



**PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE (PAM)
CENTRE RÉGIONAL MÉDITERRANÉEN POUR L'INTERVENTION D'URGENCE
CONTRE LA POLLUTION MARITIME ACCIDENTELLE (REMPEC)**

Atelier régional sur l'intervention en cas d'incidents impliquant des substances nocives et potentiellement dangereuses (SNPD) (MEDEXPOL 2018)

Malte, 20-21 juin 2018

Point 4 de l'Ordre du jour

REMPEC/WG.43/4
Date : 13 juin 2018

Original : Anglais

**GUIDE RELATIF AUX RISQUES ASSOCIÉS AUX DÉVERSEMENTS DE GAZ RÉSULTANT
D'ACCIDENTS MARITIMES**

Note du Secrétariat

RÉSUMÉ

Résumé : Ce document présente le projet final révisé de Guide relatif aux risques associés aux déversements de gaz résultant d'accidents maritimes, préparé dans le cadre du Programme de travail 2016-2017 du Groupe de travail technique méditerranéen.

Action à prendre : Paragraphe 6

Document de référence : REMPEC/WG.43/3/2/Rev.2

Introduction

1 Le Guide relatif aux risques associés aux déversements de gaz résultant d'accidents maritimes publié par le Centre régional méditerranéen pour l'intervention d'urgence contre la pollution marine accidentelle (REMPEC) a été préparé en 1996 dans le but de faciliter la mise en œuvre du Protocole relatif à la coopération en matière de prévention de la pollution par les navires et, en cas de situation critique, de lutte contre la pollution de la mer Méditerranée (le « Protocole Prévention et situations critiques, 2002 ») par les Parties contractantes à la Convention sur la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée (la « Convention de Barcelone ») et ses Protocoles.

2 Le Guide relatif aux risques associés aux déversements de gaz résultant d'accidents maritimes, ci-après le « Guide », fournit au personnel en charge de la planification des situations d'urgence des informations de base sur la gestion des pollutions impliquant des gaz. Il s'adresse au personnel de lutte, en particulier aux décideurs, ayant des connaissances techniques et maritimes de base. Ce document traite de divers sujets : chimie des gaz en lien avec leur transport en mer, systèmes de conteneurisation de gaz pré-conditionnés, description des transporteurs de gaz, règles internationales régissant le transport des gaz en mer, propriétés dangereuses des gaz, comportement des gaz libérés dans l'atmosphère et mesures de lutte contre les dégagements gazeux.

3 La nécessité de procéder à une révision de ce Guide a été notée par la 10^e réunion des correspondants du REMPEC qui s'est tenue à Malte du 3 au 5 mai 2011, au regard de la recommandation du Groupe de travail technique méditerranéen (MTWG) missionné pour identifier les recommandations, principes et lignes directrices disponibles dans le Système d'information régional (SIR) appelant un approfondissement, une révision, une mise à jour et/ou un amendement.

4. La 11^e réunion des correspondants du REMPEC, qui s'est tenue à Attard, Malte, du 15 au 17 juin 2015 a convenu d'inscrire la mise à jour du Guide au programme de travail du MTWG pour la

période biennale 2016-2017. Ayant pris note des informations fournies sur la mise à jour des Lignes directrices relatives aux Risques associés aux déversements de gaz résultant d'accidents maritimes, la 12^e réunion des correspondants du REMPEC organisée à St. Julian's, Malte, du 23 au 25 mai 2017, a convenu de :

- .1 **prolonger** sur la période biennale 2018-2019 cette tâche prévue dans le cadre du programme de travail du MTWG pour la période biennale 2016-2017 ; et
- .2 **créer** un Groupe de correspondance sur le protocole OPRC-HNS sous l'égide du MTWG afin de contribuer à la mise à jour des Lignes directrices relatives aux Risques associés aux déversements de gaz résultant d'accidents maritimes.

5 Le projet final de Guide reproduit en **Annexe** du présent document est le fruit d'un long processus de consultation via le Groupe de correspondance sur le protocole OPRC-HNS créé dans le cadre du MTWG, processus entamé avec la préparation d'un bilan détaillé et exhaustif des développements constatés depuis 1996 sur les différents thèmes abordés dans le Guide. Le projet final de Guide reflète les conclusions de ce bilan et tient compte de tous les commentaires reçus du Groupe de correspondance OPRC-HNS.

Action requise par l'Atelier

6 **L'atelier est invité** à prendre note des informations fournies, à examiner et à valider le projet de Lignes directrices relatives aux Risques associés aux déversements de gaz résultant d'accidents maritimes, avant de le soumettre à l'approbation de la 13^e réunion des correspondants du Centre régional méditerranéen pour l'intervention d'urgence contre la pollution marine accidentelle (REMPEC).

ANNEXE

PROJET

**GUIDE RELATIF AUX RISQUES ASSOCIÉS AUX DÉVERSEMENTS DE GAZ
RÉSULTANT D'ACCIDENTS MARITIMES**



**PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE (PAM)
CENTRE RÉGIONAL MÉDITERRANÉEN POUR L'INTERVENTION D'URGENCE
CONTRE LA POLLUTION MARITIME ACCIDENTELLE (REMPEC)**

PROJET

**GUIDE RELATIF AUX RISQUES ASSOCIÉS AUX DÉVERSEMENTS DE GAZ RÉSULTANT
D'ACCIDENTS MARITIMES**

2018

Introduction

CHAPITRE 1. Aperçu général de la chimie des gaz et de leur classification

- 1. Etat de la matière**
- 2. Terminologies associées aux états de la matière – court aperçu général**
- 3. Changement d'états**
- 4. Interactions entre l'eau de mer et les substances chimiques**
- 5. Liquéfaction des gaz**
 - 5.1. Matières physiques**
 - 5.2. Processus de liquéfaction en usine**
- 6. Description et caractéristiques générales des gaz**
- 7. Classification des gaz**
 - 7.1. Classification en fonction des propriétés dangereuses**
 - 7.2. Classification en fonction des propriétés physiques**
 - 7.3. Classification en fonction de l'usage**
 - 7.4. Classification en fonction de la composition chimique**
 - 7.5. Classification en fonction du comportement dans l'environnement marin après déversement**

CHAPITRE 2. Les structures pour le transport maritime des gaz

- 1. Gaz transportés en tant que matières dangereuses**
 - 1.1. Types de réceptacles**
 - 1.2. Navires transportant des matières dangereuses**
 - 1.3. Règles internationales régissant le transport en mer des matières gazeuses dangereuses**
- 2. Produits gazeux transportés en vrac**
 - 2.1. Types de transporteurs de gaz**
 - 2.2. Règles internationales régissant le transport en mer des produits gazeux en vrac**
- 3. Systèmes de propulsion et équipements**
 - 3.1. Systèmes de propulsion au gaz**
 - 3.2. Autres équipements embarqués**
- 4. Opérations de chargement/déchargement**
 - 4.1. Chargement**
 - 4.2. Soutage de combustible**

CHAPITRE 3. Risques et mesures de lutte contre un dégagement accidentel de gaz

- 1. Scénarios d'accidents**
 - 1.1. Marchandises gazeuses dangereuses pré-conditionnées**
 - 1.2. Produits gazeux en vrac**
 - 1.3. Produits gazeux dans les pipelines**
- 2. Risques liés aux dégagements gazeux**
 - 2.1. Détection de gaz dans l'atmosphère**
 - 2.2. EPI pour les intervenants**
 - 2.3. Équipement d'intervention**
 - 2.4. Risques d'incendie**
 - 2.5. Risques de toxicité**
 - 2.6. Brûlures dues au froid et aux produits gazeux**
 - 2.7. Risques de réactivité**
 - 2.8. Limites d'exposition environnementale pour le rejet dans l'eau**
- 3. Comportement des gaz libérés dans l'atmosphère**
 - 3.1. Types de dispersion des gaz**
 - 3.2. Variables influençant la dispersion atmosphérique**
- 4. Mesures de lutte appliquées aux dégagements gazeux**
 - 4.1. Options de lutte – le navire**
 - 4.2. Options de lutte – la cargaison**
 - 4.3. Options de lutte – les gaz libérés**
- 5. Protection du personnel de non-lutte (population civile)**
 - 5.1. Options s'offrant à une personne prise dans des vapeurs de gaz toxiques**
 - 5.2. L'évacuation**
 - 5.3. Refuge in-situ**
 - 5.4. Résumé – Evacuation ou refuge in-situ ?**
- 6. Conclusion**

ANNEXE I. TEMPERATURES ET PRESSIONS CRITIQUES DE CERTAINS GAZ COMMUNS

ANNEXE II. PROPRIETES D'INFLAMMABILITE DE CERTAINS GAZ

ANNEXE III. EVACUATION OU REFUGE IN-SITU ?

**APPENDICE I. CARACTERISTIQUES, EQUIPEMENTS ET SERVICES D'UN ABRI / CENTRE
DE REPOS**

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

GLOSSAIRE ET ACRONYMES

BIBLIOGRAPHIE

Introduction

Les gaz sont des substances possédant de nombreuses propriétés. En effet, certains servent de source d'énergie alors que d'autres servent de matières premières pour les industries chimiques du monde entier. Cette dernière utilisation, en partie développée suite aux avancées technologiques, a conduit aux nombreux produits issus de l'exploitation du gaz. Ces dernières années, la demande en GNL, considéré comme un combustible propre en termes de pollution atmosphérique, a progressé.

Pour faire face à la demande grandissante de tels produits, les gaz, soit produits en d'importantes quantités soit trouvés naturellement pour être exploités commercialement, sont habituellement très éloignés du lieu où ils sont utilisés et la plupart ont besoin et doivent être transportés sur des distances relativement longues.

Il est essentiel de fournir un moyen de transport pour de tels produits gazeux. Un moyen ordinaire de déplacer en grandes quantités le gaz naturel d'un endroit à un autre est l'utilisation de pipelines. En Méditerranée, par exemple, le gaz naturel est transporté par le pipeline transméditerranéen de l'Algérie à l'Italie, par le gazoduc Medgaz entre l'Algérie et l'Espagne et un autre projet est en cours entre l'Algérie et la Sardaigne, et ensuite le nord de l'Italie.

Lorsqu'il n'y a pas de pipeline ou lorsque l'utilisation de pipelines n'est pas possible, d'autres méthodes doivent être employées.

Les autres méthodes utilisées sont les camions citernes, les trains et les bateaux. Pour employer ces méthodes de transport, le volume des gaz doit être réduit car, dans leur état primaire, ils sont trop volumineux pour être transportés ainsi. L'un des développements les plus remarquables dans le domaine de l'architecture navale durant ces trente dernières années a été l'apparition des transporteurs de gaz. Ces bateaux sont un témoignage éloquent du savoir-faire et de l'avant-gardisme des premiers concepteurs de systèmes de conteneurisation de marchandises, des scientifiques du génie des matériaux et des équipementiers. En effet, ils ont été capables de mettre en pratique une théorie connue depuis des décennies selon laquelle, sous des conditions appropriées de pression et de température, les gaz peuvent être liquéfiés. L'application de cette théorie a atteint son apogée par la construction des transporteurs de gaz.

Les transporteurs de gaz sont des bateaux spécialisés transportant des substances qui, sous des conditions normales, sont à l'état gazeux. En baissant la température ou en augmentant la pression, ou par une combinaison de ces procédés, un gaz peut être réduit d'une fraction de son volume original. De cette façon, effectuer le transport de tels produits devient économiquement viable. **La figure 1** présente les principales routes pour les transporteurs de GPL et GNL en Méditerranée.

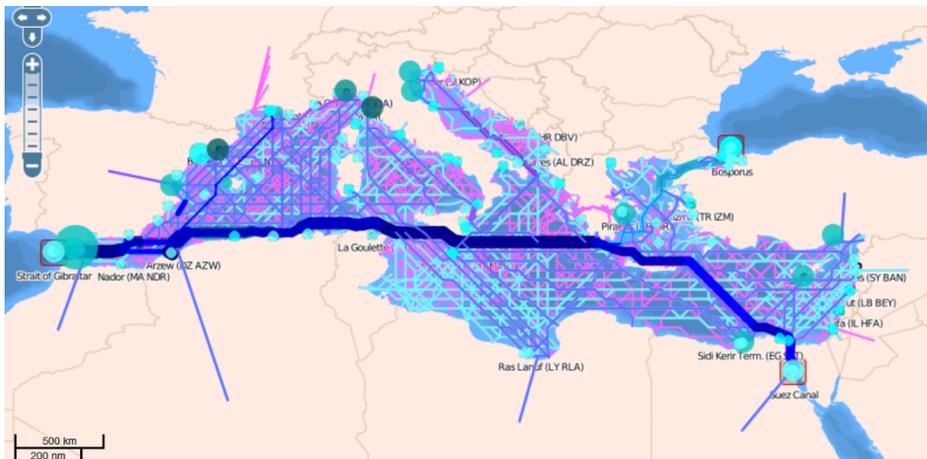


Figure 1. Les principales routes de transport de gaz (lignes magenta), de GNL (lignes bleu foncé) et de GPL (lignes bleu clair) en Méditerranée et les principaux ports (points bleu clair) (Source <http://safemedgis.rempec.org/>).

