La base de données ARIA⁴⁷ recensait, au 3 novembre 2015, 13 accidents impliquant essentiellement des installations de gaz naturel liquéfié (GNL) à terre dont trois en France. Ces accidents, pour la plupart, étaient imputables à des travaux, notamment de maintenance (dommages causés par des engins, défaillance d'équipements) ainsi qu'à des erreurs humaines ou organisationnelles dans l'application des procédures. Au nombre des phénomènes dangereux recensés, ARIA relève : 5 explosions, 2 incendies, 6 rejets de gaz et les conséquences humaines inhérentes aux explosions par effets de surpression et de projection :

- > 136 morts à Cleveland (Etats-Unis) en 1944
- > 27 morts et 74 blessés dans le complexe pétrochimique de Skikda (Algérie) en 2004. Trois unités de liquéfaction sur les six que comporte le Complexe GL1/K sont fortement endommagées et soumises à un feu intense, occasionnant d'important dégâts sur les installations et habitations voisines. La centrale thermique de Sonelgaz, mitoyenne au complexe de GNL, a déclenché sous l'effet de l'onde de choc de l'explosion.

⁴⁴ MIR (Master Ingénierie des Risques) : Le retour d'expérience, un instrument de gouvernance des risques - Flavien Beauchet, Clément Fernandez, Mathias Roger, Laure Ruallem - Université Paris Descartes (25/01/2016)

⁴⁵ La norme ISO 9001 est publiée par le sous-comité 2 (SC 2) du comité technique 176 (TC 176), souvent associée à la norme qualité ISO 14001 (management environnemental) et OHSAS 18 001.

⁴⁶ Code international sur la gestion de la sécurité des navires - en application du chapitre IX de SOLAS et de la Résolution OMI A.741(18)

⁴⁷ Ministère en charge du développement durable/Direction générale de la prévention des risques/Service des risques technologiques/BARPI - Base de données ARIA : accidentologie du gaz naturel liquéfié - État au 03.11.2015 (recense essentiellement les événements accidentels qui ont, ou qui auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publique, l'agriculture, la nature et l'environnement).



*Accident de Skikda (Algérie)
Photo : Le Matin d'Algérie.com*

Certains accidents auraient pu avoir des conséquences dramatiques si les ouvrages avaient contenu du GNL au moment de leur endommagement.

Dans le secteur maritime du transport et de l'utilisation du GNL comme carburant, force est de constater qu'aucun accident majeur ou dégât conséquent, aucune victime, ne sont actuellement à déplorer. Les incidents les plus récurrents ont pour origine une fuite de gaz liquéfié provoquant, sur les premiers méthaniers notamment, des cassures de pont, de dôme et de bordé, sachant que quelques litres de GNL à -160°C suffisent. Une étude du *Lloyds* (2001) décrit brièvement 10 cas de fuites de GNL impliquant des bateaux-citernes transportant du GNL, entre 1965 et 1989.

Quelques faits

- > **Incident lors du chargement du *Tellier*, méthanier de 40 000 m³ appartenant à la CGM⁴⁸** - En février 1989, le navire étant en cours de chargement à SKIKDA, une très violente tempête s'est soudainement levée. Estimant la situation au quai de chargement intenable, le commandant a décidé d'appareiller en catastrophe. Il n'a pas été possible de détacher les manifolds⁴⁹ de chargement si bien que le navire en quittant le poste de chargement les a arrachés. Du GNL a coulé sur le pont au droit du poste de chargement, occasionnant instantanément des cassures des tôles de pont sur un quart de la largeur du navire. Sans autre possibilité de se mettre à l'abri, le commandant a décidé malgré la tempête de poursuivre sa route vers Marseille en surveillant l'évolution des fissures de pont. Le navire a pu regagner Marseille où il a été remis en état. L'isolation de la cuve a dû être enlevée sur une très grande surface pour accéder à la structure et aux tôles de pont endommagées, ce qui a nécessité plusieurs mois d'immobilisation.
- > **Dégazages forcés⁵⁰** - En octobre et novembre 2004, les méthaniers *Tellier* et *Descartes*, chargés d'acheminer du gaz naturel liquéfié (GNL) depuis l'Algérie, sont bloqués quelques jours au large de Fos-sur-Mer, à la suite d'un mouvement de grève des marins. Les deux navires contenaient 40 000 et 50 000 m³ de GNL. Comme sur tout méthanier, une partie du GNL se vaporise en permanence et entraîne une augmentation de la pression dans les cuves. En marche normale, ce gaz naturel d'évaporation est récupéré pour la propulsion. Mais par mesure de sécurité, en cas d'immobilisation en mer, le gaz doit être libéré ; étant plus léger que l'air, il se dilue dans l'atmosphère. Aussi, durant cette période, 4 000 m³ de gaz ont dû être rejetés à 30 m de hauteur, soit 1 600 tonnes.

Le taux relativement faible des incidents/accidents répertoriés, ainsi que leurs conséquences si elles ont parfois généré des victimes, ne permettent pas d'en tirer des enseignements probants.

⁴⁸ Incident rapporté par Bernard Le Guern - ex-directeur technique de la CGM.

⁴⁹ Tuyaux prévus pour le déchargement de la cargaison.

⁵⁰ Base de données ARIA 28524 - 30/10/2004 -13 - FOS-SUR-MER Naf 50.20

V. PROCESSUS D'ANALYSE ET D'ÉVALUATION DES RISQUES DANS LA « CHAÎNE TERRESTRE » D'APPROVISIONNEMENT DU GNL COMBUSTIBLE

1. Les terminaux méthaniers

La Directive « Seveso 3 » : une directive européenne - Pour mémoire, la directive Seveso⁵¹ fait suite au rejet accidentel de dioxine en 1976 sur la commune de Seveso en Italie entraînant une catastrophe humaine et environnementale. Elle impose aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs, ou « sites Seveso », et d'y maintenir un haut niveau de prévention. Sont notamment concernées, **les stations terrestres fixes de gaz naturel liquéfié (terminaux et satellites d'avitaillement) dont les capacités de stockage sont supérieures à 200 tonnes ; elles sont classées « Seveso 3 - Seuil Haut ».**

La directive a pour objectif, de réduire la probabilité et les conséquences d'un accident sur un site industriel, selon quatre modules d'analyse et d'intervention :

- > La maîtrise du risque à la source par l'exploitant.
- > La maîtrise de l'urbanisation (éloigner les populations du danger).
- > L'organisation des moyens de secours.
- > L'information du public.

La directive Seveso a-t-elle démontré son rôle fondamental dans la prévention et la gestion d'accidents majeurs ? Le récent incendie de l'usine Lubrizol⁵² à Rouen notamment ses impacts sur la population et l'environnement suscitent encore des interrogations. Notons, qu'à l'instar des Bureaux d'Enquêtes et d'Analyses (BEA Transports, BEA Aviation civile, BEA Mer), services publics spécialisés qui conduisent leurs enquêtes en toute indépendance, il n'existe aucun équivalent dans le domaine des sites industriels.

La réglementation française : l'Arrêté ministériel du 29 septembre 2005, et sa circulaire d'application, déterminent les règles relatives à « l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation » dont les installations relevant de la directive Seveso 3. L'Arrêté précise notamment le processus d'élaboration des études de dangers des installations classées soumises à autorisation, en application de l'article L. 512-1 du code de l'environnement⁵³ et de la législation des « installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) ».

Tout projet de terminal ou de satellite méthanier à terre requiert une étude de risques qui consiste à vérifier que l'installation envisagée sera conçue de manière à garantir la protection des personnes et de l'environnement dans une démarche de réduction des risques à la source. L'étude doit identifier l'ensemble des dangers inhérents à l'installation, notamment les fuites ou déversement de GNL, les défaillances humaines raisonnablement prévisibles, ainsi que les dangers d'origine externe tels que : séismes, impacts de navires, chutes d'avions, incendie ou explosion dans une installation voisine, etc. Les phénomènes dangereux et les accidents plausibles, en termes d'effets sur les populations et l'environnement, doivent faire l'objet de scénarios de criticité⁵⁴, permettant notamment de déterminer les zones interdites au public.

⁵¹ La directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3, relative aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, est entrée en vigueur le 1er juin 2015.

⁵² Dans la nuit du 26 septembre 2019 une partie de l'usine Lubrizol à Rouen et trois bâtiments de Normandie Logistique ont été ravagés par un gigantesque incendie, provoquant un énorme panache de fumée noire sur 22 km.

⁵³ Art. L 512-1 du Code de l'environnement – Livre V Titre 1 partie réglementaire

⁵⁴ La criticité est définie comme le produit de la probabilité d'occurrence d'un accident par la gravité de ses conséquences : $\text{criticité} = \text{probabilité} \times \text{gravité}$. La criticité est une échelle de mesure de l'impact d'une défaillance et donc du niveau d'acceptabilité d'un risque. Classiquement, l'échelle va de l'impact « insignifiant » à l'impact « catastrophique ».

Suite à l'explosion de nitrate d'ammonium sur le site AZF de Toulouse, la « Loi Risques »⁵⁵ prévoit également la mise en place d'un outil de maîtrise de l'urbanisation aux abords de certaines installations industrielles à haut risque ou « plans de prévention des risques technologiques (PPRT) ».

La DREAL⁵⁶ répertorie les « risques majeurs » associés à un accident de type industriel et leurs conséquences sous l'acronyme EIT (explosion – incendie – toxicité) :

- > Les risques d'explosion (E) : effets irréversibles ou létaux par onde de choc et éclats coupants tels que bris de vitre.
- > Les risques d'incendie (I) : effets irréversibles ou létaux par brûlures du rayonnement thermique.
- > Les risques d'émission toxique (T) : effets irréversibles ou létaux par intoxication.

Les quatre terminaux d'avitaillement en France (Fos-Cavaou, Fos-Tonkin, Montoir de Bretagne, Dunkerque) sont répertoriés « EI », le GNL, en l'état, ne générant pas de risque d'émission toxique.

L'évaluation des risques d'une installation de GNL sera avant tout fonction de la configuration du site. Une grande expertise dans le domaine du gaz sera nécessaire pour mener à bien les études et les dossiers soumis à l'approbation de l'Etat. Plusieurs ports de l'Europe du Nord, pionniers dans l'utilisation du GNL combustible, adoptent une approche qualitative de type HAZID/ENVID⁵⁷ basée sur l'identification des principaux modes de défaillance.

En France le projet SAFE SECA⁵⁸ (Oil and Gas), développé en 2014 par les ports d'HAROPA⁵⁹ (Grands ports de la baie de Seine) et ses partenaires - toujours en instance d'approbation - a déjà permis de réaliser des études de risques et de proposer des projets de règlements locaux (RLMD). Les exigences du Code ISPS, dans sa partie « installations et approches portuaires », sont également à prendre en considération.

Dans le cadre de l'étude d'un dossier, à défaut de retours d'expérience, les modélisations sur l'impact d'un déversement accidentel ou volontaire non maîtrisé de GNL, sont, à fortiori, analysées empiriquement⁶⁰ par des organismes et des sociétés de classification reconnus pour leurs compétences dans le domaine du gaz. Leurs conclusions, bien qu'elles s'appuient sur des hypothèses, s'avèrent parfois sans appel quant à la criticité des risques potentiellement identifiés. Ces études ne s'adressent pas systématiquement au grand public, ou font l'objet d'une information quasi confidentielle.