Les gaz sont aussi transportés sous forme pré-conditionnée, ce qui signifie qu'ils sont transportés dans des conteneurs de différentes tailles, mais en petites quantités, sur des bateaux différents de ceux spécialisés pour le transport de gaz. Par conséquent, la possibilité d'un dégagement accidentel d'un produit gazeux n'est pas limitée seulement aux transports spéciaux de marchandises gazeuses.

Dans une région extrêmement dense en ce qui concerne le transport maritime de marchandises, même si un type particulier de navire présente un bilan de sécurité exemplaire et n'est donc pas perçu comme étant à risque contrairement aux transporteurs de gaz, la possibilité d'un accident demeure. La Mer Méditerranée n'est pas une exception et comme cela est montré dans le **tableau 1**, quelques incidents maritimes impliquant des marchandises gazeuses ou très volatiles ont eu lieu.

Le fait qu'il y ait eu de tels incidents indique qu'il est nécessaire de tenir compte des risques de dégagements accidentels de tels produits au sein du contexte général de la préparation et de la lutte contre les incidents maritimes. Dans le but de mieux comprendre aussi bien les mesures avec lesquelles ces produits peuvent être dispersés après dégagement dans l'environnement que les conséquences de tels dégagements et les mesures d'atténuation qui peuvent être employées, il est nécessaire de ne pas se focaliser uniquement sur les facteurs pertinents qui ont une implication directe avec de tels aspects mais d'avoir au contraire aussi bien des connaissances de base sur la chimie des gaz que des connaissances sur les moyens de transport en mer des gaz.

<i>Date</i>	<i>Lieu</i>	<i>Navire/Centrale</i>	<i>Substance</i>	<i>Détails de l'incident</i>	<i>Source</i>
24.07.08	Chantier naval de Perama	Friendshipgas	GPL	Explosion et incendie. Les pompiers ont lutté pendant plus de 4 heures pour éteindre le feu et éviter la propagation des flammes au navire voisin. 8 membres d'équipage ont trouvé la mort.	Cedre
19.01.04	Skikda, Algérie	Usine de liquéfaction de gaz	GNL	Explosion. Le souffle a fait trembler des bâtiments et brisé des vitres sur un périmètre de plus de 1,5 km. 27 employés ont trouvé la mort, 56 ont été blessés. L'accident a coûté 900 millions USD.	International Journal of Global Energy Issues
06.01.04	Italie	Panam Serena	Benzène	Explosion pendant les opérations de déchargement (benzène et carburant). Deux membres d'équipage ont été tués.	Cedre
30.10.95	Alexandrie	Capo Argento	GPL	Le transporteur de GPL est allé s'échouer près de l'entrée du port alors qu'il naviguait chargé. Le navire a été renfloué et est entré dans le port pour inspection	Lloyd's
26.03.94	Au large d'Ancona	Capo Cervo	Butylène	Collision avec un navire de marchandises ordinaires. Des dégâts à l'avant ont été occasionnés. Après inspection, le navire a repris sa route jusqu'à Ravenna pour décharger sa marchandise.	HCB
05.07.93	Au large de Marsa el Brega	Lulligas	Ammoniac	Echouage du navire sur le rivage. La cargaison a été transportée sur un autre bateau et le navire renfloué.	Lloyd's
18.05.90	Au large de Brindisi	Golden Star	Vide	Transporteur de GPL entré en collision avec M.V Brega. Les deux navires étant vides à ce moment là.	Lloyd's
28.04.90	Brindisi	Val rosandra	Propylène	Incendie dans la chambre de compression et dans les réservoirs au cours du déchargement du propylène. Il n'y a pas eu de dégâts mais le navire a été remorqué au large, a été laissé brûler puis a coulé.	HCB
22.10.89	Au large de Taranto	Agip Siracusa	GPL	Navire entré en collision avec un transporteur de véhicules. De sérieux dégâts pour les deux navires. Le transporteur de gaz a déchargé sa	HCB

				cargaison à Ravenna.	
26.02.89	Haifa	Zim Iberia	Oxyde d'éthylène	20 gros bidons sont tombés dans le port d'Haifa lors du déchargement. La plupart ont été récupérés.	HCB
15.02.89	Skikda	Tellier	GNL	Le navire a rompu ses amarres durant le chargement par gros temps endommageant 4 grues de chargement. Fuite peu importante mais coque légèrement abîmée. Réparation du navire entreprise à Marseille-Fos.	CEDRE
16.11.84	Sibenik (Yougoslavie)	Brigitta Montanari	Chlorure de vinyle monomère	Le chimiquier transportant plus de 1 300 tonnes de chlorure de vinyle monomère (CVM) a sombré dans l'Adriatique à une profondeur de 82 m. L'option choisie a été de renflouer l'épave et de pomper le produit.	Cedre
12.10.78	Hyères	Gaz East	Butane	Navire en route de Pylos à Port St Louis. Gîte importante due à une erreur de ballastage. L'équipage a abandonné le navire. Le navire a été remorqué au large et coulé par les autorités françaises.	Correspondant Officiel français

Tableau 1. Accidents maritimes impliquant des cargaisons gazeuses ou extrêmement volatiles en mer Méditerranée.

CHAPITRE 1. Aperçu général de la chimie des gaz et de leur classification

Une bonne compréhension du génie technologique, discipline impliquée dans le transport des gaz et plus spécialement dans le transport par voie maritime, requiert une certaine connaissance de la physico-chimie des gaz. Bien que ce sujet soit plutôt vaste et, à la fois, spécialisé, une étude de certains principes chimiques fondamentaux concernant les différents états physiques de la matière (on s'intéressera surtout à la phase gazeuse), ainsi qu'une brève description de la classification des gaz, peut en donner un aperçu.

1. État de la matière

La plupart des substances peuvent exister dans plusieurs états physiques homogènes : solide, liquide, gaz. Ces états sont en général appelés phases ; i.e. la phase solide, la phase liquide, la phase gazeuse ou de vaporisation. Une substance peut avoir deux ou même trois phases présentes simultanément. La phase, dans laquelle une substance donnée se trouve, peut être considérée comme l'expression d'un arrangement particulier entre les particules composant la substance ; c'est-à-dire lorsqu'elles sont arrangées et agglomérées entre elles de manière ordonnée, la substance est un solide et lorsque les particules bougent et commencent à perdre leur régularité d'arrangement, la substance se dilate jusqu'à devenir un liquide puis ensuite un gaz. Un gaz est alors caractérisé par une distribution désordonnée et un arrangement aléatoire de ces particules (voir **Figure 2**).

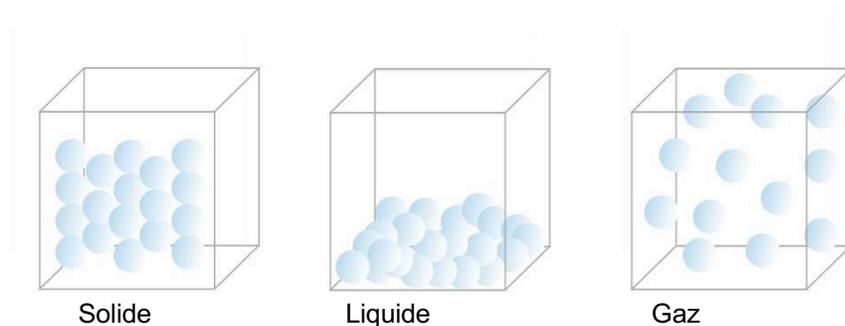


Figure 2 (Copyright Cedre). Illustration en deux dimensions des différentes phases de la matière.

2. Terminologies associées aux états de la matière - Aperçu général

Certains termes communs utilisés en conjonction avec la description des états d'une substance peuvent sembler plutôt conventionnels, cependant, il est impératif de connaître leur signification et leur interprétation.

i) Chaleur : C'est la quantité totale de « mouvement moléculaire » ou d'énergie cinétique présente dans une substance est mesurée comme une quantité d'énergie (énergie thermique)

ii) Température : C'est une mesure de la quantité de chaleur. La température représente l'intensité ou le degré de chaleur mesuré sur une échelle (échelle de Celsius, Fahrenheit, Kelvin), la température indique la quantité pour laquelle les molécules d'une substance sont en vibration et indique aussi la direction du flux de chaleur, sachant que la chaleur se transmet toujours d'un corps chaud vers un corps froid.

La distinction entre chaleur et température peut être faite clairement en considérant l'exemple des allumettes et celui d'un petit foyer dans un silo à grain. Tous deux peuvent être à une même température mais dans le dernier cas, il y aura certainement plus de chaleur.

iii) La tension (ou pression) de vapeur : C'est la pression, à une température particulière donnée, mesurée à la surface d'un liquide et exercée par les molécules de vapeur. Ces molécules quittent le liquide pour entrer dans la phase de vaporisation et vice versa. C'est une mesure de la tendance d'un liquide à se vaporiser. La tension de vapeur est une fonction de la température (plus la température est élevée, plus la pression le sera) et pour une température particulière donnée, il y a toujours une valeur fixe de la tension de vapeur. Les solides ont aussi une pression de vapeur, mais pour la plupart d'entre eux, elle apparaît habituellement à des températures élevées.

iv) La pression de vapeur saturante : C'est la pression mesurée, à une température particulière, lorsqu'un échange continu de molécules entre la vapeur et le liquide prend place dans un milieu confiné mais sous ces conditions, l'espace au dessus du liquide ne peut accepter plus de vapeur.

v) Le point d'ébullition : c'est une indication pour la consolidation des forces de cohésion d'un liquide et c'est la température à laquelle la pression de vapeur saturante d'un liquide est égale à la pression qui se trouve au dessus du liquide. Le point d'ébullition est une fonction de la pression. Dans des conditions de déversement, le point d'ébullition sera la température pour laquelle la pression de vapeur est égale à la pression atmosphérique.

3. Changements d'états

Quand un solide est chauffé, il fond et se transforme en liquide et si l'on intensifie le chauffage, le liquide s'évapore pour former un gaz. Les particules sont ordonnées à l'état solide, beaucoup moins à l'état liquide et complètement désordonnées à l'état gazeux. Les changements d'états, c'est-à-dire la fusion et l'évaporation, peuvent par conséquent être considérés comme des procédés de désarrangement.

Lors du passage de l'état solide à l'état liquide (la fusion) ou vice versa (la solidification), une quantité de chaleur doit être respectivement apportée ou libérée par la substance. Par exemple, pour qu'un solide puisse se transformer en liquide, il est nécessaire d'apporter de la chaleur. La chaleur impliquée lors du changement d'état est appelée chaleur latente et pour une masse donnée d'une substance, la chaleur latente sera la même pour la fusion et la solidification. De même, lors du changement de l'état liquide à l'état gazeux (vaporisation) ou vice versa (condensation), les chaleurs latentes sont identiques tout en étant différentes de celle de fusion ou de solidification. Pour l'eau, les états d'agrégation des différentes phases physiques de la matière sont illustrés dans la courbe de chaleur suivante (**Figure 3**) en fonction de l'addition uniforme de chaleur.

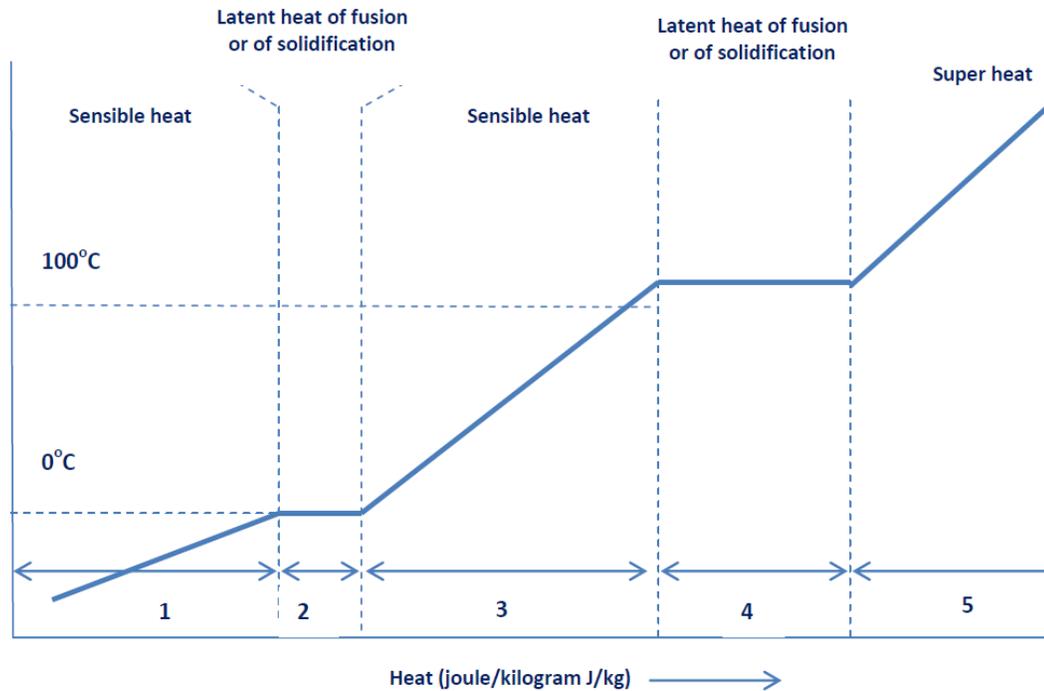


Figure 3. Illustration du comportement de l'eau lors du chauffage et du refroidissement.