2. Les engins terrestres d'avitaillement

La circulation et le stationnement des camions citernes GNL sont règlementés par l'Accord européen relatif au « transport international des marchandises dangereuses par route (ADR)⁶¹ » et l'Arrêté relatif au transport de marchandises dangereuses par route, par chemins de fer et par voies de navigation intérieures, dit Arrêté TMD⁶².

⁵⁵ Loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

⁵⁶ DREAL -Provence Alpes-Côte d'Azur - Cartographie des établissements Seveso

⁵⁷ « L'hazard Identification (HAZID) » associée à « L'Environmental Issues Identification (ENVID) » est une démarche de recherche de risque qui consiste essentiellement à identifier les conséquences des scénarios de défaillance et les moyens mis en œuvre pour maîtriser les risques encourus plutôt qu'à décrire les scénarios de défaillance eux-mêmes.

⁵⁸ SAFE SECA – Méthodologie : SEVESO (estimation gravité X probabilité = criticité). En réponse à MARPOL annexe VI, à la Directive 1999/32CE modifiée par - Directive 2005/33 CE et la Directive 2012/33 UE « Study for Alternative Fiouls and Experiment in Seine and Channel Area »

⁵⁹ Haropa : Complexe portuaire qui regroupe les ports de Paris, de Rouen et du Havre dans un G.I.E. (groupement d'intérêt économique).

⁶⁰ Empiriquement au sens « qui s'appuie sur l'expérience ».

⁶¹ ADR en vigueur le 1^{er} janvier 2017.

⁶² Version consolidée le 1^{er} janvier 2019.

VI. LES OPERATIONS DE SOUTAGE ET LA SECURITE PORTUAIRE

Le soutage du GNL diffère du contexte du transport méthanier qui s'effectue à grande échelle. L'avitaillement en GNL (ou soutage) est une opération particulièrement sensible où le GNL est transféré, en quantité plus ou moins importante, d'une source de distribution déterminée vers un navire utilisant ce gaz comme combustible. Différents acteurs et opérateurs y participent : l'autorité portuaire, le fournisseur, le personnel chargé de la sécurité, les personnels embarqués sur le ou les navires impliqués, l'administration.

En France, le « Règlement général de police dans les ports maritimes de commerce et de pêche⁶³ » et le « Règlement pour le transport et la manutention des marchandises dangereuses dans les ports maritimes (RPM)⁶⁴ », modifié depuis peu, permettent l'avitaillement en GNL⁶⁵. Complémentairement au RPM (de portée générale) une adaptation des règlements portuaires locaux (RLMD) est néanmoins nécessaire pour prendre en compte les spécificités portuaires des opérations relatives à l'avitaillement en GNL. Les RLMD, arrêtés par les Préfets de Département, précisent notamment les zones et les conditions dans lesquelles les opérations d'avitaillement du GNL combustible peuvent être effectuées au regard de l'évaluation des risques requise à cet effet pour chaque zone concernée.

Entrent dans ces dispositions : les ports maritimes, l'intérieur des limites administratives du port, éventuellement toute zone d'application délimitée par le Préfet du Département. Le RPM, tel que récemment modifié, stipule que l'avitaillement en GNL peut être réalisé : par un navire de soutage, un bateau ou chaland de soutage (eaux intérieures), une ou plusieurs citernes, telles que définies dans les réglementations modales relatives au transport de marchandises dangereuses (véhicules-citernes, citernes mobiles, conteneurs-citernes, etc.), sauf dispositions particulières fixées par les règlements locaux. Ces opérations sont effectuées conformément au RPM et règlements portuaires particuliers (RLMD). Le soutage réalisé à partir d'une installation fixe de stockage de GNL n'est pas couvert par le RPM.

L'utilisation exponentielle à l'échelle mondiale du GNL comme combustible de propulsion étant susceptible de créer des disparités et des distorsions de concurrence entre États, il est apparu nécessaire d'harmoniser les opérations de soutage par un encadrement international et européen.

L'entrée en application (2017) de la norme internationale EN ISO 20519⁶⁶ permet aux navires concernés d'effectuer des opérations de soutage de façon sûre et durable. Elle a été élaborée sur un partage de connaissances et d'expertises⁶⁷ dans le domaine du Gaz. La norme contient des exigences qui ne sont pas couvertes par le Code IGC. Son application se réfère aux cinq chapitres suivants :

- > matériel : systèmes de transfert de liquide et de vapeur
- > procédures opérationnelles
- > exigence pour le fournisseur de GNL de fournir un bon de livraison de soutage
- > formation et qualifications du personnel intervenant
- > exigence pour les installations de GNL de respecter les normes ISO et les codes locaux applicables

L'ISO 20519 prévoit, entre autres, pour chaque opération de soutage, une zone de sécurité⁶⁸ dont le périmètre est déterminé sur la base des résultats des analyses de risques réalisée et documentée selon les dispositions du paragraphe 6.3.2, ainsi qu'une liste formatée de contrôle de soutage⁶⁹.

⁶³ Règlement général de police dans les ports maritimes de commerce et de pêche (art. L. 5331-2 du Code des Transports / ancien art. L. 302-1 du code des ports maritimes et article L. 208-83 du Code de l'Environnement)

⁶⁴ Annexe à l'arrêté du 18 juillet 2000 modifié réglementant le transport et la manutention des matières dangereuses dans les ports maritimes (RPM), modifié le 13.12.2018 – consolidé en janvier 2019.

⁶⁵ Ces dispositions entreront en force le 24.05.2020.

⁶⁶ Norme ISO 20519/2017 - Navires et technologie maritime - Spécification pour le soutage des navires fonctionnant au gaz naturel liquéfié, élaborée à la demande de l'Organisation maritime internationale (OMI), de la Commission européenne et du Baltic and International Maritime Council (BIMCO), la plus grande association internationale de transports maritimes.

⁶⁷ Des spécialistes du secteur maritime, de fabricants de matériel, de la « Society for gas as a Marine Fuel (SGMF) », de sociétés commerciales, de sociétés de classification, de registres internationaux et de l'US Coast Guard.

⁶⁸ Norme ISO 20519/2017 – Annexe B : Analyse des risques et zones de sécurité

⁶⁹ Listes élaborées par la SGMF (the Society for Gas as a Marine Fuel) et l'Association Internationale des Ports (IAPH).

L'Europe, dans le même objectif d'harmonisation, a publié, sous l'égide de l'Agence de sécurité maritime européenne (EMSA), un Recueil de recommandations⁷⁰ sur les opérations de soutage destiné à l'administration et aux autorités portuaires des États membres.

VII. ÉVALUATION DU RISQUE DANS LA CHAÎNE DU TRANSPORT, DU SOUTAGE ET DE LA PROPULSION AU GNL

1. Les transporteurs de gaz liquéfiés en vrac : méthaniers et souteurs

La sécurité du transport maritime du gaz naturel liquéfié (GNL) est encadrée par le Recueil IGC⁷¹ ou Code international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des gaz liquéfiés en vrac⁷². Les prescriptions du Code s'appliquent aux navires, quel que soit leur tonnage, qui effectuent une navigation internationale. Le recueil IGC, est révisé périodiquement en tenant compte de l'expérience acquise et des progrès intervenus. Il n'intègre pas la formation, la manutention dans les ports qui font l'objet d'encadrements réglementaires spécifiques.

Il s'inspire du Recueil IBC⁷³ relatif à la construction et à l'équipement des navires transportant des produits chimiques dangereux en vrac. Le Code IGC, en l'état, ne prévoit pas de prescriptions particulières pour les souteurs.

En fonction de la dangerosité du ou des types de gaz qu'ils sont admis à transporter, les navires sont classés en quatre catégories de conception : 1G (valeur maximale), 2G, 2PG, 3G. Les méthaniers et les souteurs transportant du GNL appartiennent au « type 2G » (Chap.2.2) : normes de construction moins restrictives - produits qui appellent des **mesures importantes** de prévention des déversements.

Pour information, les navires de type 1G, transportant des gaz particulièrement toxiques (anhydride sulfureux, bromure de méthyle, chlore, oxyde d'éthylène) sont conçus pour une **prévention maximale** des déversements. Le chapitre 14 du Code ne prévoit pas de prescriptions particulières de protection du personnel en service sur les méthaniers. Les procédures médicales d'urgence font référence à la table n°620 du guide GSMU⁷⁴.

Les techniques de conception des méthaniers sont fort complexes et évoluent rapidement. Elles ont pour principal objectif d'atténuer les effets préjudiciables pour les personnes à bord, d'assurer la résistance de la structure et l'intégrité du navire et la protection de l'environnement. Méthaniers et souteurs sont conçus avec un acier adapté aux basses températures notamment dans les zones où des fuites de GNL, susceptibles d'entrer en contact avec les structures internes ou celles du pont, peuvent provoquer des cassures. Comme tout navire citerne, ils disposent d'une double coque qui permet en cas d'avarie d'une ou de plusieurs citernes de réduire le risque de déversement de GNL à la mer. Les méthaniers sont isolés thermiquement pour maintenir le gaz à l'état liquide en minimisant les déperditions énergétiques. Les cuves, dites « adiabatiques »⁷⁵ (c'est-à-dire sans pertes thermiques) sont protégées par une double barrière remplie d'azote gazeux destiné à empêcher, du moins limiter, toute réaction avec l'oxygène atmosphérique (dispositif d'inertage). Une double coque peut cependant, être sujette dans le temps à de la corrosion voire de fissures (cracks) : « pour un méthanier, possibilité d'entrée d'eau par leur intermédiaire dans l'espace d'isolation des cuves »⁷⁶.

⁷⁰ European Maritime Safety Agency (EMSA) : Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities/Administrations – 31.12.2018

⁷¹ Code IGC : International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk - Edition de 1993 à jour des amendements de la Résolution OMI MSC.32 (63)

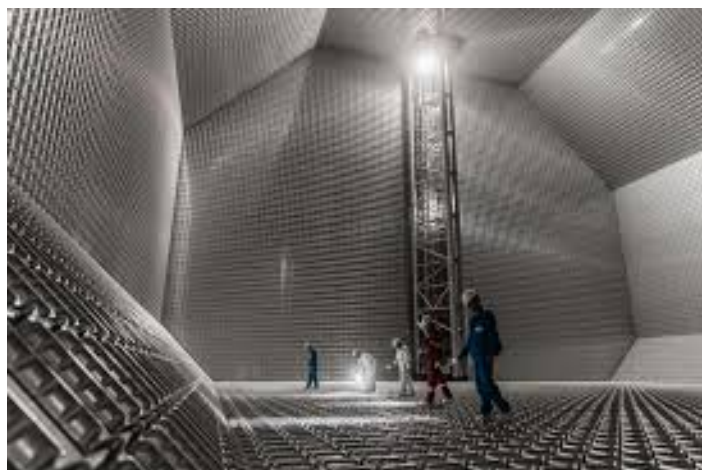
⁷² Ces gaz sont listés dans le chapitre 19 du Recueil IGC dont le méthane (GNL).

⁷³ Code IBC : International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk – Résolution OMI.MEPC.166(56) - amendé par les Résolutions MEPC.225(64) et MSC.340(91).

⁷⁴ Guide de soins médicaux d'urgence à donner en cas d'accidents dus à des marchandises dangereuses - supplément du Guide médical international de bord (substances chimiques).

⁷⁵ Du Grec *adiabatos* (infranchissable).