En termes d'arrangement ou de désarrangement des particules, les variations qui accompagnent les changements d'états peuvent être expliquées de la façon suivante :

Tout au long de la portion (1) de la courbe, de la chaleur est fournie et les particules dans la substance solide c'est-à-dire les cristaux de glace commencent à vibrer. Au fur et à mesure que de la chaleur est apportée, les vibrations s'intensifient et bien qu'aucun changement ne soit visible, les particules à l'intérieur du solide commencent à être beaucoup moins ordonnées. La chaleur fournie augmente le mouvement cinétique des particules. Puisque la température est une mesure de l'énergie cinétique, l'augmentation de température continue tout au long de la portion (1) jusqu'à atteindre le point de fusion qui représente toute la portion (2) de la courbe. Au point de fusion, les vibrations des particules sont si importantes que toute addition supplémentaire de chaleur sert à casser les forces de liaison entre les particules voisines. Ainsi tout au long de cette portion de la courbe, la chaleur ajoutée n'augmentera pas l'énergie cinétique mais augmentera l'énergie potentielle des particules qui lutte contre les forces d'attraction. Il ne se produit aucun changement d'énergie cinétique, et la substance reste à la même température, mais la quantité de liquide augmente au dépend du solide. Ainsi à 0°C, l'eau et la glace coexistent.

Quand suffisamment de chaleur a été apportée pour défaire entièrement la structure cristalline de la glace, l'addition de chaleur augmente l'énergie cinétique des particules et la température du liquide augmente (portion (3) de la courbe). Cela continue jusqu'à ce que le point d'ébullition ait été atteint. Au point d'ébullition, la chaleur ajoutée est utilisée pour rompre les forces d'attraction entre les particules du liquide. Tout au long de la portion (4) de la courbe, le liquide se transforme en gaz. Finalement, après que tout le liquide se soit transformé en gaz, la chaleur ajoutée augmente naturellement la température et l'énergie cinétique des particules – portion (5) de la courbe.

La courbe peut aussi être vue dans le sens inverse, de la chaleur est alors retirée à la substance et dans ce cas, la courbe est appelée « courbe de refroidissement ». Puisque le problème est en rapport avec l'état gazeux, il est intéressant ici, contrairement aux idées développées dans les paragraphes précédents, de considérer ce qui arrive quand un gaz, dans ce cas précis la vapeur d'eau, est refroidit. Au fur et à mesure que la chaleur est retirée de la vapeur d'eau, la température commence à diminuer (portion (5) de la courbe). Tout au long de cette portion de courbe, l'énergie cinétique des particules de vapeur d'eau diminue dans le but de compenser la perte de chaleur. Ce procédé s'effectue jusqu'à ce que les forces d'attraction

deviennent dominantes et que les particules s'unissent pour former un liquide. Dans le procédé de liquéfaction, les particules quittent le gaz et entrent dans l'état liquide (portion (4) de la courbe). L'importance de la température dans cette phase gazeuse est mise en évidence avec l'exemple de l'oxyde d'éthylène qui est un gaz à 20°C et un liquide à 10°C.

Lors de l'addition de température, l'état physique d'une substance donnée dépend de la pression extérieure, ainsi les changements entre les états solide, liquide et gazeux dépendent à la fois de la température et de la pression. Cette relation entre les états solide, liquide et gazeux prise comme une fonction de la température et de la pression peut être résumée à partir d'un diagramme appelé diagramme de phases. Chaque substance a son propre diagramme de phases qui a été établi à partir d'expériences et un diagramme typique pour une substance donnée ressemblerait à la **figure 4**. Dans les diagrammes, la pression est représentée verticalement et la température horizontalement. Très brièvement, chacune des régions correspond à une phase du système. Chaque combinaison de pression et de température correspond à une région du diagramme qui indique dans quel état est la substance.

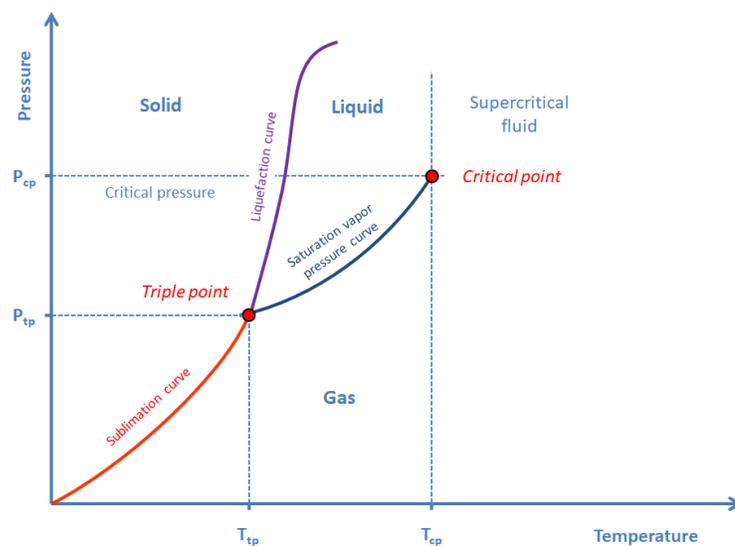


Figure 4 (Copyright Cedre). Diagramme de phases.

La ligne qui sépare une région d'une autre est une ligne d'équilibre et représente un équilibre entre deux phases. Si on prend la ligne solide - liquide, elle met en évidence les températures et les pressions auxquelles le solide et le liquide coexistent en équilibre. La quantité de matière qui passe de la phase solide à la phase liquide est exactement compensée par la quantité de matière qui suit le chemin inverse. On retrouve les mêmes propriétés avec la ligne qui sépare la phase solide de la phase vapeur. Ainsi pour une combinaison donnée de température/pression on peut, à partir du diagramme, déterminer la phase finale de la substance. Le point où les trois lignes du diagramme se rencontrent est le point triple. Le point triple représente une combinaison de température et de pression unique pour laquelle les trois phases peuvent être en équilibre simultanément. Pour d'autres combinaisons de température et de pression, les trois phases peuvent exister mais elles ne seront pas en équilibre. De plus, l'utilité d'un diagramme de phase vient du fait qu'il illustre graphiquement qu'un gaz peut être liquéfié et, par conséquent peut réduire son volume par perte de chaleur (diminution de la température) et/ou par compression (augmentation de la pression) comme cela est montré dans la **Figure 5**.

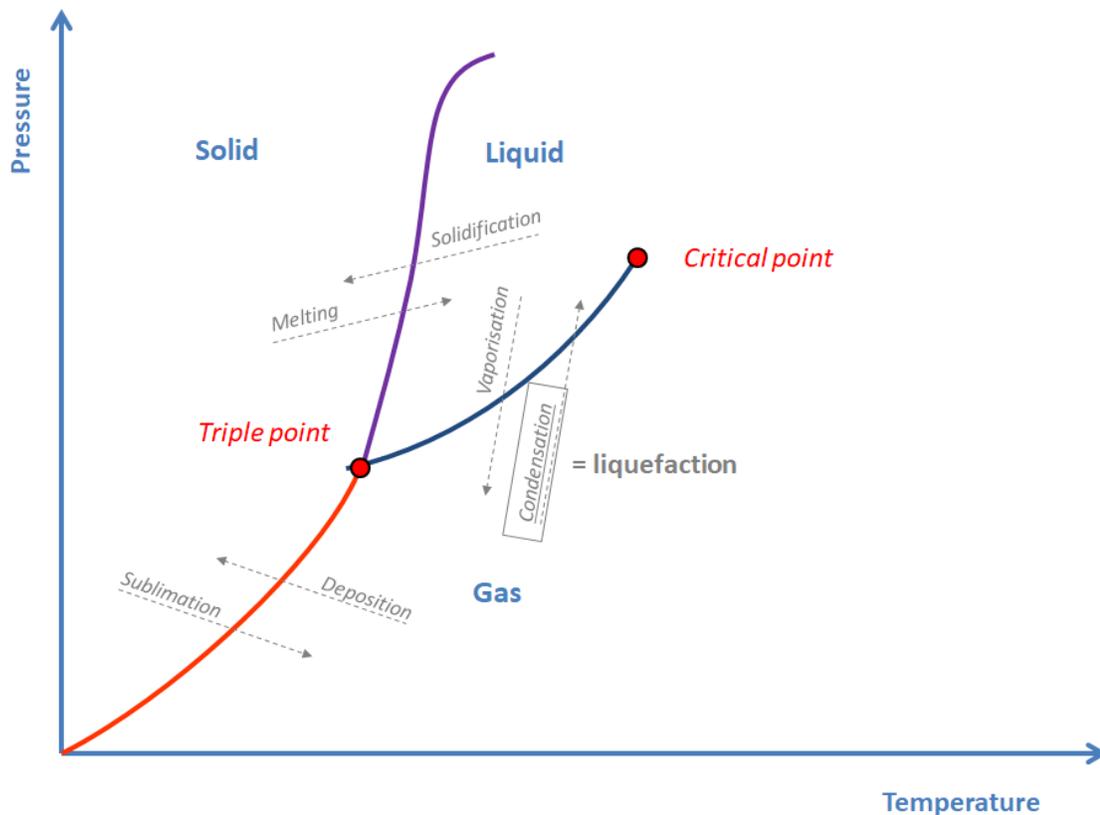


Figure 5 (Copyright Cedre). Diagramme de phase montrant comment un gaz peut être liquéfié par perte de chaleur et/ou par pressurisation.

4. Interactions entre l'eau de mer et les substances chimiques

Dans les Fiches de données de sécurité (FDS), on utilise de l'eau déminéralisée pour déterminer les propriétés physico-chimiques. La différence majeure entre l'eau de mer et l'eau déminéralisée est la salinité. Cette différence de composition chimique se répercute de manière sensible sur les valeurs de solubilité des composés chimiques. L'étude *Xie et al.* (1997) a démontré une possible diminution de 20 à 30 % pour certaines substances chimiques. Dans cette étude, les résultats sont donnés pour une salinité de 32 ppt, alors que la salinité en Méditerranée est proche de 38 ppt. Il convient donc de considérer que les valeurs de solubilité seront légèrement moins importantes. Le **Tableau 2** donne quelques exemples.

Substance chimique	Solubilité (g.L ⁻¹)	
	Acrylate d'éthyle	Acrylate d'éthyle
Eau douce	17,5	12,8
Eau de mer (35 ppt)	10,0	9,8

Tableau 2. Exemple de substances chimiques, avec solubilité déterminée dans l'eau douce et l'eau de mer (Source : Cedre).

5. Liquéfaction des gaz

5.1. Matières physiques

Comme cela est montré sur la **Figure 5**, les conditions les plus favorables pour la liquéfaction d'un gaz sont les hautes pressions ou les basses températures ou une combinaison des deux. Les deux facteurs qui s'opposent sont impliqués dans le procédé de liquéfaction. D'une part, ce sont les forces d'attraction intermoléculaires qui tendent à lier les particules entre elles et qui augmentent avec les hautes pressions et d'autre part, c'est l'énergie cinétique des particules qui tend à garder les particules éloignées les unes des autres et qui diminue avec les basses températures.

Cependant, pour chaque gaz il existe une température au-dessus de laquelle les forces d'attraction ne sont pas assez fortes pour produire la liquéfaction et même avec de hautes pressions. Cette température est appelée **température critique**. La température critique dépend de la magnitude des forces d'attraction entre les particules d'une substance. Au-dessus de la température critique, un gaz est considéré comme permanent puisqu'il ne peut pas être liquéfié. En-dessous de la température critique, un gaz est à juste titre décrit comme une vapeur puisqu'il peut toujours être liquéfié si la pression augmente suffisamment. Vu différemment, si une substance existe comme un gaz en-dessous de sa température critique, elle est appelée vapeur. Ainsi par exemple, de l'eau à l'état gazeux qui a une température comprise entre son point d'ébullition de 100°C et la température critique qui est de 374°C sera considérée comme de la vapeur d'eau. Un gaz peut, par conséquent, être liquéfié en gardant une pression constante et en le refroidissant. La pression minimum pour compresser un gaz jusqu'à son état liquide, à sa température critique, est appelée **pression critique**.

L'**Annexe 1** dresse la liste des pressions et des températures critiques de quelques gaz ordinaires.

Il est aussi prouvé que les substances possédant de hautes températures critiques sont facilement liquéfiables et peuvent être liquéfiées uniquement par augmentation de la pression tandis que les substances possédant de basses températures critiques ont besoin d'être refroidies avant de pouvoir être liquéfiées. Ainsi, en étendant cette généralisation aux marchandises répertoriées dans l'**Annexe 1**, toutes les marchandises seraient en-dessous de leur température critique à des températures avoisinant celle de l'air ambiant durant leur traversée en mer. Elles peuvent par conséquent être liquéfiées uniquement par augmentation de pression et être transportées à température ambiante. Par contre, il n'est pas possible de transporter du méthane, de l'éthane ou de l'éthylène sous forme liquide par simple compression car leurs températures critiques sont trop basses. Des procédés de réfrigération sont donc nécessaires pour leur transport sous forme liquide.

5.2. Processus de liquéfaction en usine

Le gaz naturel est un mélange de divers composés, parmi lesquels le méthane est le principal hydrocarbure. Lorsque le gaz naturel est issu d'un réservoir souterrain, il est saturé de vapeur d'eau et est susceptible de contenir des composés d'hydrocarbures lourds ainsi que des impuretés non hydrocarbonées.

Pour répondre aux attentes des consommateurs, optimiser la productivité économique et respecter un certain nombre de normes, le gaz naturel brut doit, préalablement à son transport, être soumis à différents processus (**Figure 6**).

Les étapes de traitement ci-dessous sont généralement requises :

- Purge des condensats : le produit de base, le gaz naturel brut, est refroidi pour faire baisser sa température sous le point de rosée de son hydrocarbure à la pression du produit de base.

- Élimination des gaz acides : le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène sont tous deux des gaz acides présentant des propriétés corrosives en présence d'eau, et une toxicité élevée pour le second.
- Déshydratation : la présence d'eau n'est pas acceptable en raison du risque de corrosion accélérée et d'accumulation potentielle dans les zones les plus basses des pipelines. La présence d'hydrates solides risque en outre de bloquer des pièces clés, comme les soupapes ou raccords.
- Élimination et fractionnement des hydrocarbures lourds : les hydrocarbures lourds (C5+) sont éliminés par fractionnement avant la liquéfaction. Le gaz naturel est pré-refroidi à environ -35 °C au propane. Le fractionnement se produit aux différents points d'ébullition des divers hydrocarbures dans le flux de GNL.
- Liquéfaction : le gaz naturel circule à travers plusieurs échangeurs thermiques de plus en plus froids, jusqu'à atteindre sa température de liquéfaction (-162 °C). Le transport à la pression atmosphérique sous forme de GNL est alors possible.

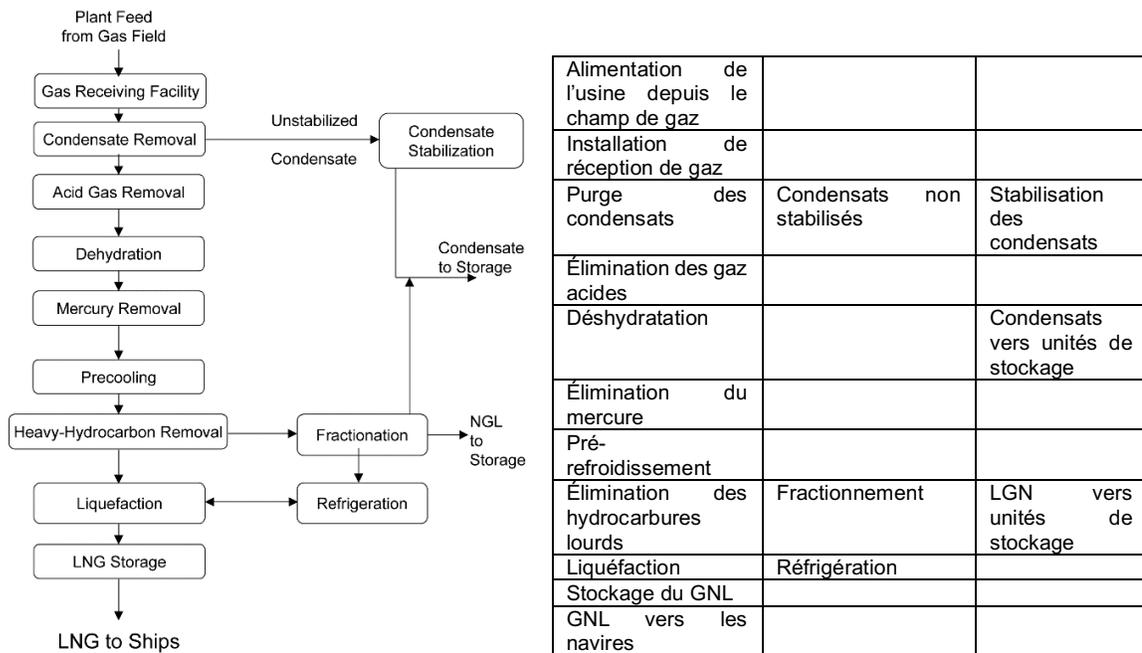


Figure 6. Étapes clés du processus dans une usine de liquéfaction de GNL (Source : Petrowiki.org).

6. Description et caractéristiques générales des gaz

D'après ce qui a déjà été dit, un gaz peut être décrit comme un fluide sans forme dont les particules le composant sont constamment en mouvement et complètement désordonnées. Contrairement à un solide qui a une forme et un volume ou un liquide qui a un volume mais pas de forme, un gaz n'a ni volume ni forme. Un gaz est ainsi l'état de la matière le plus désordonné et comme les autres états, il n'est rien d'autre que de la matière dans un état physique homogène spécifique. Une distinction commune entre un liquide et un gaz est qu'un gaz peut être réduit de volume alors que le liquide est relativement incompressible.

Caractéristiques générales des gaz :

- Ils peuvent être réduits en volume, impliquant que la substance dans la phase gazeuse n'est pas aussi compacte que les phases solide et liquide ;
- Ils sont indéfiniment expansibles et occuperont toujours tout le volume de n'importe quel navire dans lequel ils sont confinés, impliquant que la substance dans son état gazeux est constamment en mouvement. Cette énergie est due au mouvement des particules composant le gaz et elle est appelée énergie cinétique ;
- Ils exercent des pressions sur les parois internes des navires dans lesquels ils sont confinés impliquant que les gaz font pression sur toutes les parois avec lesquelles ils sont en contact.

7. Classification des gaz

Les gaz peuvent être classés d'une manière générale selon :

- leurs propriétés dangereuses
- leurs propriétés physiques
- leur usage
- leur composition chimique
- leur comportement après déversement

7.1. Classification en fonction des propriétés dangereuses

Cette catégorie peut être divisée en 4 groupes :

- Les gaz inflammables : Ce sont des gaz qui brûlent en présence d'oxygène ou de sources d'ignition, p.e. méthane, propane ;
- Les gaz ininflammables : Ce sont des gaz qui ne brûlent pas dans l'air, cependant dans cette sous-catégorie, on différencie ceux qui entretiennent la combustion et sont souvent appelés gaz oxydants et ceux qui ne l'entretiennent pas et sont alors appelés gaz inertes, p.e. hélium, argon ;
- Les gaz toxiques : Ce sont des gaz mettant en danger la vie de l'homme, p.e. arsine, phosgène, chlore ;
- Les gaz réactifs : Ce sont des gaz qui réagissent avec d'autres matières ou entre eux par un procédé autre que la combustion et libérant en même temps de la chaleur qui, quelques fois, conduit à l'apparition de flammes, p.e. fluorine, acétylène, chlorure de vinyle.

7.2. Classification en fonction des propriétés physiques

Cette catégorie peut être subdivisée en :

- Gaz comprimés non-liquéfiables : Ce sont des gaz qui à l'intérieur d'un conteneur de gaz sont à une température normale et existent à l'état gazeux sous pression, p.e. argon, hélium, air, hydrogène ;
- Gaz comprimés liquéfiables : Ce sont des gaz qui sont liquéfiables lorsque l'on augmente la pression et ils existent dans leur état liquide et gazeux à l'équilibre dans le conteneur de gaz, p.e. propane, butane, chlore ;

- Liquides cryogéniques : Ce sont des liquides produits à partir de gaz liquéfiés en refroidissant à de très basses températures à l'aide de systèmes de réfrigération. Ils sont maintenus dans leurs conteneurs à de basses températures et à de relatives basses pressions, p.e. GNL, oxygène, hydrogène.

7.3. Classification en fonction de l'usage

- Les gaz combustibles : Ce sont des gaz utilisés pour produire de la chaleur ou de l'électricité lors de leur combustion, p.e. GPL, GNL ;
- Les gaz industriels : Ce sont des gaz utilisés dans les procédés industriels tels que la soudure, le découpage de tôles, la réfrigération, p.e. acétylène ;
- Les gaz médicaux : Ce sont des gaz utilisés à des fins curatives tels que l'anesthésie, les thérapies respiratoires, p.e. oxyde nitreux.

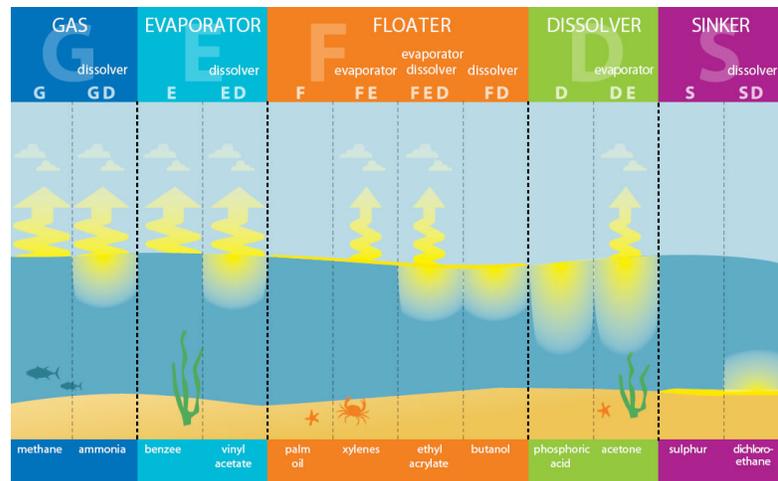
7.4. Classification en fonction de la composition chimique

Il est important de connaître les composés chimiques et/ou caractéristiques spécifiques en jeu derrière les acronymes :

- Gaz Naturel Liquéfié (GNL) : son constituant majeur est le méthane (CH_4).
- Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) : ses constituants majeurs sont le propane (C_3H_8) et le butane (C_4H_{10}).
- Liquides de Gaz Naturel (LGN) : les LGN sont des hydrocarbures liquides ou liquéfiés extraits du gaz naturel dans les installations de séparation ou les usines de traitement du gaz. Entrent dans cette catégorie l'éthane, le propane, le butane (normal et iso), l'(iso)pentane et les pentanes plus (ce que l'on appelle aussi parfois l'essence naturelle ou condensat d'usine).
- Gaz Naturel Comprimé (GNC) : source de combustible produite par compression de gaz naturel à moins de 1 % de son volume atmosphérique standard.

7.5. Classification en fonction du comportement dans l'environnement marin après déversement

Le comportement d'une substance déversée en mer désigne la manière dont elle se disperse au cours des premières heures suivant son contact avec l'eau. Prévoir ce comportement est l'une des phases critiques de l'élaboration d'une stratégie d'intervention. La classification européenne des comportements (SEBC - Standard European Behaviour Classification) définit le comportement théorique d'une substance en fonction de ses propriétés physico-chimiques et l'organise en cinq grandes familles, telles que présentées dans la **Figure 7** :



Méthane Ammoniac Benzène Acétate de vinyle Huile de palme Xylènes Acrylate d'éthyle Butanol Acide phosphorique Acétone Soufre Dichloroéthane

Figure 7. (Copyright Cedre). Classification européenne SEBC (*Standard European Behaviour Classification*). G (Gazeux), E (Evaporant), F (Flottant), D (Soluble), S (Coulant) et les combinaisons de ces comportements (par ex. FED pour Flottant et Evaporant et Soluble).