⁷⁶ D. Roux – Capitaine au long cours, Commandant de méthaniers (E.R) – Risques du GNL - Débat public sur le projet du nouveau de terminal méthanier d'Antifer (Seine Maritime)



Cuves GNL

Source : Archives-ouvertes.fr

Le Recueil IGC a démontré, sans conteste, son efficacité à prévenir les accidents majeurs dus au transport du GNL encadré par des normes de sécurité supérieures à celles applicables aux autres navires de charge. Il devrait en être de même pour la conception des souteurs qui relève des mêmes exigences. L'évaluation des risques (chap.1.2) concerne l'ensemble des gaz liquéfiés listés au chapitre 19. Les risques identifiés, l'incendie et l'explosion, demeurent toutefois les plus importants dans la configuration du GNL à l'état gazeux plus léger que l'air (formation de poches de gaz) auxquels il convient d'ajouter les effets annexes potentiels de cryogénisation (cassures de structures métalliques, brûlures du personnel) et les risques d'asphyxie.

2. Les navires propulsés au GNL

La propulsion au gaz naturel liquéfié n'est pas une innovation au sens du terme. Depuis des décennies, les méthanières, pour la plupart, récupèrent, durant le voyage, le gaz naturel qui s'évapore de la cargaison comme combustible pour alimenter leur système de propulsion (turbines à vapeur, moteurs)⁷⁷. Cette pratique constituait jusqu'à présent une exception dans le transport maritime.

Les normes de conception et d'exploitation des navires propulsés au GNL⁷⁸ relèvent du Recueil IGF⁷⁹ ou Code international fixant les « règles de sécurité applicables aux navires qui utilisent des gaz ou d'autres combustibles à faible point d'éclair ». Dans cette configuration, le GNL carburant est stocké dans des citernes indépendantes qui alimentent des moteurs de propulsion à gaz ou mixtes. Le volume des citernes dépend de l'autonomie et du type de navire concerné.

Le Recueil IGF précise les normes spécifiques d'installation et de protection des cuves et des circuits d'alimentation en GNL avec pour principale orientation de préserver la résistance de la structure et l'intégrité du navire et atténuer au maximum les effets préjudiciables pour les personnes à bord et l'environnement. Sont notamment pris en considération les risques qui peuvent découler de toute défaillance technique et humaine raisonnablement prévisible. C'est notamment le cas de l'explosion identifié par le Code comme risque majeur dont il convient de limiter les effets lorsqu'ils sont susceptibles :

- > de causer des dommages à un local contigu à celui où s'est produit l'explosion, perturber le bon fonctionnement de l'équipement ou des systèmes situés dans ce local ;
- > d'endommager le navire au point de provoquer un envahissement d'eau au-dessous du niveau du pont principal ou bien un envahissement progressif ;
- > d'endommager les zones de travail ou les locaux d'habitation au point de causer des blessures aux personnes se trouvant dans ces zones ou locaux dans les conditions normales d'exploitation ;

⁷⁷ Petite encyclopédie gazière : Boil Off Gas, les évaporations du GNL.

⁷⁸ Navires autres que les navires visés par le chapitre 16 du Recueil IGC : utilisation de la cargaison comme combustible.

⁷⁹ Recueil IGF (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels) adopté par la résolution MSC.391(95) du 11 juin 2015, telle que modifiée.

- > de perturber le bon fonctionnement des postes de sécurité et des locaux de tableaux de distribution nécessaires pour l'alimentation en énergie ;
- > d'endommager le matériel de sauvetage ou les dispositifs de mise à l'eau connexes ;
- > de perturber le bon fonctionnement du matériel de lutte contre l'incendie situé à l'extérieur du local endommagé par l'explosion ;
- > d'affecter d'autres zones du navire au point de risquer de provoquer une réaction en chaîne affectant notamment la cargaison, le combustible gazeux et les hydrocarbures de soute, ou d'empêcher les personnes d'accéder aux engins de sauvetage ou obstruer les échappées.

À noter que le Recueil IGF instaure des règles relatives aux opérations et au contrôle des opérations de soutage « navire/navire » (chap. 15.4 et 18.4) alors que le Recueil IGC ne prévoit pas pour les souteurs, dont la fonction première est l'avitaillement, d'autres dispositions que celles relatives aux opérations de transfert de cargaison avec la terre (chap. 18.8).

Le Recueil IGF devrait être en mesure d'offrir un niveau de sécurité équivalent aux navires utilisant le GNL comme combustible de propulsion. Les risques majeurs sont identiques à ceux précédemment cités. Néanmoins, à défaut de retour d'expérience, le déploiement ainsi que profil des navires propulsés au GNL sont autant de facteurs potentiellement accidentogènes qui doivent être appréhendés de manière exhaustive, notamment :

- > la forte implication du facteur humain, source d'erreurs humaines dont la plus importante : la collision,
- > l'extension d'un incendie de machine ou autres aux systèmes d'alimentation en combustible,
- > le risque majeur inhérent à la cargaison pour ne citer que les incendies et explosions de conteneurs avec les conséquences observées⁸⁰,
- > le manque de formation ou la formation inadaptée du personnel embarqué,
- > les atteintes à la sûreté.

L'entrée en force du Recueil est relativement récente (1^{er} janvier 2017). Le texte devrait évoluer dans sa rédaction au gré des retours d'expériences et de l'utilisation de nouveaux combustibles à faible point d'éclair tel que l'hydrogène.

VIII. FOCUS SUR LES PORTE-CONTENEURS PROPULSES AU GNL

1. Les « porte-conteneurs géants » entrent dans l'ère de la propulsion au GNL

Pour exemple, le groupe français CMA CGM (actuellement quatrième transporteur maritime mondial de conteneurs) vient de mettre à l'eau le plus grand porte-conteneurs au monde propulsé au gaz naturel liquéfié (GNL). Construit à Shanghai au chantier naval *China State Shipbuilding Corporation (CSSC)*, le *CMA CGM Jacques Saadé* (du nom du fondateur du groupe), long de 400 m, large de 61 m et capable de transporter 23 000 EVP, est la tête de série des neuf « LNG POWERED » commandés en 2017 en Chine par CMA CGM qui rejoindront très prochainement la flotte du groupe sur la *French Asia Line* (Asie-Nord-Europe)⁸¹.

Ces navires, immatriculés au Registre International Français (RIF), bénéficient de toutes les innovations et optimisations en termes de protection de l'environnement, de transition énergétique, de sécurité maritime, d'assistance et d'aide à la décision du commandant et de l'équipage. Les « LNG POWERED » disposent de 18 600 m³ de GNL nécessaires aux voyages aller-retour sur les routes traditionnelles « Asie-Europe » avec un seul soutage dans les ports nord-européens.

⁸⁰ *Le risque d'incendie et d'explosion à bord des porte-conteneurs* - Yannick Le Manac'h pour Vigipol - Novembre 2018

⁸¹ « Première mondiale, le *CMA CGM Jacques Saadé* est construit autour du réservoir qui contiendra les 18 000 m³ de GNL nécessaires aux voyages aller-retour sur les routes Asie-Europe sur lesquelles le navire sera exploité » - CMA/CGM - the *CMA CGM Jacques Saadé*, the world's first 23,000 TEU powered by LNG

Pour un même rayon d'action, ce nouveau type de propulsion requiert des quantités de GNL deux fois plus importantes que pour une propulsion classique au HFO ainsi qu'un souteur de même capacité. Il convient cependant de s'interroger sur le positionnement des soutes de GNL, placées sous le château avant (à proximité immédiate des emménagements) et quant à la sécurisation des conteneurs transportant des « dangereux » par rapport aux installations de stockage du combustible. Cette disposition est en contradiction avec les recommandations du recueil IGF.

CMA Ships (filiale de CMA CGM) travaille également sur le projet « PERFECT » (*Piston Engine Room Free Efficient Containership*). Il s'agit d'un porte-conteneurs de 400 m de long et 20 000 EVP, sans salle des machines, doté du système moderne de propulsion « COGAS » associant des turbines en cogénération GNL/vapeur et des moteurs électriques. Trois moteurs électriques installés sur une ligne d'arbres accorderaient une puissance totale de 80 MW pour une vitesse moyenne de 22 nœuds. Deux citernes de 10 960 m³ de GNL reliées à la turbine, permettraient une rotation Europe-Asie à des coûts encore plus intéressants. Ce porte-conteneur, pouvant atteindre une vitesse de 22 nœuds, disposerait d'un ratio combustible/puissance de 60 % contre 52 % pour un moteur diesel conventionnel. Notons que l'absence de machines permettrait à ce type de navire d'augmenter le volume de la cargaison mais aussi de réduire significativement l'équipage.

Le stockage du gaz, qui utilise deux fois plus de volume de soute que le fioul, aura été une des questions importantes dans la conception des navires⁸².

2. Des installations complexes qui nécessitent des compétences particulières

« La sophistication des installations de propulsion au GNL et des systèmes de cargaison est nettement plus complexe que les installations classiques fonctionnant aux combustibles traditionnels. Les moteurs de propulsion au GNL doivent disposer d'une double injection gaz-fioul, d'une commande hydraulique séparée des systèmes d'injection et des soupapes d'échappement, le tout géré par ordinateur, des compresseurs à très haute pression, d'un système d'alimentation en gaz à double paroi avec ventilation de l'inter-espace et détection de gaz etc.

Plus que sur un méthanier, l'exploitation et la conduite d'un porte-conteneur ou tout autre navire propulsé au GNL qui plus est, dont le chargement présente des risques, imposent de très hautes qualifications ainsi qu'une compétence acquise et reconnue des personnels en charge de la machine, des dispositifs et des opérations de soudage qui, dans le temps, nécessiteront un entretien suivi et très rigoureux »^{83 84}

IX. RISQUES ASSOCIES AU GNL COMBUSTIBLE

1. Risques associés à la circulation maritime

Porte d'entrée occidentale de l'Europe, la pointe bretonne est un passage obligé entre les grands ports de la mer du Nord et le reste du monde. C'est aussi pour le navigateur la transition entre la haute mer et les rails de navigation de la Manche - ou Dispositifs de Séparation du Trafic (DST)⁸⁵ - qui canalisent le transport maritime le long de voies de navigation obligatoires autour desquelles gravitent navires à passagers, navires de pêche et de plaisance. Outre les conditions de navigation souvent difficiles, la densité du trafic est importante, le risque de collision est omniprésent.

Il est encore trop tôt pour analyser l'impact du GNL combustible sur la sécurité du transport maritime.

⁸² Table ronde sur le carburant GNL - « shipping day », rendez-vous annuel d'Armateur de France - 10 avril 2018.

⁸³ Ces précisions techniques nous sont communiquées par Bernard Le Guern, ex-directeur technique de la CGM, membre du Pool Experts de Vigipol.

⁸⁴ Le risque d'incendie et d'explosion à bord des porte-conteneurs - Vigipol – Novembre 2018

⁸⁵ Le rail d'Ouessant a été recomposé en 2003 à deux voies de navigation pour tous les navires, et repoussé plus au large que le dispositif d'origine. La voie montante, large de 5 milles, commence à 24 milles de l'île. Au large se trouve une zone de séparation de 5 milles (interdite au transport des dangereux), puis une voie descendante de 5 milles de largeur.