La plupart du temps, une substance ne présente pas un seul, mais plutôt une combinaison de différents comportements en raison de sa nature et des facteurs environnementaux (vents, houle, courant). L'acrylate d'éthyle, par exemple, est classé FED, car il est à la fois flottant, évaporant et soluble. La classification SEBC a cependant ses limites. Elle est en effet basée sur des expériences menées en laboratoire, sur des produits purs, à une température de 20 °C dans de l'eau douce. De telles conditions sont bien éloignées de la réalité rencontrée lors d'accidents en mer et le comportement réel du produit dans l'environnement peut se révéler assez différent de la théorie. La classification SEBC doit donc être utilisée avec précaution, mais elle reste un précieux outil dans le processus de définition des stratégies de lutte antipollution.

Il convient de noter que, selon la localisation exacte de la source du déversement gazeux en mer, l'évolution des substances chimiques et les conséquences peuvent être extrêmement différentes. Dans le cas d'une rupture de pipeline sous-marin par exemple, outre les caractéristiques de ladite rupture et les conditions de transport du gaz (nature, état, pression, débit), les phénomènes chimiques déterminant le comportement d'un panache gazeux dans la colonne d'eau jouent un rôle de la plus haute importance ; ils impacteront les conséquences à la surface de l'eau en termes de comportement et les risques associés.

Pour les gaz solubles, une fuite sous-marine favorisera la solubilisation plutôt que l'évaporation, en particulier si la source de la fuite est éloignée de la surface de l'eau. Pour les gaz essentiellement non solubles, qui représentent la majorité des gaz transportés par pipeline comme le GNL ou le GPL, la profondeur et la température sont les deux grands paramètres qui influent sur l'évolution des bulles de gaz dans la colonne d'eau et l'impact à la surface de la mer. Il convient de noter qu'à une profondeur suffisante, il est possible que des hydrates gazeux se forment et, selon les conditions de déversement, un tel phénomène est susceptible de modifier le flux surfacique de gaz à la surface de l'eau. Dans tous les cas de figure impliquant des explosions de gaz sous-marines, une évaluation préalable des risques et un plan d'urgence doivent être réalisés avant d'engager toute opération de sauvetage ou de nettoyage.

CHAPITRE 2. Les structures pour le transport maritime des gaz

Les produits gazeux sont considérés comme des marchandises dangereuses car présentent des risques tels que la corrosion, la toxicité et l'inflammabilité. En plus des problèmes de transport d'une marchandise qui est dangereuse de façon inhérente viennent s'ajouter les difficultés normales pour assurer le transport et pour manipuler une marchandise en mer ou dans une zone portuaire.

Ces produits peuvent être transportés de deux manières : i) en tant que marchandises dangereuses sous emballage ; ii) en vrac. Pour cela, un cadre juridique international a été développé dont le but est de mettre en place des règles de sécurité lorsque de tels produits sont transportés en vrac ou sous emballage. Ce qui suit est une brève description de la façon dont les gaz peuvent être transportés en mer et des règles internationales pour le transport.

1. Gaz transportés en tant que matières dangereuses

Les substances dangereuses sous emballage sont habituellement connues comme des **marchandises dangereuses**. Les gaz transportés comme des matières dangereuses sont placés dans différents types de réceptacles. Le réceptacle est soit placé directement sur le pont du navire, soit à l'intérieur, soit dans une unité de transport qui elle-même est placée sur le navire.

1.1. Types de réceptacles

Les gaz sont transportés dans des réceptacles rigides de différentes tailles. Ce sont des réceptacles qui gardent leur forme qu'ils soient pleins ou vides, même lorsqu'ils sont comprimés à hautes pressions. Les types de réceptacles utilisés pour le transport de produits gazeux sont :

- **Les bouteilles** : elles ont une forme tubulaire avec une section circulaire et une valve (régulateur) ou un système de valve fixé à l'extrémité du cylindre, certaines ont un joint d'étanchéité à la place de la valve qui est destiné à être utilisée avec un équipement ayant un dispositif de valve. La plupart des bouteilles ont un dispositif limiteur de pression sensible à la chaleur ou une soupape empêchant les surpressions internes qui pourraient avoir des conséquences catastrophiques si la bouteille était exposée à d'importantes chaleurs.

Les bouteilles pour le transport de gaz sont de deux types :

- **Les bouteilles non-isolées** : elles sont habituellement fabriquées en acier bien qu'il ne soit pas rare de trouver des bouteilles fabriquées en aluminium ou en fibres de verre avec une paroi externe en aluminium. Elles ont des épaulements circulaires sur le dessus et un couvercle vissé ou un anneau cylindrique pour protéger la valve. Elles peuvent mesurer approximativement jusqu'à 1,5 m de hauteur et jusqu'à 0,25 m de diamètre ;
- **Les bouteilles isolées** : elles sont utilisées pour les liquides cryogéniques et sont constituées d'une paroi interne isolante en métal et une paroi externe de protection en métal également. La zone comprise entre les 2 parois est en général sous vide. Les bouteilles disposent d'un petit anneau au dessus protégeant la valve et un pied annulaire pour la manipulation. Elles peuvent mesurer approximativement jusqu'à 1,5 m de hauteur et jusqu'à 0,6 m de diamètre ;

Les différents types de bouteilles de gaz sont représentés sur la **Figure 8**.



Figure 8. Différents types de bouteilles de gaz (non à l'échelle).

- **Les modules à tubes** : ils sont constitués de plusieurs bouteilles en acier positionnées horizontalement, en permanence montées à l'intérieur du cadre du module et où les valves des bouteilles sont positionnées vers la partie fermée du compartiment. Un module à tubes est représenté sur la **Figure 9** ;



Figure 9. Exemple d'un module à tubes.

- **Les conteneurs d'une tonne** : ce sont des cuves fortement pressurisées, en acier, faisant approximativement 0,9 m de diamètre et 2 m de long. Le nom de « conteneur d'une tonne » vient du fait de leur capacité à transporter une tonne de chlore. Les valves se trouvent à l'une des extrémités sous une plaque protectrice maintenue en place par des boulons. Deux « rebords » circulaires situés sur la partie centrale du conteneur facilitent sa manipulation. Un conteneur d'une tonne est représenté sur la **Figure 10**.



Figure 10 (Copyright Cedre). Un conteneur d'une tonne.

- **Les conteneurs-citernes multimodaux** : ils sont constitués d'une cuve maintenue par une armature métallique ; le type de structure peut être une boîte (structure complète) ou une structure partielle (armature uniquement aux extrémités). Les deux types de structure sont représentés sur la **Figure 11**. Les deux types sont équipés d'équerres pour la manipulation. En général, la longueur de la citerne est de 20 pieds bien que des conteneurs de 40 pieds existent mais ces derniers sont rares du fait de leur masse importante. La cuve est fabriquée pour une utilisation spécifique (pour un seul produit ou une gamme de produits) et elle est généralement en acier avec un revêtement intérieur imperméable. Les cuves sont équipées de nombreux raccords ou attaches pour les remplissages, les déchargements, les dispositifs de sécurité, de mise sous vide ou à l'air libre, plus d'autres systèmes recommandés pour le transport d'un produit spécifique.

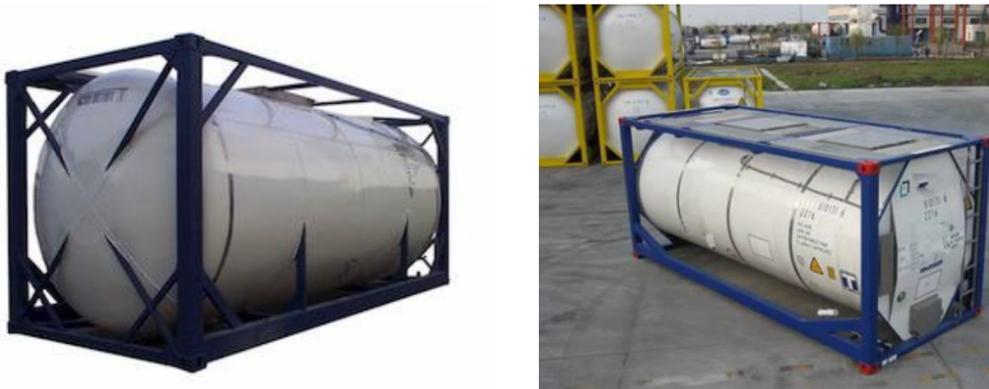


Figure 11. Conteneurs-citernes multimodaux : structure type boîte (à gauche) et structure partielle (à droite).

Les conteneurs-citernes appropriés pour le transport de produits gazeux peuvent être de deux types :

- **Les citernes portables pressurisées** transportant des gaz comprimés liquéfiés ;
- **Les citernes cryogéniques portables** : Ce sont des citernes en deux parties, c'est-à-dire qu'il existe une zone d'isolement entre la partie intérieure et la partie extérieure de la citerne. L'isolation est maintenue à l'aide de polyuréthane expansé, de polystyrène, ou de coton minéral ou encore d'une combinaison de ces matériaux et l'espace entre l'intérieur et l'extérieur de la citerne est normalement maintenu sous vide ;
- **Véhicules et camions-citernes** : chacun est constitué d'une citerne de cargaison isolante qui est en permanence montée sur un chariot ou sur une remorque, transporté ensuite par un véhicule motorisé. Les règles de sécurité et les exigences de construction des conteneurs multimodaux s'appliquent également aux véhicules et camions-citernes qui peuvent être de deux types :
 - **Des citernes routières pressurisées** qui transportent des gaz comprimés ou liquéfiés. Elles ont une section circulaire et un arrondi à chaque extrémité de la citerne. Ces citernes peuvent aussi transporter différentes substances dans des compartiments séparés. Des thermomètres sont présents dans chaque compartiment.
 - **Des citernes routières cryogéniques** qui transportent des liquides cryogéniques. Comme c'est le cas pour tous les conteneurs transportant les liquides cryogéniques, ce type de citerne est fabriqué en deux parties (partie intérieure et

extérieure) avec une isolation entre elles, constituée de produits isolants sous vide. Chaque citerne a une section circulaire et une « capsule » à son extrémité ;

- **Les remorques à tubes (Figure 12)** : cela ressemble à des modules à tubes mais ces derniers sont montés en permanence sur une remorque ;

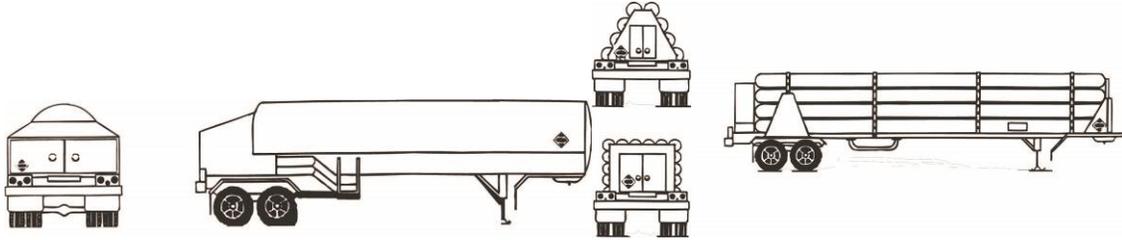


Figure 12. Exemples de véhicules à remorque transportant des produits gazeux.

- **Les wagons** : ce sont des wagons-citernes qui sont construits pour transporter des gaz. Les règles de sécurité et les exigences de construction des conteneurs-citernes portables sont aussi valables pour les wagons. Les wagons-citernes sont divisés en : i) wagons-citernes pressurisés; ii) wagons-citernes cryogéniques; iii) wagons-citernes à tubes. Les différents types de wagons sont représentés dans la **Figure 13**.

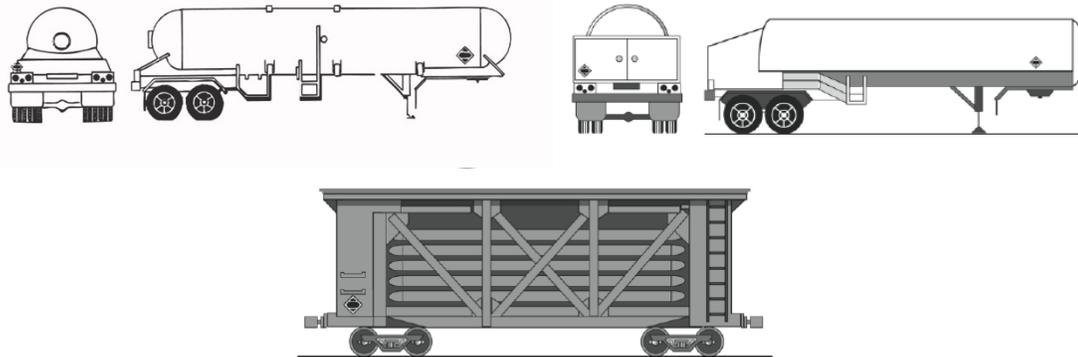


Figure 13. Exemples de véhicules à remorque transportant des produits gazeux.

1.2. Navires transportant des matières dangereuses

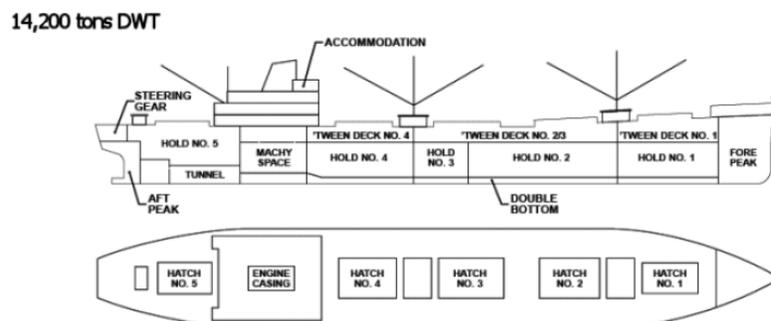
Avant le développement des systèmes de transport de marchandises intégrées, l'acquisition de méthodes de construction moderne pour les navires, l'existence d'équipements sophistiqués de manipulation côtière, les navires classiques transportant des matières dangereuses empaquetées étaient probablement parmi les plus communs des types de navires marchands. Aujourd'hui, grâce à l'industrie navale, une large variété de navires marchands capables de transporter de telles substances sont disponibles.

Les différents types de navires peuvent être identifiés par des caractéristiques distinctives (p.e. leur apparence générale) car le design des navires dépend principalement de la fonction qui leur est dévolue. Les principaux navires transportant des matières dangereuses sont les suivants (voir **Figure 14**) :

- **Les navires classiques de marchandise** : Quand un navire opère un service régulier entre les ports, le terme navire de charge régulier (liner) est utilisé bien que certains pays emploient un autre terme (freighter : cargo) ; quand le navire est utilisé pour transporter des

marchandises d'un port à un autre à n'importe quel heure et n'importe où dans le monde, le terme navire sans ligne régulière (tramp) est employé. Les navires classiques de marchandise sont de deux types. Les premiers sont les cargos de marchandises en colis qui transportent des matières sèches dans des emballages réduits : caisses, sacs, barils. Ces navires disposent de parquets de chargement pour soutenir et séparer les marchandises. Ces navires ont quatre ou cinq cales et un ou deux entreponts qui font en général toute la longueur du bateau. Ainsi les différents articles transportés peuvent être rangés méthodiquement pour permettre un accès aisé pour le déchargement et faciliter la répartition du poids sur le navire. Les seconds types de navires sont les transporteurs polyvalents conçus pour transporter simultanément différents types de marchandises sous emballage. Des systèmes spéciaux sont disponibles pour transporter des marchandises diverses tels que les cargaisons liquides et réfrigérées (voire gelées).

- **Les porte-conteneurs cellulaires** : Ce sont des transporteurs spécialisés qui transportent des conteneurs utilisés pour les matières dangereuses. La majorité des conteneurs sont conçus pour des marchandises sèches classiques (type boîte) mais des unités spécialisées peuvent être utilisées pour des liquides, des poudres ou des marchandises réfrigérées. Les conteneurs sur le pont nécessitent d'être bien attachés. La capacité de transport de ces navires est spécifiée en TEUs (Twenty Equivalent Units : équivalents vingt unités).
- **Les navires roll-on / roll-off** : Les marchandises sont embarquées et débarquées en utilisant des remorques transportant les conteneurs. Une caractéristique commune de ces navires est leur capacité intermodale, ce qui signifie que les marchandises sont directement en place pour le transport routier. D'autres navires qui opèrent sur cette méthode d'embarquement et de débarquement sont les ferries.



Transporteur de marchandises diverses



Navire porte-conteneurs

Figure 14. Illustration de quelques navires qui transportent des matières dangereuses sous emballage.

1.3. Règles internationales régissant le transport en mer des matières gazeuses dangereuses

- Transport en mer de matières gazeuses dangereuses

Le chapitre VII de la Convention Internationale de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) sur le sauvetage de vie en mer (SOLAS), 1974, contient toutes les recommandations sur le transport de matières dangereuses en mer. D'autres mesures sont incluses dans le code maritime international des marchandises dangereuses de l'OMI (code IMDG) qui a été adopté pour la première fois par la résolution A.81(IV) de l'assemblée de l'OMI, le 27 septembre 1965. Bien que le principal sujet du chapitre VII du SOLAS et du code IMDG soit le sauvetage, de nombreuses substances listées peuvent aussi être source de pollution et, en 1987, le code IMDG a été étendu aux aspects de pollution. Le code IMDG est en fait utilisé pour mettre en application l'annexe III de MARPOL 73/78.

Le code IMDG contient des recommandations sur le transport de matières dangereuses en mer concernant la classification, la documentation, les étiquettes, les emballages, le stockage et l'isolement, la prévention et la lutte contre les incendies et d'autres sujets qui leur sont relatifs. Ce code est publié dans une version complète de deux volumes. Des amendements sont régulièrement publiés pour répondre à l'évolution technologique des navires. Un troisième volume contient des informations supplémentaires sur les premiers secours médicaux, les règles d'utilisation des pesticides dans les navires, etc. Le code IMDG est publié tous les deux ans, en 2 volumes accompagnés d'informations supplémentaires. Il est également disponible à la commande dans d'autres formats : pour Windows (les utilisateurs Mac devront utiliser un émulateur Windows), Internet, les intranets, la bibliothèque de l'OMI. L'accent sera mis sur les détails à donner par des personnes spécifiques en cas d'urgence.

Dans le code, les substances sont regroupées par classe. Chaque classe comporte une introduction donnant des informations générales sur les propriétés chimiques, sur le conditionnement, le stockage, la compartimentation, la lutte contre le feu et des spécifications appropriées sur le transport de quantités limitées. Chaque substance a ensuite, en général, une fiche individuelle et leurs informations incluent le nom chimique utilisé lors du transport, sa formule, son numéro d'identification de l'Organisation des Nations Unies, les effets observés sur l'homme, les propriétés chimiques, l'emballage, le stockage, les limites d'explosivité ainsi que le point éclair.

Les gaz transportés comme des matières dangereuses sur le pont d'un navire ont des propriétés chimiques variées et sont transportés dans des conditions différentes. Ils peuvent être comprimés, liquéfiés à température ambiante sous hautes pressions, dissous sous pression dans un solvant qui est ensuite adsorbé par une substance poreuse, ou liquéfiés par réfrigération. Ils peuvent être ininflammables, inflammables, toxiques, corrosifs, entretenir la combustion ou être une combinaison de ces propriétés. Certains gaz sont plus légers que l'air alors que d'autres sont plus lourds. Le Code regroupe les gaz sous deux classes.

Pour stocker et compartimenter les substances à bord des navires, la classe 2 est subdivisée en trois parties selon les risques présentés par les gaz lors du transport :

- Classe 2.1 - gaz inflammables
- Classe 2.2 - gaz ininflammables
- Classe 2.3 - gaz toxiques

Pour indiquer plus exactement les risques présentés par les gaz, la classification recommandée par les articles 2 et 5 du chapitre VII de SOLAS 1974 a été complétée par une description supplémentaire de cette sous-classe.

**Code : dans le contexte de l'OMI, un code est un recueil de recommandations techniques détaillées sur un aspect spécifique de la navigation, destinées à améliorer la sécurité du commerce maritime international et la protection de l'environnement.*

- Navires propulsés par des gaz ou autres combustibles à faible point d'éclair

Le Code IGF réglemente les navires qui utilisent des gaz ou autres combustibles à faible point d'éclair. Il a pour objet de limiter les risques pour le navire, son équipage et l'environnement, eu égard à la nature des combustibles concernés.

La finalité de ce Code est de fixer les critères applicables à l'agencement et à l'installation des équipements et machines nécessaires à la propulsion et à d'autres fins auxiliaires utilisant du gaz naturel comme combustible, pour parvenir à un degré équivalent d'intégrité en termes de sécurité, fiabilité et sûreté que ce qu'offriraient des machines (principales et auxiliaires) neuves comparables alimentées aux hydrocarbures.

2. Produits gazeux transportés en vrac

Les **transporteurs de gaz** sont conçus pour **transporter les gaz sous forme liquide en vrac**. La disposition générale d'un transporteur de gaz est similaire à celle des pétroliers : les machineries et les espaces vitaux se trouvent à l'arrière tandis que les marchandises sont disposées sur le reste du navire. Cependant, l'incorporation des conteneurs dans la coque du navire est très différente : cela est dû à la nécessité de transporter des marchandises sous pression ou réfrigérées ou une combinaison des deux. Il y a, par conséquent, plusieurs caractéristiques propres aux transporteurs de gaz dues aux exigences de pressurisation et de refroidissement des gaz durant leur transport.

L'aspect fondamental de ces exigences est le matériau de construction des citernes de cargaison. Il est important de comprendre que les citernes sont conçues pour transporter des substances pressurisées et sont capables de résister aux pressions exercées par les marchandises lors de hautes températures rencontrées durant leur transport.

2.1. Types de transporteurs de gaz

Pour les citernes qui transportent en vrac des substances sous forme réfrigérée à des températures inférieures à la température ambiante, la pression nominale de la citerne dépend du degré de réfrigération de la cargaison et le matériau utilisé pour la construction des citernes doit être suffisamment souple. Si la cargaison est réfrigérée, on peut opérer à pression atmosphérique et ainsi éviter les exigences relatives à une citerne pressurisée. Dans ce cas, la marchandise est qualifiée de « pleinement réfrigérée » et la température est maintenue à son point d'ébullition à la pression atmosphérique. Si la marchandise n'est pas pleinement réfrigérée, elle peut encore exercer une pression de vapeur non-négligeable et les citernes devront alors être conçues pour résister à des températures relativement basses et à une certaine pression.

Basés sur les différents systèmes de citernes, les transporteurs de gaz peuvent être classés comme suit :

- **Les navires totalement pressurisés** : c'est le type de navire de transporteurs de gaz le plus basique et c'est le plus simple de tous lorsque l'on considère les systèmes de conteneurisation et les équipements de manipulation des marchandises. Les matières sont transportées dans des citernes pressurisées conçues pour résister à des pressions de 15 à 17 bars (quelques navires peuvent accepter jusqu'à 20 bars) ; les citernes sont en général cylindriques bien que quelques navires présentent des citernes sphériques ou des citernes cylindriques montés verticalement ou une combinaison des deux. Les navires transportent de deux à six citernes qui sont arrangées sous ou partiellement en-dessous du pont, mais certains peuvent transporter plus de citernes. Le poids des citernes est assez élevé du fait des pressions exercées. Ces navires tendent à être de petite taille et les marchandises transportées excèdent rarement 2000 m³. Les marchandises typiques transportées sont le GPL, l'ammoniac lors de transport côtier ou par cabotage. La **Figure 15** représente ce type de navire.



Fully Pressurized LPG Carrier 7,000 cbm

Figure 15. Un exemple de transporteurs de GPL totalement pressurisé.

- **Les navires semi-pressurisés** : ce sont habituellement des réservoirs cylindriques pour le transport de cargaison à des températures comprises entre -33 °C et -50 °C à une pression de 4 à 7 bars ; les navires sont d'une taille raisonnable avec une capacité de transport de $12\,000\text{ m}^3$; ils ont habituellement quatre à six réservoirs rassemblés en deux groupes de deux ou trois, chaque groupe ayant un réservoir à tribord et un autre à bâbord placés en dessous du pont et quand un troisième est présent, il se trouve juste au dessus du pont sur le long de l'axe centrale du navire. Les parois des citernes sont calorifugées et la vapeur qui se dégage est recueillie dans l'espace avant des citernes et évacuée grâce à une ligne de vapeur qui va jusqu'à un système de reliquéfaction qui refroidit, compresse et condense la vapeur qui est ensuite renvoyée dans les citernes. Les marchandises typiques transportées sont le GPL et d'autres produits chimiques tels que l'ammoniac, le butadiène, le propylène, le chlorure de vinyle. La **figure 16** est une illustration de ce type de navire.



Figure 16. Un exemple d'un transporteur de GPL/NH₃ semi-pressurisé

- **Les navires de GPL totalement réfrigérés** : Ils sont généralement conçus pour transporter de grandes quantités de GPL à pression atmosphérique et à des températures aussi basses que -47 °C et -55 °C en fonction de la teneur en éthane dans le GPL ; ils peuvent également être équipés pour transporter de l'ammoniac. Quatre systèmes différents de conteneurisation sont utilisés sur ces navires bien que le système de cuves prismatiques sans attaches soit le plus utilisé. Du fait des conditions de transport à basses températures, des équipements de calorifugation et de liquéfaction sont présents. Il y a en général trois à six citernes qui prennent tout l'espace du navire et dont la capacité totale va de $5\,000\text{ m}^3$ à $100\,000\text{ m}^3$ ce qui fait que les navires peuvent être assez imposants. La **Figure 17** donne une représentation de ce type de navire.