Le bilan d'activité des missions opérationnelles du CROSS Corsen⁸⁶, récemment publié, nous rappelle cependant l'importance du trafic maritime dans la zone Trans/manche. Selon le CROSS Corsen, « au cours de l'année 2018, 42 640 navires soumis aux comptes rendus obligatoires (CRO)⁸⁷ se sont signalés lors de leur passage dans la zone de report d'Ouessant, soit près de 117 navires par jour en moyenne... 274,82 millions de tonnes de marchandises dangereuses et/ou polluantes ont été déclarées à l'occasion de comptes-rendus obligatoires à Ouessant-Trafic, dont 222,68 millions de tonnes de liquides inflammables⁸⁸, soit 81 % du total (essentiellement des hydrocarbures) ... 270 avaries ou arrêts pour maintenance ont été signalées au CROSS (-12,6 %). Leur répartition géographique est homogène le long des routes de navigation... 1 836 transits ont été enregistrés dans la double voie⁸⁹ (+10,2 %). La vigilance de l'autorité maritime sur l'emprunt de la voie à double sens demeure maximale vis-à-vis des navires invoquant des raisons de sécurité (15 cas en 2018) ».

Force est de constater que les collisions, à l'échelle mondiale, sont en constante augmentation. Une collision se produit généralement entre deux navires en route, entre un navire en route et un navire au mouillage mais aussi entre un navire et une infrastructure portuaire ou fluviale, voire avec un corps flottant. Tous les types de navires sont concernés. Étonnamment, les navires militaires ne font pas exception⁹⁰. Les collisions ont lieu en haute mer, en zone côtière, dans les estuaires et chenaux resserrés, et les zones portuaires. Considérée comme le résultat d'une négligence, une collision est essentiellement et structurellement associée au facteur humain. Elle peut être meurtrière. L'émergence de méthaniers entrant dans l'ère du gigantisme à l'image des grands porte-conteneurs bientôt propulsés au GNL, la généralisation des navires propulsés au GNL et les navires souteurs, vont modifier substantiellement les conditions de la sécurité du transport maritime en accentuant notamment le risque et les conséquences d'une collision. De ce fait, pour limiter l'impact d'un accident, de nombreux pays réglementent l'accès et la circulation des méthaniers dans les chenaux ; lorsqu'un méthanier est engagé dans un chenal, l'accès du chenal est interdit aux autres navires. Un navire peut suivre un méthanier mais en aucun cas le croiser.



*Collision du superpétrolier Sanchi le 6 janvier 2018 - Aucun survivant parmi les 36 membres d'équipage
Source : Iranian Students New Agency*

⁸⁶ CROSS Corsen : Centre spécialisé du ministère chargé des transports et de la mer, relevant de la direction interrégionale de la mer Nord Atlantique-Manche Ouest (DIRM NAMO), le Centre régional opérationnel de surveillance et de sauvetage de Corsen est implanté sur la commune de Plouarzel dans le Finistère.

⁸⁷ CRO : comptes-rendus obligatoires de tous les navires de plus de 300 UMS transitant dans un cercle de 40 milles nautiques de rayon centré sur la tour du Stiff implantée sur l'île d'Ouessant.

⁸⁸ Le chiffre inclut indistinctement la part du GNL transporté.

⁸⁹ Les conditions d'emprunt de la double voie sont définies par l'arrêté n°2017/085 du préfet maritime de l'Atlantique qui réglemente la navigation dans le DST d'Ouessant (en sont exclus les navires transportant, au sens large des marchandises dangereuses, au sens de MARPOL Annexe 2, SOLAS Chap.II-1 et du Code IMDG).

⁹⁰ Deux destroyers de l'US Navy fortement endommagés lors de deux collisions - Note de Roger Coguic pour Vigipol (Juin 2018)

2. Risques associés au facteur humain

Formation et compétences spécifiques à l'utilisation du GNL combustible

La généralisation de l'utilisation du GNL comme combustible de propulsion à bord des navires soumis au Recueil IGF ne peut se concevoir sans un objectif de formation spécifique et de compétences dans ce domaine.

Les récents amendements au Code international STCW⁹¹ - section A-V/3 prévoient les prescriptions minimales obligatoires de formation et de qualifications des capitaines, des officiers et de tous membres d'équipage directement responsables des précautions à prendre à l'égard du GNL combustible, des dispositifs de stockage, des circuits d'alimentation et des opérations de soutage. Ces personnels doivent au préalable, être titulaires du certificat de formation de base aux opérations liées à la cargaison des navires citernes pour gaz liquéfiés relevant du Code IGC.

La sous-traitance du recrutement des marins organisé par des « sociétés de manning », sur la base du moins disant social encouragé par les États⁹², suscite quelques doutes quant à l'adéquation des prérogatives et des compétences en matière d'exploitation du GNL sur les navires. Force est de constater, à l'échelle mondiale, la courbe ascendante du recrutement de personnel navigant à « bas coût » (en provenance de l'Inde, du Bangladesh, d'Indonésie ou d'Ukraine) dont on peut douter de leur compétence, ce qui n'a pas manqué récemment d'interpeller l'Agence Européenne de la Sécurité Maritime (EMSA)⁹³.

Les études de risques relatives aux opérations portuaires requièrent également la nécessité de former l'ensemble des personnels impliqués dans les opérations de soutage du GNL : connaissance et maîtrise des risques, connaissance des techniques, encadrement et supervision des opérations d'avitaillement, entretien et contrôle du niveau de formation, etc. Si la formation s'applique en premier lieu aux personnels portuaires, elle devrait être étendue à l'ensemble des acteurs susceptibles d'intervenir dans le cas d'un déversement de GNL, en termes d'évaluation, de techniques de lutte ou de mise en sécurisation, comme le recommandent l'EMSA⁹⁴ et la norme ISO 20519/17.

X. PROBABILITE D'UN ACCIDENT MARITIME

1. Entre incertitudes et inconnues

Déterminer le niveau de risque d'un d'accident majeur c'est, à tout préalable, évaluer l'accident dans sa globalité, sa gravité potentielle et sa probabilité d'occurrence, définir et justifier les mesures techniques de prévention permettant d'en minimiser les effets du moins les rendre acceptables. La première démarche relève de la compétence des experts, des industriels, de l'accidentologie, et des retours d'expérience (REX)⁹⁵.

Dans le secteur maritime du transport et de l'utilisation du GNL, les mesures techniques qui résultent de cette combinaison d'expertises et de technologies sont intégrées dans la Convention internationale SOLAS, les Recueils IGC et IGF. Les Recueils IGC et IGF encadrent techniquement la prévention des risques majeurs que sont « l'explosion » et « l'incendie ». Si le Recueil IGC a démontré sa capacité à garantir un niveau de sécurité élevé, souhaitons qu'il en soit de même pour les navires propulsés au GNL (Recueil IGF). Cependant, ces directives n'abordent pas les conséquences et les effets potentiels d'un accident majeur sur les navires, les personnes et l'environnement. De ce fait, contrairement aux installations de GNL à terre, il n'existe aucun standard de procédures relatives au déversement accidentel voire intentionnel de GNL **en zone maritime** par un méthanier, un soudeur, un navire propulsé au GNL.

⁹¹ STCW – Convention internationale sur les normes de formation, de certification et de veille, amendée des Accords de Manille de 2010 - Circulaire OMI STCW.7Circ.16

⁹² Dont la France : Loi Macron - Amendement n° 2820

⁹³ Mer & Marine - 15.04.2019

⁹⁴ EMSA - Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities/Administrations - 31.12.2018

⁹⁵ Le retour d'expérience (REX) est un processus de réflexion mis en œuvre pour tirer les enseignements positifs et négatifs de projets en cours ou terminés.

Pour les installations à terre, la France impose une méthodologie d'évaluation des risques qui prend en compte tous les scénarios physiquement possibles quelle que soit leur probabilité, contrairement à plusieurs États européens qui notamment ont écarté le risque de BLEVE⁹⁶ dans la mesure où les installations de GNL ne sont théoriquement pas sujettes à ce phénomène car non dimensionnées pour résister à une montée en pression⁹⁷.

Si l'arrêté du 29 septembre 2005 ne concerne pas directement le secteur maritime, il introduit une notion de « classe de probabilité » qui correspond à la fréquence à laquelle un incident peut se produire durant la vie d'une installation. L'annexe 1 définit cinq classes de probabilité : A, B, C, D, E. Dans l'absolu, la classe de probabilité « E » - la plus élevée - pourrait correspondre à l'hypothèse d'un feu ou d'une explosion de nappe consécutifs à un déversement de GNL depuis un navire. Fondée uniquement sur des hypothèses, l'approche qualitative d'un tel d'accident ne s'inscrit dans aucune des autres classes (A, B, C, D). Quant à l'échelle temporelle de probabilité (annexe 1), la fréquence indicative (par unité et par an) est de 10 puissance-5, autant dire proche du « risque zéro » !

Classe de probabilité	Classification de l'évènement	Fréquence indicative de probabilité
E	Possible mais extrêmement peu probable : <i>Évènement qui n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations</i>	$P < 1 \times 10^{-5}$ / an (moins d'une fois tous les 100 000 ans)

L'Arrêté stipule néanmoins (annexe 1, renvoi 2) que « ...Si le retour d'expérience est limité, les détails figurant en italique ne sont en général pas représentatifs de la probabilité réelle. L'évaluation de la probabilité doit être effectuée par d'autres moyens (études, expertises, essais) que le seul examen du retour d'expérience ».

XI. DANGERS DU GNL

1. Une évaluation des risques fondée sur des hypothèses

Considérant qu'un essai modélisé à l'échelle réelle s'avère irréalisable pour des raisons techniques et de sécurité, personne n'est en mesure de prédire avec exactitude ce qui se passerait dans le cas d'un important déversement à la mer de méthane liquéfié.

Pour mémoire, la réglementation, au sens large, considère que les normes de construction et de sécurité des citernes, des circuits d'alimentation ainsi que la performance des systèmes de gestion embarqués du GNL sont de nature à limiter autant que possible les probabilités d'un accident.

Implicitement, la réglementation n'exclut pas les effets cryogéniques sur le navire et le personnel, l'incendie, l'explosion, le risque d'asphyxie et de toxicité. À défaut de retour d'expérience, le lien entre « évaluation - accident » est imprécis, qui plus est quand il s'agit des dangers inhérents au risque de déversement de GNL à la mer notamment lors d'une collision ou d'un échouement. Aussi, l'évaluation des risques repose essentiellement sur des hypothèses. Les paramètres varient en fonction des résultats des modélisations adoptées, eux-mêmes entachés d'une certaine incertitude au regard de la problématique étudiée (caractéristiques de la brèche, énergie impliquée, phénomènes aggravants, effets dominos, etc.) et des conditions environnementales (obstacles, force du vent, état de la mer, etc.). De fait, les dangers potentiels résultant du comportement du GNL, dans le transport maritime, sont diversement commentés.

⁹⁶ BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion - Explosion de vapeur en expansion par ébullition d'un liquide.

⁹⁷ Base de données ARIA : Accidentologie gaz naturel liquéfié.

XII. PERTE DE CONFINEMENT DE GNL : SCENARIOS ACCIDENTELS

1. Des approches qui se veulent optimistes

Pour Europétrole⁹⁸ « le GNL s'il arrive à s'échapper, à la suite d'une rupture de la coque, s'évapore et peut, à la moindre étincelle, s'enflammer si le mélange air / gaz se trouve dans les limites de combustion (proportion de GNL comprise entre 5 et 15 %). Le navire lui-même ne peut pas exploser, car le GNL qui reste à l'intérieur du navire privé de comburant ne peut pas s'enflammer ».