Figure 17. Un exemple de transporteur de GPL totalement réfrigéré.

- **Les navires d'éthylène** : ils sont construits pour des commerces spécifiques ; la cargaison est transportée entièrement réfrigérée à -104 °C et à la pression atmosphérique. Des équipements de calorifugation et de liquéfaction sont présents. Les citernes utilisées sont indépendantes les unes des autres. Ce type de navire tend à être hautement spécialisé en ayant une capacité de charge de $1\ 000$ à $12\ 000\text{ m}^3$; ils sont aussi souvent équipés pour transporter du GPL. La **Figure 18** donne une représentation de ce type de navire.



Figure 18. Exemple de transporteur de GPL/éthylène semi-pressurisé / totalement réfrigéré.

- **Les navires de GNL** : ils sont construits pour transporter de gros volumes de GNL et sont normalement utilisés pour un projet spécifique qu'ils accompliront jusqu'à la fin de leur contrat de vie. La cargaison est transportée pleinement réfrigérée à -163 °C et à la pression atmosphérique. Des équipements de calorifugation sont présents mais ceux de liquéfaction ne sont pas nécessaires puisque les gaz dégagés sont soit libérés dans l'atmosphère soit utilisés comme système de propulsion. Les navires sont d'une taille importante et leur capacité est de $40\ 000\text{ m}^3$ à $135\ 000\text{ m}^3$ avec quatre à six citernes (soit de type membrane soit de type indépendant). La **Figure 19** donne une représentation de ce type de navire.



Figure 19 (Copyright Cedre). Vue globale de méthaniers (à cuves sphériques sur la gauche, prismatique sur la droite).

Chaque type de structure présente des avantages et des inconvénients, synthétisés dans le **Tableau 3** :

Type de cuve	Sphérique	Système à membrane
Principaux avantages	<p>L'espace vide entre la coque et les cuves est surveillé pour détecter d'éventuelles fuites et la présence de méthane ; il permet également d'accéder à l'extérieur des cuves (et à l'intérieur de la coque) à des fins d'inspection et de réparation, offrant une meilleure garantie d'intégrité. En cas de dommage majeur, il est possible de remplacer les cuves individuellement.</p> <p>Grâce à la séparation entre les cuves et la coque, les cuves présentent une meilleure protection en cas de collision ou d'échouage.</p>	<p>La faible hauteur du pont principal permet de réduire le fardage et d'installer des équipements sur le dessus.</p>
Principaux inconvénients	<p>La forme sphérique impose une hauteur de cuves plus élevée, avec une plus grande charge exercée par le vent.</p>	<p>Le système à membrane est visiblement sensible aux dommages induits par le ballonnement du GNL. La partie structurelle supportant la majorité de la charge étant la coque elle-même, il est théoriquement possible que les pressions importantes induites par le ballonnement endommagent par endroits l'isolation, voire rompent la barrière de confinement. Pour limiter ce risque, les cuves à membranes sont équipées de pièces d'angle et la plupart des sociétés de classification exigent que le niveau de chargement soit, soit supérieur à 70 %, soit inférieur à 10 %.</p> <p>L'absence d'espace vide entre les cuves et la coque interdit toute opération d'inspection et de maintenance.</p>

Tableau 3. Principaux avantages et inconvénients des différentes structures de méthaniers.

2.2. Règles internationales régissant le transport en mer des produits gazeux en vrac

Pour la construction et l'équipement des navires transportant des gaz en vrac, les transporteurs de gaz doivent être en accord avec les différents codes de l'OMI, c'est-à-dire le *Code pour les navires transportant des gaz liquéfiés en vrac* pour les navires construits avant octobre 1976 ; le *Code pour la construction et l'équipement de navires transportant des gaz liquéfiés en vrac* pour les navires construits après octobre 1976 mais avant juillet 1986 et le *Code international pour la construction et l'équipement de navires transportant des gaz liquéfiés en vrac* pour les navires construits après juin 1986. Les deux premiers codes sont connus comme les Codes des gaz de l'OMI alors que le dernier se trouve dans le *Code international de transport de gaz* (IGC). Le Code IGC a été incorporé dans la Convention internationale sur le sauvetage de la vie en mer (SOLAS) en 1974 aussi bien que dans MARPOL 73/78.

Bien qu'il ne soit pas nécessaire d'examiner en détails le contenu de ces Codes, il est intéressant de voir que l'objectif des Codes est de recommander des critères de conception convenables, des standards de construction, ainsi que des mesures de sauvetage (c'est-à-dire protection contre le feu, ventilation) pour les navires transportant des gaz liquéfiés en vrac et d'autres substances listées dans les Codes afin de minimiser, autant que possible, les risques pour le navire, l'équipage et l'environnement.

La possibilité pour un transporteur de gaz d'avoir un accident existe (voir Introduction – **Tableau 1**). Cela peut entraîner des dégâts dans les citernes et ainsi produire un dégagement incontrôlé du produit conduisant à son évaporation et à sa dispersion, et, dans certains cas, pouvant provoquer une cassure de la coque du navire. L'un des principaux buts des Codes est qu'un navire construit suivant les exigences des Codes soit capable de résister aux conséquences dues aux dégâts produits sur la coque du navire par des forces extérieures et de protéger les citernes de dommages causés par des incidents mineurs tels que la collision avec une jetée, un remorqueur ou toutes sortes d'objets et de donner des mesures de protection pour les navires lors de dommages majeurs causés lors d'incidents tels que les collisions et l'échouage (voir **Figure 20**). Finalement, les recommandations sur la construction des transporteurs de gaz offrent une protection non-négligeable pour les navires et ainsi les dégâts subis ne sont pas transmis aux systèmes de conteneurisation.

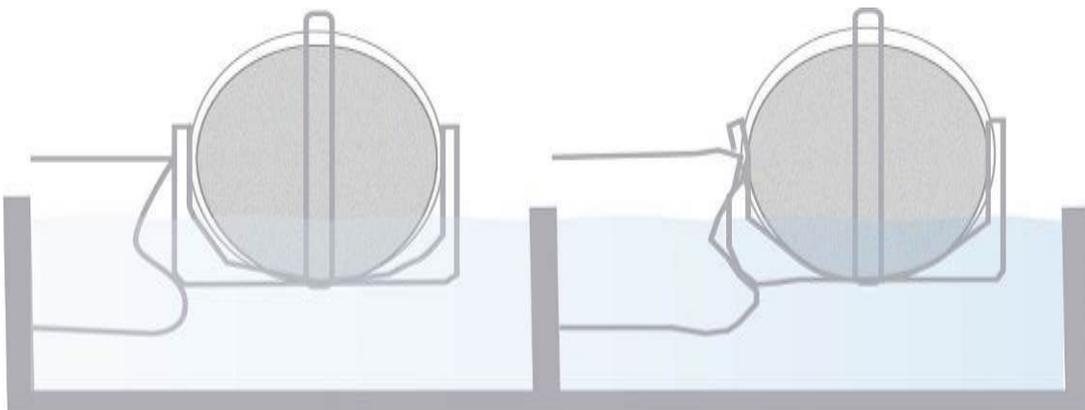


Figure 20 (copyright Cedre). L'un des objectifs des Codes est d'assurer une protection non négligeable contre les dégâts accidentels.

3. Systèmes de propulsion et équipements

3.1. Systèmes de propulsion au gaz

L'OMI a introduit l'Annexe VI de la Convention MARPOL afin de réglementer et limiter la présence des principaux polluants atmosphériques dans les gaz d'échappement des navires, et en particulier les émissions d'oxyde d'azote (NOx), d'oxyde de soufre (SOx) et de particules fines (PM). La révision de l'Annexe VI en 2008 a établi les seuils d'émissions à ne pas dépasser, ainsi que des Zones de contrôle des émissions (ECA) couvrant les eaux jusqu'à 200 milles nautiques au large des côtes américaines et canadiennes, la zone américaine de la mer des Caraïbes, la mer Baltique, la mer du Nord et la Manche britannique, où les émissions polluantes de SOx sont bien plus limitées que dans les autres zones nautiques. La future extension des ECA à la Méditerranée ainsi qu'aux zones côtières de Norvège, du Mexique, du Japon et de Singapour est à l'étude.

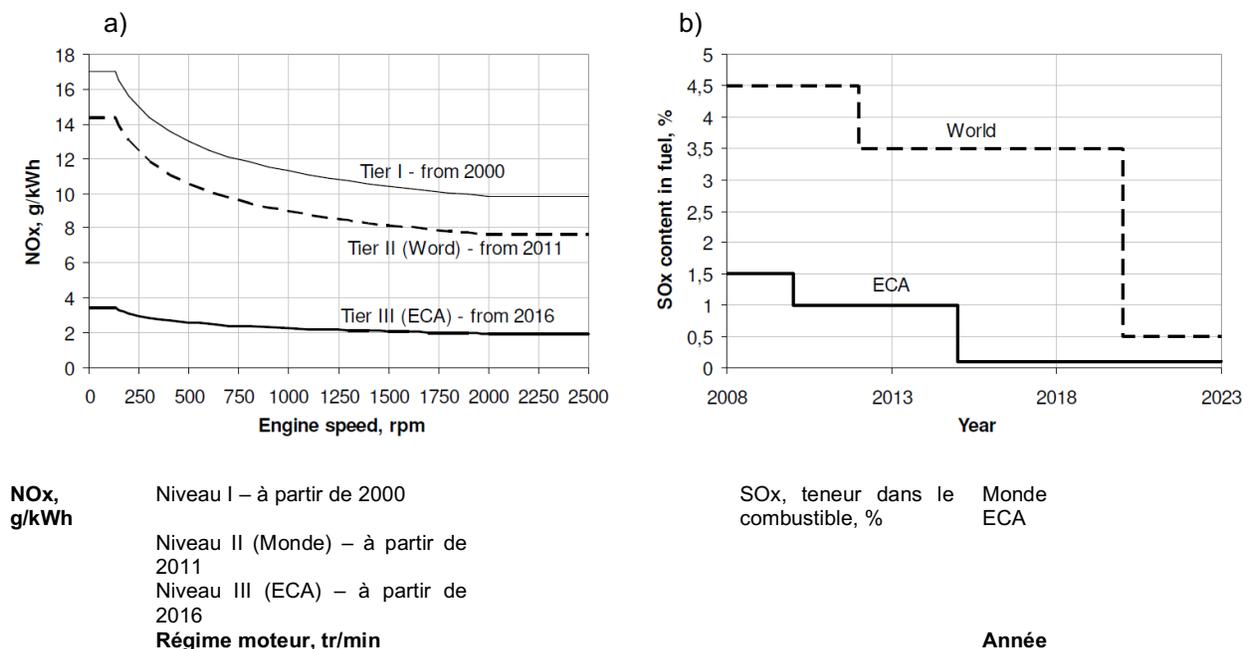


Figure 21. a) Émissions de NOx et, b) Seuils de SOx dans le combustible pour les navires conformément à MARPOL Annexe VI.

Pour satisfaire à ces exigences réglementaires, le gaz naturel peut offrir une alternative intéressante. L'avitaillement en GNL présente plusieurs avantages puisque les échappements contiennent 25 % de CO₂ et 85 % de NOx en moins que le diesel marin et le gas-oil à usage maritime. Il ne contient par ailleurs pas de SOx ni de PM. Les principales caractéristiques des moteurs sont présentées dans le **Tableau 4** :

Type de moteur	Principales caractéristiques	
Bicombustible gaz-diesel	Il existe deux types de moteurs : les moteurs haute pression à cycle diesel et les moteurs basse pression à cycle Otto. Sur les moteurs haute pression, la pression d'alimentation en gaz doit être au minimum de 250-300 bars, alors que 5-7 bars suffisent sur les moteurs basse pression.	
Avec cuve de GNL pour systèmes de gaz combustible, intégrés à la structure de la coque	Ces cuves sont des citernes non autoporteuses, qui consistent exclusivement en une paroi mince (membrane) soutenue à travers une isolation par la structure de la coque adjacente. Grâce à leur ajustabilité à la forme de la coque, le coefficient de remplissage par rapport au volume de la coque est optimisé et peut aller de 100 à 20 000 m ³ . La pression de service maximale admissible (PSMA) est normalement inférieure à 0,25 bar g, mais peut augmenter jusqu'à 0,7 bar g.	
Avec cuve de GNL pour systèmes de gaz combustible, indépendants de la structure de la coque	Cuve de type A	Équipée d'une barrière secondaire complète capable de recueillir les fuites de gaz et de transférer les vapeurs de gaz vers une zone contrôlée. Comparable aux cuves à membrane (intégrées), le coefficient de remplissage par rapport au volume de la coque est légèrement inférieur. La PSMA est de 0,25-0,7 bar g.
	Cuve de type B	Conception similaire aux cuves de type A ; utilisation de tests modèles, d'outils analytiques et de méthodes d'analyse pour déterminer les niveaux de contraintes, l'endurance et les caractéristiques de propagation des fissures. Ainsi, seule une barrière secondaire partielle, sous la forme d'un bac récepteur pour protéger la structure de la cuve contre les basses températures, est nécessaire.
	Cuve de type C	Considérés comme des navires sous pression (PSMA > 0,7 bar g). Les cuves de type C sont souvent cylindriques et affichent un volume limité à ce jour (500-600 m ³), mais des capacités de 2 000 m ³ sont en projet. Les cuves de type C peuvent équiper les nouveaux navires et également être utilisées pour équiper des navires actuels de systèmes au gaz combustible.