Dans une enquête de l'AFCAN⁹⁹ sur des scénarios de catastrophe - « Chap.II - Analyse succincte des dangers potentiels des navires méthaniers » - le Cdt Jean P. Le Coz, ancien commandant de méthaniers et rédacteur de l'article « ...ne croit pas aux dangers d'explosion ou d'incendie (sauf locaux et machines) mais aux dangers dus au froid c'est-à-dire à la soudaine vaporisation de la cargaison en cas d'abordage ou d'échouement: une cuve éventrée passant subitement de -162°C à +20°C, soit un changement d'état et une élévation de température d'environ 180°C, demandera une énorme quantité de calories, d'où le gel de tout ce qui est autour du navire, le GNL vaporisé étant plus léger que l'air... Si un échouement survient avec éventration d'une cuve, cela gèlera immédiatement toute l'eau autour du navire avec ensuite un probable débordement des ou de la cuve éventrée, et donc du méthane sur le pont puis rupture du pont, de la coque, etc. Rappelons que ces navires sont tous à double coque. Le problème est différent pour les Butaniers propaneurs communément appelés Gepeelliers. ».

2. Rapports d'évaluation de risques réalisés dans le cadre de projets

Nous ne pouvions faire l'impasse sur les quelques publications dont les conclusions, au-delà de l'évaluation du risque, apportent un éclairage sur les effets que pourraient générer une perte de confinement de GNL non maîtrisée ; il convient néanmoins, selon les auteurs, d'être prudent dans l'interprétation des résultats de ces modélisations.

- > **Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube**¹⁰⁰ : cette étude exhaustive a été soutenue par l'Union européenne (elle est accessible sur le net). Si le document vise principalement la promotion du GNL en tant que carburant et cargaison dans le secteur de la « **navigation intérieure** », il élabore et applique les réglementations (de sécurité) nécessaires à l'utilisation et au transport du GNL tout en apportant des avis sur les conséquences humaines et environnementales d'un déversement de GNL mais aussi sur la stratégie de lutte contre les différents effets d'accidents de GNL notamment les exigences en termes de formation des services de secours. Cette étude, dont la lecture est fortement recommandée, est basée sur la compréhension du comportement général du GNL.
- > **Rapport des laboratoires Sandia (*Sandia National Laboratories - USA*)**¹⁰¹ : « Risques et conséquences d'un déversement de GNL dans l'eau » réalisé à la demande de l'US Department of Energy (2004) - Synthèse effectuée par Monsieur Zerguerras, ingénieur de recherche au CNRS.
- > **Independent Risk Assessment (IRA) & Sandia Guidance (2006)** - Hazards and Risk Analysis Public Safety - Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater Port Revised Draft EI- 4.2 (2006)¹⁰²
- > **ioMosaic Corporation** : LNG properties and Hazards, Understand LNG, Rapid Phase Transition (RPT)

⁹⁸ Les news « d'Europétrole » - Le portail de l'industrie du pétrole - couvrent toutes les régions du monde et toute la chaîne des hydrocarbures, liquides et gaz, depuis la prospection jusqu'à la distribution.

⁹⁹ AFCAN : Association française des Capitaines de navires (Loi 1901) pour la défense et les intérêts des Capitaines, la coopération avec Etats-Armateurs pour améliorer la sécurité en mer.

¹⁰⁰ LNG Master Plan Réalisé avec le soutien du programme TEN -T de l'Union européenne

¹⁰¹ Les Laboratoires Sandia (Sandia National Laboratories) sont parmi les principaux laboratoires nationaux du département de l'Énergie des États-Unis.

¹⁰² http://citizensagainstlng.com/wp/wp-content/uploads/2014/11/Cabrillo-Port-Rev-Draft-EIR_4.2_Hazard-and-Risk-Analysis

- > **Rapport n° 008091-01 du Conseil Général de l'environnement et du Développement durable :** « Coordination des actions ministérielles relatives à l'emploi du gaz naturel liquéfié comme carburant marin, un défi maritime à relever collectivement (2013) ». Ce rapport fait notamment référence aux travaux de la « *Society of International Gas Tanker and Terminal Operator* (SIGTTO) ¹⁰³, membre de l'OMI ».
- > **Rapports de The Society of International Gas Tanker and Terminal Operator (SIGTTO) :** « *Liquidified Gas. Handling Principles on Ships and in Terminals* » et autres publications dont : « *Report on the Effects of Fire on LNG Carrier Containment Systems* (2009) ». Le rapport SIGTTO étudie la réaction des citernes à cargaison d'un méthanier exposé à un grand feu de nappe pouvant résulter d'un déversement de GNL à la mer et de son inflammation.
- > **Ministère de l'Intérieur – Direction Générale de la sécurité civile et de la gestion des crises -** Partage d'information opérationnelle (2019-01) : Gaz naturel liquéfié (GNL), carburant pour navires et bateaux, situations accidentelles envisageables.

XIII. HYPOTHESES AVANCEES

1. Rappel fondamental

Le GNL se vaporise à une température supérieure à -162°C à la pression atmosphérique. Sa LIE (Limite Inférieure d'Explosivité) ¹⁰⁴ est de 5 % de gaz dans l'air et sa LSE (Limite Supérieure d'Explosivité) de 15 %.

2. Explosion d'un mélange air-gaz en milieu confiné

Un dégagement de GNL forme rapidement un nuage de vapeurs combustibles sachant que le mélange de 5 % à 15 % de méthane dans l'air est inflammable. Si l'inflammation se produit dans un espace confiné (espace clos ou encombré) la propagation des flammes augmente en force en créant une onde de surpression puis l'explosion potentiellement dangereuse pour le navire et les personnes ; c'est le cas d'un nuage air-hydrocarbures qui serait piégé entre les deux coques d'un méthanier. A l'air libre, le danger de surpression est très faible et ne présente pas de réel danger ¹⁰⁵.

3. Feu de torche ou Feu torche

Un feu « torche », est causé par l'inflammation d'un panache de GNL ou de gaz naturel sous pression ; le phénomène dure tant que la fuite est alimentée. Si le panache de vapeur ainsi formé rencontre une source d'ignition, l'effet redouté est le rayonnement thermique du feu de jet de gaz, aussi appelé feu de torche (comparable au feu d'un chalumeau). Les flammes se propagent vers la source, l'intensité thermique est très élevée : > 300 kW/m². Autre scénario, en cas d'incendie, l'échauffement intense d'un récipient contenant du GNL peut entraîner une rupture de ce dernier et la vaporisation instantanée du gaz dont l'inflammation est susceptible de provoquer une déflagration ou une explosion. Un feu en torche peut avoir des conséquences dramatiques sur le navire, si les flammes atteignent des installations insuffisamment isolées. L'acier non protégé cède rapidement et aggrave la situation. Les citernes de GNL à pression ne disposant que d'une paroi sont très vulnérables aux feux en torche. L'endommagement du confinement provoquera en effet un soudain dégagement de vapeurs et une boule de feu (BLEVE) ¹⁰⁶.

¹⁰³ SIGTTO a été fondée en 1979 par l'industrie pour échanger des informations techniques et expérience sur les terminaux et les méthaniers en vue de renforcer la sécurité et la fiabilité des opérations.

¹⁰⁴ Les limites d'explosivité d'un gaz ou d'une vapeur combustible sont les concentrations limites du gaz (dans l'air) qui permettent que celui-ci s'enflamme et éventuellement explose. L'intervalle d'explosivité est caractérisé par la limite inférieure d'explosivité (LIE) ou limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'explosivité (LSE) ou limite supérieure d'inflammabilité (LSI).

¹⁰⁵ Rapport des laboratoires Sandia

¹⁰⁶ Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube

4. BLEVE

La BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion* ou explosion de vapeur en expansion par ébullition d'un liquide) s'inscrit, au sens large, dans les scénarios d'effets de perte pressurisée de confinement d'un stockage de GNL. Le Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube, l'analyse comme suit : « une BLEVE survient lorsqu'une citerne de GNL est gravement endommagée à une pression plus élevée. Cet endommagement est souvent le résultat d'un feu de torche ou d'un choc mécanique sur l'élément de confinement de la coque de la citerne. La baisse de pression qui en résulte et l'inflammation et l'énorme dégagement de vapeur provoque une BLEVE, souvent sous forme de boule de feu, et des dommages conséquents à une explosion. Les citernes avec une pression plus élevée et une seule paroi sont plus susceptibles de créer des BLEVE... Il ne faut pas écarter l'hypothèse d'une BLEVE en cas de propagation directe des flammes sur une citerne ou une tuyauterie non protégée ou endommagée¹⁰⁷ ».

5. Déversement de GNL à la mer : explosion par phase de transition rapide (RPT)

À l'instar de la réaction d'une goutte d'eau versée sur un poêle brûlant, une transition de phase rapide ou RPT (*Rapid Phase Transition*) est un phénomène qui se produit lors d'un incident impliquant du gaz naturel liquéfié (GNL), dans lequel le GNL à la température de l'ordre de -160°C entre violemment en ébullition et se vaporise au contact de l'eau à une température entre 12 et 17° en moyenne (ou du sol), provoquant ce que l'on appelle une explosion physique, ou encore explosion sans source d'ignition, plus connue sous le nom d'explosion par phase de transition rapide. Lors d'une telle explosion, il n'y a pas de combustion, mais une énorme quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur, la différence entre la température et la température ambiante du GNL étant d'environ - 98°C. Une surpression causée par un changement de phase rapide reste confinée à proximité immédiate de la source de déversement et ne devrait pas produire de dommage étendu à la structure du navire. Ce type d'explosion spectaculaire peut causer des dommages aux infrastructures avoisinantes et produire énormément de bruit. Le scénario est bien souvent ignoré dans le cadre de la définition des risques externes pour l'homme¹⁰⁸.

6. Déversement de nappe, sans phase de transition rapide

La surface de l'eau favorise l'extension rapide du GNL qui s'épanche en une large nappe dont l'ébullition génère un nuage de vapeur constitué de 90 % de méthane et 10 % de propane qui apparaît d'abord comme un nuage blanchâtre ou brouillard qui résultent de la condensation de l'humidité atmosphérique. Même si le méthane à température ambiante est plus léger que l'air, ce nuage de vapeur, plus lourd que l'air se déplace horizontalement au niveau du sol ou de l'eau tout en se réchauffant en se mélangeant à l'air. Considérant que la cryogénisation du GNL réduit de 600 fois son volume, le nuage de vapeur va rapidement devenir 600 fois plus grand que la quantité de GNL déversée et continuer son expansion. Lorsque le mélange vapeur-méthane atteint la proportion d'une partie de méthane pour cinq parties d'air, le nuage devient alors inflammable. C'est aussi au moment où le nuage atteint son plus grand volume, de l'ordre de 3 000 fois plus grand (trois mille) que la quantité de GNL déversé, qu'il est aussi le plus dangereux.

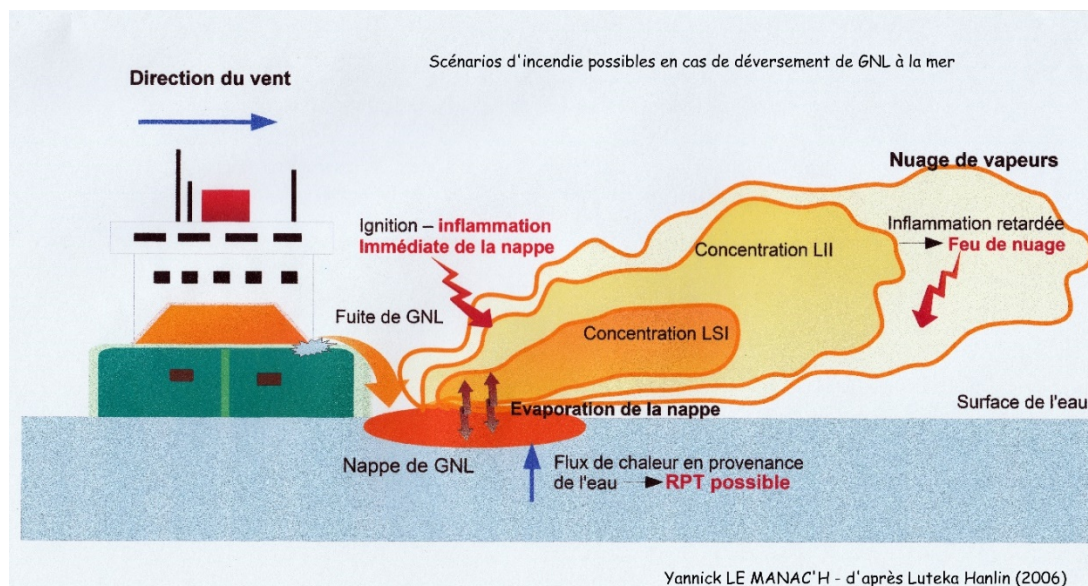
7. Inflammation instantanée (feu de nappe)

Contrairement à l'explosion par phase de transition rapide, une inflammation instantanée est susceptible de se produire lorsque le nuage « mélange vapeur-méthane » qui dérive dans le sens du vent rencontre une source d'ignition. Au contact de la moindre source d'ignition le nuage gazeux va s'enflammer et augmenter de volume en une sorte d'explosion lente. Si le nuage est éloigné du site de déversement de GNL, l'incendie va rejoindre la source de la fuite. Le GNL redevenu gaz brûle à de très hautes températures, environ 8 fois l'intensité de chaleur de l'essence.

¹⁰⁷ Contrairement à la France, plusieurs Etats européens écartent le risque de BLEVE, le jugeant trop faible.

¹⁰⁸ ioMosaic Corporation, *Discovering solutions : LNG properties and Hazards, Understand LNG, Rapid Phase Transition*. SIGTTO: Society of International Gas Tanker and Terminal Operators Ltd, Canada. Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube. Rapport des laboratoires Sandia

Lorsque la portion du nuage de vapeurs située entre la limite inférieure d'explosivité (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LSE) rencontre une source d'inflammation, les flammes se propagent à travers le nuage à une vitesse relativement lente de 10-12 m/s, à condition que le nuage de vapeur ne soit pas confiné ou dans un environnement encombré par de nombreux obstacles. L'inflammation instantanée est susceptible de créer un éclair jusqu'à la source de déversement^{109 110}.



8. Effets cryogéniques

L'effet de cryogénisation sur les méthaniers est le risque inhérent au transport à basse température qui bénéficie toutefois de retours d'expérience. Mécaniquement, l'acier perd sa résilience vers -40°C . Le contact du GNL (à -160°C) avec de l'acier normal le rend cassant. Au fil des incidents cryogéniques sur les méthaniers¹¹¹, de nouvelles normes de construction ont été intégrées dans les Recueils IGC et IGF : conception des citernes de stockage et des circuits d'alimentation, aciers adaptés aux basses températures à proximité des installations sensibles. En cas de fuite majeure il n'est cependant pas impossible que le GNL liquide puisse entrer en contact avec les structures moins résistantes au froid et provoquer des fissures ou autres dommages (coque et pont). Les personnes exposées au GNL risquent l'hypothermie, des brûlures (gelures) ainsi que de graves problèmes respiratoires par inhalation en milieu confiné.

9. L'asphyxie

L'asphyxie est, par définition, un appauvrissement en oxygène dans l'organisme, s'ensuivent alors des difficultés respiratoires qui peuvent être sévères voire létales. Il y a risque d'asphyxie si le taux en oxygène est réduit en-deçà d'environ 16 %, par remplacement ; possibilité d'effets narcotiques à faible concentration. A concentration élevée, le GNL ou méthane peut causer l'asphyxie par anoxie¹¹², notamment lorsqu'il remplace l'oxygène dans un espace clos (Sources : Butagaz SAS : GNL, fiche de données de sécurité. Connaissance des énergies : Gaz naturel quels dangers).

¹⁰⁹ Society of International Gas Tanker and Terminal Operators Ltd (SIGTTO) Canada.

¹¹⁰ Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube. Rapport des laboratoires Sandia.

¹¹¹ Une étude de Lloyds (2001) décrit brièvement 10 cas fuites de GNL impliquant des bateaux-citernes transportant du GNL, survenus entre 1965 et 1989.

¹¹² Dans le domaine biologique, l'anoxie ou hypoxie décrit une souffrance cellulaire induite par le manque de dioxygène présent dans le sang ou dans le milieu extérieur, ou l'impossibilité pour les cellules d'utiliser ce dioxygène.

10. L'intoxication

En milieu confiné, pauvre en oxygène, la combustion incomplète de GNL peut produire des gaz plus ou moins toxiques tels que CO, CO₂, hydrocarbures variés, aldéhydes et des suies dont l'inhalation est très dangereuse, voire létale à forte concentration (Source : Butagaz SAS : GNL, fiche de données de sécurité. Connaissance des énergies : Gaz naturel quels dangers). Les navires transportant ou utilisant du GNL disposent de moyens de détection de récupération et de gestion des gaz de dégagement (Codes IGC & IGF).

11. Les projections

La libération d'un gaz comprimé à forte pression peut s'accompagner de projections d'objets divers et d'éclats métalliques.

XIV. L'INCENDIE SECONDAIRE A BORD N'IMPLIQUANT PAS DIRECTEMENT LE GNL

La probabilité doit être analysée avec la plus grande objectivité notamment lorsque le risque est inhérent à la cargaison. Le Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube souligne « un incendie à bord, dans la cargaison (autre que du GNL), dans les zones de vie ou provenant d'autres incidents proches, risque d'affecter le GNL stocké à bord. De manière réaliste, cette situation implique l'exposition de la citerne ou de l'équipement auxiliaire à des températures élevées, ce qui aggraverait la situation initiale avec des dégagements de vapeur et la transformerait en une situation extrême avec une défaillance totale du système de confinement ou une possibilité de BLEVE ».

Les navires propulsés au GNL pourraient être particulièrement concernés notamment les porte-conteneurs dont l'accidentologie est éloquentes¹¹³. Ces navires sont régulièrement victimes d'incendies et d'explosions à l'origine de réactions spontanées de matières dangereuses conteneurisées. Difficilement gérable ce type d'accident amène au constat d'impuissance technique et humaine.



*Explosion à bord du porte-conteneurs KMTC Hong Kong
le 25 juin 2019 en Thaïlande
Source : FleetMon*

XV. LES « SCENARIOS DU PIRE »

Les scénarios d'accidents majeurs étudiés théorisent, pour la plupart, les risques thermiques associés au déversement à la mer de GNL qui rencontre une source d'ignition. L'accident est consécutif à une collision ou un échouement. Les résultats fluctuent en fonction de l'importance de la ou des brèches (m²), du nombre de réservoirs rompus, de l'impact de la collision, ou de l'échouement (grande ou faible vitesse) du volume de combustible déversé (m³), de la distance et de la vitesse de dispersion, etc.

¹¹³ *Le risque d'incendie et d'explosion à bord des porte-conteneurs - Étude de Yannick Le Manac'h - Vigipol (2019)*

Le rapport des laboratoires Sandia (2004), considère la probabilité d'une fuite à partir d'un navire-citerne suivi d'un embrasement. Il identifie un gradient des dangers en trois zones concentriques : « dans la zone à 500 m autour de la source, c'est la mort par suffocation ou hypothermie. Dans la zone numéro deux, l'embrasement du nuage de gaz cause une explosion qui peut tout enflammer dans un rayon de 1,6 km autour de la source. Trente secondes dans cette zone suffisent pour infliger des brûlures au second degré à une peau humaine exposée. L'explosion déclenche des incendies de forêts, de broussailles et de bâtiments. Dans la troisième zone, les effets de la catastrophe pourraient être ressentis jusqu'à 3,5 km, quoique jugés négligeables ».

Un autre scénario de Sandia (2006)¹¹⁴, réalisé pour le compte de *Cabrillo Port* (Californie - USA) dans le cadre d'un projet de FSRU à 20 milles de la côte, établit qu'un déversement de GNL consécutif à la rupture de deux réservoir Moss provoquerait une zone de danger de 11,7 km (6,3 milles) sous des vents de 7,2 km/h. Suite à ce rapport, l'USCG a déclaré que ce terminal « représenterait un risque sérieux pour l'environnement et la sécurité pour la région ». D'autres publications sont disponibles sur le net¹¹⁵.

XVI. PREPARATION AUX SITUATIONS D'URGENCE

1. L'information et la formation des personnels embarqués et des services d'intervention

Les acteurs impliqués de près dans le transport et l'utilisation du GNL (Compagnies maritimes, équipages, personnel et autorités portuaires) doivent être conscients des risques inhérents au GNL et pour certains, notamment le personnel d'intervention, être préparés aux situations d'urgence Ad hoc (équipages, équipes d'évaluations, moyens d'assistance, pompiers, services médicaux).

2. Une stratégie défensive adaptée

Rappelons qu'un litre de gaz naturel liquéfié (cryogénique) génère une quantité de gaz d'environ 600 fois son volume. C'est aussi au moment où le nuage atteint son plus grand volume, de l'ordre de 3 000 fois plus grand que la quantité de GNL déversé, qu'il est aussi le plus dangereux.

Redevenu gaz, le méthane brûle à de très hautes températures, environ huit fois l'intensité de chaleur de l'essence. « La mousse à foisonnement est efficace pour réduire la concentration de méthane dans le sens du vent, ce qui permet de diminuer la LIE et de réduire de moitié les distances de la LIE »¹¹⁶. Un feu de nappe s'apparenterait aux incendies majeurs de tankers et de porte-conteneurs qui, à défaut d'être rapidement maîtrisés, deviennent incontrôlables. Une stratégie défensive de la zone et des infrastructures proximales serait alors préférable à toute tentative de lutte contre l'incendie. Selon la directive IP-19^{117 118}, dans l'éventualité d'une possibilité de refroidir la coque du navire en flamme, au moins 10 L/m²/min d'eau de refroidissement seraient alors nécessaires pour protéger la coque. Autres éléments à prendre en considération : une fuite conséquente de GNL liquide mélangé à l'air chaud est susceptible de générer des nuages de dispersion réduisant la visibilité ; à l'extérieur de ces nuages il faut s'attendre à une modification significative de la composition de l'atmosphère et avoir à l'esprit que si le navire dérive, l'incident se déplace également¹¹⁹.

¹¹⁴ Sandia Report: Review of the Independent Risk Assessment (IRA) of the Proposed Cabrillo Liquefied Natural Gas Deepwater Port Project (janvier 2006). Final Environmental Impact Statement/environmental Impact Report for the Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater Port: Ventura and Los Angeles Counties, California, Volume 3

¹¹⁵ Society of International Gas Tanker and Terminal Operator (SIGTTO) publications

¹¹⁶ Recommandation Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube

¹¹⁷ Model Code of Safe Practice: Fire precautions at refineries and bulk storage terminals.

¹¹⁸ Energy Institute, anciennement Institute of Petroleum

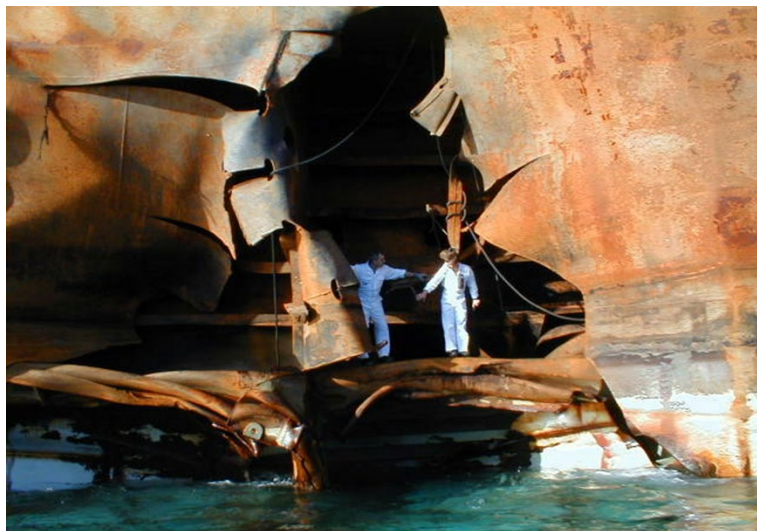
¹¹⁹ Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube.

XVII. UNE MENACE POTENTIELLE

1. L'acte intentionnel ou l'atteinte à la Sûreté Maritime

L'attentat du 11 septembre 2001 contre « les Twin Towers » du World Trade Center à New-York a démontré les limites du raisonnement humain en termes de prévention du risque. Pouvait-on cependant objectivement et intellectuellement « prévoir l'inimaginable » ? Dans l'évaluation des risques, seule, la collision d'un petit avion de tourisme avait été envisagée par les architectes. C'est à la suite de cet attentat que les États Unis ont proposé à l'Organisation Maritime Internationale (OMI), une procédure de prévention qui sera actée par la création du Code international pour la sûreté des navires, des installations et des approches portuaires (Code ISPS)¹²⁰. Le Code ISPS a pour but d'identifier les menaces d'actes illicites qui pèsent sur les ports, les installations portuaires et leurs approches dans leur rôle d'interface avec les navires (paquebots, tankers, gaziers, etc.) engagés dans un transport international et de prendre les mesures pour prévenir ces menaces et en limiter les impacts.

Pour mémoire, certes sur un registre autre que celui des méthaniers mais tout au moins explicite, le 6 octobre 2002, le super tanker Limburg s'apprêtait à rentrer dans le port d'Ash-Shihr dans le golfe d'Aden chargé de 400 000 barils de pétrole brut saoudien à destination de la Malaisie, lorsqu'il fut heurté, à environ 25 km des côtes, par un petit bateau-suicide. La double coque avait limité les conséquences de cet attentat.



*Pétrolier Limburg heurté par un bateau suicide le 6 octobre 2002 dans le Golfe d'Aden
Source : Afcan.org*

¹²⁰ Code ISPS (International Ship and Port Facility Security) – entré en vigueur le 01.07.2004 - SOLAS Chap. XI-2 - complété au plan communautaire par le règlement (CE) n° 725/2004 du Parlement Européen et du Conseil du 31 mars 2004 - transposé en droit français par le décret n°84-810, version consolidée, et les arrêtés d'application.



Les atteintes à la sûreté des terminaux de liquéfaction terrestres ou flottants (FSRU, FLNG) sont considérées comme des actes dits « intentionnels » dont l'étude est requise dans les analyses de risques, analyses souvent peu développées et assez confidentielles. Dans le transport maritime l'évaluation des risques inhérents à la sûreté (sabotage, collision volontaire, prise d'assaut, détournement vers une infrastructure terrestre ou maritime, etc.) relève du Code ISPS. Les plans de sûreté spécifiques aux navires, notamment les navires impliqués dans le transport et l'utilisation du GNL, sont sensés prévenir les risques après les avoir identifiés.

*Sûreté passive sur les tankers (Mannequin et barbelés)
Photo : G. Le Manac'h pour Vigipol*

On suppose que les conséquences d'un déversement intentionnel de GNL seraient comparables aux scénarios accidentels précédemment décrits. L'approche est cependant trop complexe et aléatoire pour être ici développée. Le lecteur intéressé pourra se référer à l'étude préliminaire du projet américain *Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater*¹²¹ (IRA/Sandia) qui identifie de manière exhaustive les dangers et les menaces les plus représentatives, et procède à leur évaluation au regard des avaries potentielles :

- > **Les collisions accidentelles/intentionnelles générées par :** un petit avion ou un hélicoptère, un petit navire, un grand navire, un grand navire à passagers, un avion de ligne, la trajectoire incontrôlée d'un missile.
- > **Les événements intentionnels :**
 - Détournement
 - Détournement de méthanier, transit vers la côte et libération délibérée de GNL ou de gaz naturel
 - Prise de contrôle du méthanier et collision intentionnelle avec un autre vecteur ou une installation sensible
 - Tir manuel de missile type RPG ou d'un avion ou d'autres armes tactiques
 - Attaque par de petits navires explosifs
 - Assaut par plongeurs
 - Rejet délibéré de GNL en mer

Aujourd'hui la menace est d'actualité. L'attaque récente de pétroliers qui ravive les tensions dans le Golfe Persique en est l'illustration. Un mois après les actes de sabotage subis en mai 2019 par quatre tankers devant le port de Fudjeira (Emirats Arabes unis), deux autres tankers, un japonais et un norvégien, étaient à nouveau pris pour cible dans le détroit d'Ormuz.



*Attentat contre un des deux pétroliers
le 13 juin 2019 dans le détroit d'Ormuz
Source : Courrier International –
Photo : ISNA Handout*

¹²¹ Hazards and Risk Analysis Public Safety - Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater Port Revised Draft EIR - 4.2 (2006) - http://citizensagainstlng.com/wp/wp-content/uploads/2014/11/Cabrillo-Port-Rev-Draft-EIR_4.2_Hazard-and-Risk-Analysis

CONCLUSION

La sécurité d'exploitation et du transport du gaz naturel liquéfié repose essentiellement sur la technologie et la compétence. C'est particulièrement le cas des méthaniers qui jusqu'à présent n'ont fait l'objet d'aucun accident majeur. Il devrait en être de même pour les navires propulsés au GNL, une alternative aux fiouls lourds qui cependant augmentera la criticité du risque d'accident eu égard à la multiplicité et au profil des navires concernés.

Si la technicité de pointe des installations de GNL de propulsion doit permettre d'en limiter les risques directs il convient de prêter une attention particulière aux dangers secondaires et aux réactions en chaîne inhérents à l'exploitation du navire qui risqueraient de les affecter :

- > L'incendie, l'explosion dans les locaux contigus
- > Les dangers inhérents aux cargaisons (matières dangereuses)
- > Un défaut de management (erreur humaine, formation inadaptée, etc.)
- > La collision (en constante augmentation)
- > L'échouement
- > Les actes intentionnels

Autant de scénarios physiquement possibles qui augmentent la probabilité d'un événement majeur.

Rappelons, sans intention délibérément anxiogène, que dans toute activité industrielle et de transport « le risque zéro » n'existe pas.

Remerciements

Merci à toute l'équipe de Vigipol pour son implication dans la mise en forme de ce document ainsi qu'à Bernard Le Guern (ex-Directeur technique de la CGM, membres du Pool Experts de Vigipol) pour ses commentaires avisés.

TABLE DES SIGLES

ADN : Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures

ADR : Accord européen pour le transport international des marchandises dangereuses par route

AFCAN : Association française des Capitaines de navires

AGF : Association française du gaz

AIP : Approval in Principle ou approbation de principe

ASD : Analyse des situations dangereuses

BARPI : Bureau d'analyses des risques et pollutions industrielles

BLEVE : De l'anglais Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion - Explosion de vapeur en expansion par ébullition d'un liquide

CANCA : Cadre d'action nationale pour le déploiement d'infrastructures pour carburant alternatif (directive européenne)

CNG : Compressed Natural Gas

CRO : Comptes-rendus obligatoires de tous les navires de plus de 300 UMS transitant dans un cercle de 40 milles nautiques de rayon centré sur la tour du Stiff (Ouessant)

CROSS : Centres régionaux opérationnels de surveillance et de sauvetage

CVCE : Confined Vapour Cloud Explosion - Explosion de vapeur en milieu confiné

DGTM : Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer

DGPR : Direction générale de la prévention des risques

DNV-GL : Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd Classification Society

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DST : Dispositif de séparation du trafic maritime

EIT : Explosion, Incendie, Toxicité

EMSA : European Maritime Safety Agency – Agence de sécurité maritime européenne

ENVID : Environmental issues identification – identification des problèmes environnementaux

EPA : Environmental Protection Agency - Agence de protection de l'environnement

EPI : Équipement de protection individuelle

FDS : Fiche de données de sécurité

FLNG : Floating Liquefied Natural Gas Units – Unités flottantes de liquéfaction du gaz naturel

FNLG-NC : Floating Liquefied Natural Gas Near-Shore Units - concept de liquéfaction du gaz naturel à proximité des côtes

FPSO : Floating Production Storage and Offloading Units (pétrole)

FSRU : Floating Storage and Regasification Units

GN : Gaz naturel

GNL : Gaz naturel liquéfié

GNV : Gaz naturel pour véhicule

GPL : Gaz de pétrole liquéfié

GSMU (Table) : Guide de soins médicaux d'urgence à donner en cas d'accidents dus à des marchandises dangereuses - supplément du Guide médical international de bord (substances chimiques)

HAROPA : Complexe portuaire qui regroupe les ports de Paris, Rouen et le Havre dans un groupement d'intérêt économique

HAZID : Hazard Identification – démarche de recherche de risque

IAPH : Association internationale des ports

IBC (Code) : International Code for the construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk - Recueil international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des produits chimiques dangereux en vrac

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

IFPEN : Institut français du pétrole et des énergies nouvelles

IGC (Code) : International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk - Recueil international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des gaz liquéfiés en vrac

IGF (Code) : International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fiouls - Recueil International des règles de sécurité applicables aux navires qui utilisent des gaz ou d'autres combustibles à faible point d'éclair

IRA : Independent Risk Assessment (USA)
ISM (Code) : International Safety Management Code - Code international de gestion de la sécurité
ISO : Organisation internationale de normalisation
ISPS (Code) : International Ship and Port Facility Security Code - Code international pour la sûreté des navires et des installations et des approches portuaires
LIE : Limite inférieure d'explosivité
LII : Limite inférieure d'inflammabilité
LSE : limite supérieure d'explosivité
LSI : Limite supérieure d'inflammabilité
MARPOL : Marine Pollution Convention – Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires
MMR : Mesure de maîtrise des risques
MMR (matrice) : Matrice de risque réglementaire
NOx : Oxydes d'azote
OHSAS : British Standard Occupational Health and Safety Assessment Series
OMI : Organisation Maritime Internationale
ONU : Organisation des nations unies
PCSTM : Plan commun de sécurité terre-navire
POI : Plan d'opération interne
PPAM : Politique de prévention des risques d'accidents majeurs
PPI : Plan particulier d'intervention
PPRT : Plan de prévention des risques technologiques
RET-T : Réseau transeuropéen de transport
RIF : Registre international français d'immatriculation des navires
RLMD : Règlement local pour le transport des marchandises dangereuses
RPM : Règlement pour le transport et la manutention des matières dangereuses dans les ports maritimes
Q-FLEX : LNG carriers capacity between 210 000 m³ and 216 000 m³
Q-MAX : The largest LNG carriers in the world
REX : Retour d'expérience
SECA : Sulfur Emission Control Area - zone d'émission contrôlée de soufre
SEI : Seuil des effets irréversibles
SEL : Seuil des effets létaux
SELS : Seuil des effets létaux significatifs
SGMF : The Society for Gas as a Marine Fuel
SGS : Système de gestion de sécurité (installations à terre)
SIGTTO : Society of International Gas Tanker and Terminal Operator - Société des opérateurs de terminaux et de navires gaziers
SMS : Safety Management System, Système de gestion de la sécurité à bord des navires
SOLAS : Safety Of Life At Sea - Convention internationale sur la Sauvegarde de la vie humaine en mer
SOx : Oxydes de soufre
STCW : International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers - Convention internationale de 1978 sur les normes de formation, de certification et de veille des gens de mer
STS : soutage ship-to-ship
TCDD : Dioxyne dite de Seveso
TNT : Trinitrotoluène (explosif puissant)
TST : soutage truck-to-ship
UMS : Universal Measurement system - représente le volume intérieur d'un navire (ou tonnage brut), exprimé en tonneaux (le tonneau est équivalent à 2,83 m³ ou 100 pieds cubes)
USCG : Garde côtière des Etats Unis
UVCE : Unconfined Vapour Cloud Explosion - Explosion de vapeur en milieu non confiné

REPERES BIBLIOGRAPHIQUES

Support réglementaire

- ✓ *Convention internationale sur la sauvegarde de la vie humaine en mer* - SOLAS
- ✓ *Règles relatives à la prévention de la pollution de l'atmosphère par les navires* MARPOL 73/78 Annexe VI
- ✓ *Règles relatives au transport des marchandises dangereuses* - MARPOL 73/78 Annexe II, SOLAS Chap.II-1
- ✓ *Recueil international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des gaz liquéfiés en vrac* – Code IGC
- ✓ *Recueil International des règles de sécurité applicables aux navires qui utilisent des gaz ou d'autres combustibles à faible point d'éclair* – Code IGF
- ✓ *Recueil international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des produits chimiques dangereux en vrac* - Code IBC - Résolution OMI.MEPC.166(56) - amendé par les Résolutions MEPC.225(64) et MSC.340(91).
- ✓ *Code international de gestion de la sécurité des navires* - Code ISM en application du chapitre IX de SOLAS et de la Résolution A.741(18). Les prescriptions du Code sont obligatoires - SOLAS Ch.IX, règle 3.1
- ✓ *Management qualité-sécurité pour l'industrie et les Compagnies maritimes* - Normes ISO 9001, ISO 14001 (management environnemental) et OHSAS 18 001
- ✓ *Code international pour la sûreté des navires, des installations et des approches portuaires* – Code ISPS en application de SOLAS Ch.XI
- ✓ *Convention internationale de 1978 sur les normes de formation, de certification et de veille des gens de mer* - STCW section A-V/3 - Amendements de Manille de 2010. OMI STCW.7-Circ.16
- ✓ *Sûreté des navires au plan communautaire* - Règlement (CE) n° 725/2004 du Parlement Européen du 31 mars 2004 - transposé en droit français par le décret n°84-810
- ✓ *Teneur en soufre de certains combustibles liquides* - Directive européenne 2016/802/UE entrée en vigueur le 9 septembre 2016
- ✓ *Déploiement d'une infrastructure pour carburants* - Directive 2014/94/UE du Parlement européen et du Conseil du 22 octobre 2014
- ✓ *Maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses* - Directive 96/82/CE du Conseil du 9 décembre 1996
- ✓ *Prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation* - Arrêté du 29 septembre 2005 modifiant l'arrêté du 10 mai 2000
- ✓ *Critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents susceptibles de survenir dans les établissements dits « SEVESO », visés par l'arrêté du 29 septembre 2005 et la Circulaire d'application du 29/09/05*
- ✓ *Prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du Code de l'environnement* - Arrêté du 26 mai 2014
- ✓ *Accidents majeurs impliquant des substances dangereuses* - Directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3, entrée en vigueur le 1er juin 2015.
- ✓ *Installations classées soumises à autorisation* - Article L. 512-1 du code de l'environnement et de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).
- ✓ *Prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages* - Loi du 30 juillet 2003
- ✓ *SAFE SECA - Méthodologie : SEVESO (estimation gravité X probabilité = criticité)* - en réponse à MARPOL annexe VI, à la Directive 1999/32CE modifiée par Directive 2005/33 CE et la Directive 2012/33 UE « Study for Alternative Fiouls and Experiment in Seine and Channel Area »
- ✓ *Expédition de marchandises dangereuses TMD* - Arrêté du 29 mai 2009 dit arrêté TMD 2019
- ✓ *Règlement général de police dans les ports maritimes de commerce et de pêche* - art. L. 5331-2 du Code des Transports / ancien art. L. 302-1 du code des ports maritimes et article L. 208-83 du Code de l'Environnement
- ✓ *Navires et technologie maritime - Spécification pour le soutage des navires fonctionnant au gaz naturel liquéfié* - Norme internationale ISO 20519/2017
- ✓ *Transport et manutention des matières dangereuses dans les ports maritimes (RPM)* - Annexe

- à l'arrêté du 18 juillet 2000 modifié le 13.12.2018, consolidé en janvier 2019.
- ✓ *Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities/Administrations* - European Maritime Safety Agency (EMSA) - 31.12.2018
- ✓ *Conditions d'emprunt de la double voie dans le DST d'Ouessant* - Arrêté n°2017/085 du préfet maritime de l'Atlantique
- ✓ *Loi Macron* - Amendement n° 2820

Documentation

- ✓ *La Bretagne du Risque à l'Action* - **Vigipol (2018)**
- ✓ *La transition énergétique du transport maritime : enjeux économiques et stratégiques - incidences sur la sécurité maritime* - **Yannick Le Manac'h - Vigipol (2019)**
- ✓ *Le gaz naturel liquéfié, un carburant maritime* - **Groupe GTT (Gaztransport & Technigaz)**
- ✓ *Un défi maritime à relever collectivement* - **Coordination des actions ministérielles relatives à l'emploi du gaz naturel liquéfié comme carburant marin (2013)**
- ✓ *Marché du GNL - World LNG report (02.04.2019)*
- ✓ *Le GNL américain gaz de schiste, gaz de la liberté assurant la sécurité* - **Sputnik News, France (30.05.2019)**
- ✓ *Total va devenir le 2ème acteur privé mondial du GNL* - **L'usine nouvelle (01.06.2019)**
- ✓ *Gaz liquéfié : les Etats-Unis bientôt numéro deux mondial* - **Les Echos (07.02.2019)**
- ✓ *Exploitation des gaz de schiste en Amérique du Nord ; études d'optimisation en cours* - **OnePetro - Cost Optimized Solutions for Near Shore FLNG (2018)**
- ✓ *Le portail de l'industrie du pétrole* - **Les news d'Europétrole**
- ✓ *GNL, fiche de données de sécurité* - **Connaissance des énergies & Butagaz SAS**
- ✓ *GNL, Eléments de statistiques* - **Gaz Mobilité**
- ✓ *Les transporteurs de gaz* - **Free exploit.marine.free.fr**
- ✓ *Le transport du gaz par méthaniers : bateaux et terminaux* - **Selectra (09.01.2019)**
- ✓ *Dans l'ancre du Prélude, le plus grand bateau au monde* - **Challenges Energie - Nicolas Stiel (23.05.2017)**
- ✓ *Shell kicks off production at Prelude FLNG* - **Offshore Energy To Day.com**
- ✓ *FLNG barge concept gets AiP* - **LNG World Shipping - John Snyder (13.05.2019)**
- ✓ *Le boom des soudeurs de GNL carburant* - **Le Marin - Frédérick AUVRAY (28.02.2019)**
- ✓ *Listes formatées de contrôle de soutage du GNL* - **SGMF (the Society for Gas as a Marine Fuel) et l'Association Internationale des Ports (IAPH).**
- ✓ *Il y a 100 ans une explosion défigurait la ville d'Halifax* - **ICI - Nouvelle Ecosse (2017)**
- ✓ *Accidentologie du gaz naturel liquéfié* - **Base de données ARIA - Ministère en charge du développement durable/Direction générale de la prévention des risques/Service des risques technologiques/BARPI**
- ✓ *Gaz naturel, quels dangers ?* - **Connaissance des Energies**
- ✓ *Risques du GNL – débat public sur le projet du nouveau de terminal méthanier d'Antifer (Seine Maritime)* - **D. Roux – Capitaine au long cours, Commandant de méthaniers (E.R)**
- ✓ *Le retour d'expérience, un instrument de gouvernance des risques* - **MIR (Master Ingénierie des Risques) : Flavien Beauchet, Clément Fernandez, Mathias Roger, Laure Ruallem - Université Paris Descartes (25.01.2016)**
- ✓ *Cartographie des établissements Seveso* - **DREAL – Provence Alpes-Côte d'Azur**
- ✓ *Terminal méthanier de Fos Cavaou – Étude de Danger (résumé non technique)* - **ELENGY**
- ✓ *Boil Off Gas, les évaporations du GNL* - **Petite encyclopédie gazière**
- ✓ *Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des effets* - **INERIS - rapport d'étude N°DRA-17-164793-09921A (21.09.2017)**
- ✓ *Gaz naturel liquéfié (GNL), carburant pour navires et bateaux, situations accidentelles envisageables* - **Ministère de l'Intérieur - Direction Générale de la sécurité civile et de la gestion des crises - Partage d'information opérationnelle (2019)**
- ✓ *Dix cas fuites de GNL impliquant des bateaux-citernes transportant du GNL, survenus entre 1965 et 1989* - **Étude du Lloyds (2001)**
- ✓ *Fire precautions at refineries and bulk storage terminals* - **IP-19, Model Code of Safe Practice - Energy Institute**
- ✓ *Liquefied Gas. Handling Principles on Ships and in Terminals* » et autres publications dont : « *Report on the Effects of Fire on LNG Carrier Containment Systems* - **Society of International Gas Tanker and Terminal Operator (SIGTTO)**

- ✓ *LNG and LPG Experience Matrix Guideline for Use* - **Society of International Gas Tanker and Terminal Operator (SIGTTO) publications**
- ✓ *LNG properties and Hazards, Understand LNG, Rapid Phase Transition (RPT)* - **ioMosaic Corporation**
- ✓ *Deux destroyers de l'US Navy fortement endommagés lors de deux collisions* – **Roger Coguiéc - Vigipol (Juin 2018)**
- ✓ *Le risque d'incendie et d'explosion à bord des porte-conteneurs* - **Yannick Le Manac'h - Vigipol (2019)**
- ✓ *Plan stratégique LNG pour le Rhin-Main-Danube* - **Réalisé avec le soutien du programme TEN -T de l'Union européenne**
- ✓ *Risques et conséquences d'un déversement de GNL dans l'eau* - **Rapports Sandia (Sandia National Laboratories - USA)**
- ✓ *Review of the Independent Risk Assessment (IRA) of the Proposed Cabrillo Liquefied Natural Gas Deepwater Port Project (janvier 2006). Final Environmental Impact Statement/Environmental Impact Report* - **SANDIA Reports**
- ✓ *Hazards and Risk Analysis Public Safety* - **Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater Port Revised Draft EIR- 4.2 (2006)**
- ✓ *Analyse succincte des dangers potentiels des navires méthaniers* - **AFCAN - Cdt J.P. Le Coz, ancien commandant de méthaniers**