Tableau 4 : Les différents types de moteurs et principales caractéristiques des systèmes de propulsion au gaz.

3.2. Autres équipements embarqués

D'autres systèmes équipent généralement le transporteur et peuvent, en cas d'accident, exposer les intervenants et l'environnement à des risques : il s'agit des équipements électriques, des structures d'entreposage de produits chimiques, etc. Ces informations peuvent s'avérer utiles dans l'évaluation des risques.

Parmi les différents équipements présents à bord, il convient de mentionner les systèmes à gaz inertes (par ex. dioxyde de carbone), plus précisément :

- Les générateurs de gaz inertes : ils génèrent un gaz ou un mélange de gaz de telle manière que la teneur en oxygène de l'atmosphère produise des conditions non-inflammables, i.e. que la combustion ne peut pas se poursuivre. De tels gaz peuvent être utilisés pour l'inertage ou le dégazage des cuves de chargement, des collecteurs de cargaison et des espaces vides. Ces systèmes peuvent être utilisés pendant le transport ou avant ou après un rééquipement ou une période d'inspection.

- Système d'extinction d'incendie à libération de gaz. Ce type de système se déclenche automatiquement ou manuellement et il convient de tenir compte des risques associés aux gaz inertes.

Pour tous les systèmes impliquant des gaz inertes, il est essentiel de respecter scrupuleusement les procédures établies, aussi bien pour le personnel de bord que pour les intervenants, car les risques d'asphyxie et d'anoxie sont très rapidement présents, sans signes précurseurs (gaz invisibles, inodores).

4. Opérations de chargement/déchargement

4.1. Chargement

Pour procéder de manière sûre et efficace au chargement, il convient de tenir compte d'un certain nombre de critères importants en termes d'efficacité et de sécurité.

- Considérations opérationnelles

Le débit des tuyaux ou bras de chargement a une influence sur le temps nécessaire au chargement et peut, de ce fait, présenter un intérêt économique. Les dimensions des tuyaux et la possibilité de les déplacer ou de les supporter dans un berceau sont déterminantes pour le chargement de différents types et différentes tailles de navires. Le principal intérêt des bras de chargement réside dans leur flexibilité : ils peuvent s'adapter aux mouvements dans toutes les directions du navire pendant les opérations de chargement ou de déchargement, en particulier à l'amplitude des marées. Il est à noter qu'il est possible d'utiliser deux bras, un pour le chargement et un pour le retour de vapeur. Par ailleurs, pour des raisons de sécurité et au regard des dimensions en jeu, ils sont commandés à distance par des systèmes hydrauliques. La **Figure 22** illustre un exemple :

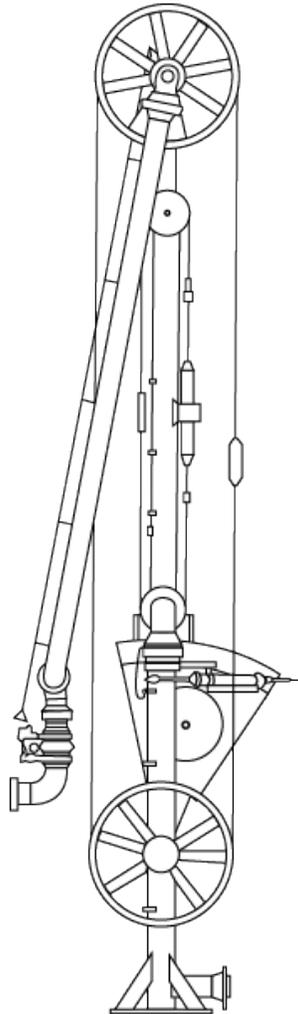


Figure 22. Exemple de bras de chargement de méthaneier.

Le déchargement de GNL constitue un autre défi à relever, l'opération étant soumise à des spécifications plus drastiques que le chargement à terre. Différents types de structures peuvent être concernées, essentiellement entre unités flottantes, comme les plates-formes flottantes d'extraction, de stockage et de

déchargement (FPSO) et les unités flottantes de stockage et de regazéification (FSRU). Un transfert pouvant durer plusieurs heures, voire plusieurs dizaines d'heures, le système de déchargement doit rester efficace et sûr tout au long de l'opération. Les structures doivent donc être conçues pour endurer des conditions hostiles (vagues hautes par exemple), et offrir une zone d'amarrage plus large pour les opérations de déchargement.

Les systèmes de couplage rapide (QCDC - Quick Connect/Disconnect Coupler) facilitent le raccordement entre le bras de chargement et le manifold du navire. Un système hydraulique, commandé à distance par du personnel qualifié, garantit un couplage efficace pour le déchargement.

Différentes configurations peuvent être envisagées pour le déchargement entre une unité flottante de stockage de GNL (FLNG) et un méthanier, par exemple en tandem (**Figure 23**) ou en côte à côte (**Figure 24**).

La configuration de déchargement en tandem est préconisée dans les environnements difficiles, avec l'appui d'un système de positionnement dynamique. L'écart entre les deux navires permet, pendant les phases de couplage et de chargement, de poursuivre les opérations en présence de vagues pouvant atteindre environ 5 m. Dans le cas d'une configuration poupe-à-étrave, une flotte dédiée de méthaniers avec système de chargement par l'étrave est requise.



Figure 23 (Copyright Cedre). Déchargement de GNL en tandem. Bobine (orange) sur laquelle sont enroulées les canalisations souples pour le transfert.

Malgré les contraintes (configuration imposant un environnement relativement calme/facile pour le déchargement), la configuration en côte à côte semble être la méthode privilégiée.

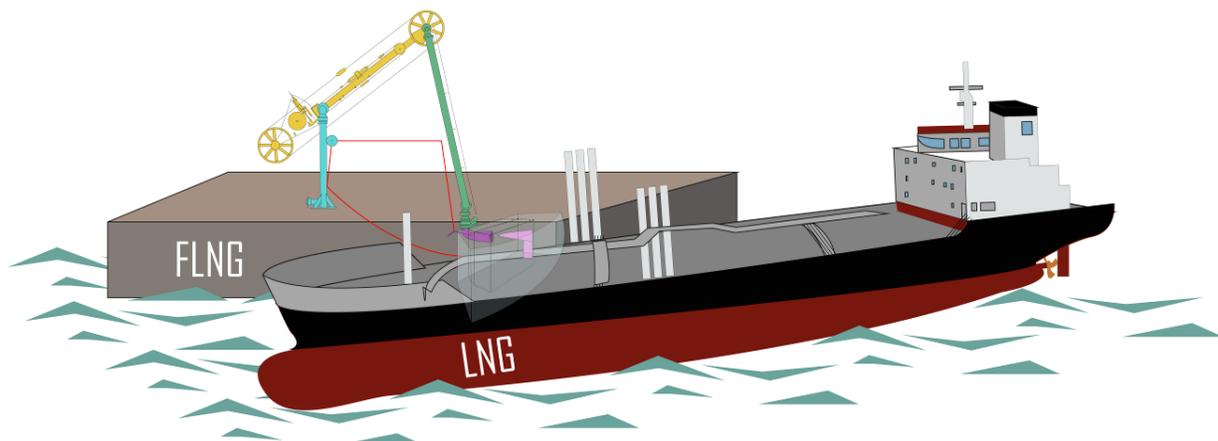


Figure 24. Déchargement de GNL en côte à côte.

- Considérations de sécurité

Il est possible d'utiliser des tuyaux en caoutchouc ou composite pour le GPL dans la mesure où ces matériaux sont compatibles avec le produit transféré et conformes aux normes locales. Les canalisations de GNL sont constituées d'un alliage spécial à bas point de fusion, présentant d'excellentes propriétés de contraction et dilatation thermiques, ou de préférence d'un matériau composite. Le système hydraulique est raccordé à un système de déverrouillage d'urgence, déclenché automatiquement en cas d'urgence pour déconnecter le bras de chargement du navire. Le système de raccord rapide est doté d'une vanne de chaque côté du point de déconnexion pour minimiser les déversements.

Le système de déverrouillage d'urgence (ERS), qui permet de déconnecter rapidement le bras de chargement du navire et de limiter les rejets de gaz, peut être déclenché :

- automatiquement, lorsque le bras atteint la limite spécifiée ; généralement, des alarmes sonores retentissent ;
- manuellement, depuis le tableau de commande central à terre ;
- manuellement, en utilisant des vannes hydrauliques en cas de perte de l'alimentation électrique à terre.

Les brides sont généralement dotées d'un raccord articulé, un en haut et en bas. Les bras de chargement sont équipés de crépines pour filtrer les débris véhiculés dans les tuyaux et les bras de chargement. En raison du risque d'arc électrique au niveau du manifold lors des phases de couplage et de déconnexion des tuyaux de raccordement à terre ou des bras de chargement, les flexibles de chargement et bras métalliques sont dotés d'une bride isolante. En ce qui concerne les flexibles, une longueur uniquement de gaine non-conductrice sans liaison interne suffit : l'insertion d'une telle résistance bloque complètement le flux de courant de fuite et l'ensemble du système reste relié à la terre, soit au navire soit au rivage. Outre tous ces équipements, des inspections sont régulièrement organisées pour tester l'intégrité des matériaux, la résistance à la pression, l'élongation des canalisations, la continuité électrique et tout autre aspect important.

En ce qui concerne les plates-formes offshore, un guide-câble en acier est maintenu sous tension pendant le chargement (câble rouge sur les **Figures 23 et 24**) afin de conserver une zone d'amarrage adaptée. Toutefois, lorsque le déverrouillage d'urgence est enclenché, le bras de chargement se rétracte automatiquement pour éviter tout risque d'interférence avec le manifold et les pièces autour.

4.2. Soutage de combustible

Comme le présente le **Tableau 5**, différentes méthodes de soutage de GNL sont envisageables :

Méthode de soutage de GNL	Description	Avantage	Inconvénient
Camion-citerne à navire (TTS)	Le camion de GNL est raccordé via un tuyau flexible au navire stationné à quai.	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne solution d'approvisionnement qui exige des investissements relativement faibles. - Flexibilité opérationnelle, les opérations de soutage étant possibles en différents points du même port, possibilité de servir différents navires dans différentes conditions (possibilité d'ajuster les volumes). - Possibilité de s'adapter à différentes prescriptions en matière de sécurité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Opération fortement contrainte par la capacité de transfert du camion (volume et débit). - Demande en GNL faible ou modérée. - Impact important sur les autres opérations concernant les passagers et/ou le chargement. - Mouvement limité au niveau du quai, essentiellement contraint par la

			<p>présence d'un ou plusieurs camions-citernes.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Exposition aux éventuelles limitations de la circulation routière (autorisations/permis, limitations physiques, trafic, etc.).
Navire à navire (STS)	<p>Les navires servis sont avitaillés par un autre navire, un bateau ou une barge, amarré sur le côté opposé du quai. La canalisation de distribution de GNL est gérée par le navire de soutage.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'utiliser des barges et navires maritimes. - Possibilité de procéder à l'avitaillement au port et en mer. - Possibilité d'avitailer dans le port pendant le chargement/déchargement. - Option intéressante pour les navires restant relativement peu de temps au port. 	<ul style="list-style-type: none"> - Solution dépendant du trafic des navires. - Dépendant des conditions météorologiques. - Nécessité d'équiper le port de défenses et lignes d'amarrage pour les opérations de soutage. - Limitation des possibilités de transbordements et stockage en fonction des spécifications du navire.
Terminal (port) à navire (PTS)	<p>Le GNL est soit avitaillé directement depuis une petite unité de stockage (citerne de GNL), une petite station ou un terminal d'importation/exportation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Solution intéressante pour les ports qui bénéficient d'une demande en avitaillement stable et prévisible sur le long terme. - Possibilité de procéder au soutage à quai ou au niveau de l'embarcadère. - Soutage à l'aide d'une ligne cryogénique ou d'un bras de rechargement. - Possibilité d'avitailer d'autres moyens de transport. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps et coûts (rotation des bras de chargement et lignes cryogéniques).
Conteneur ISO à navire	<p>Citernes pressurisées dans un châssis ISO qui permet de transporter le GNL sur la chaîne logistique. ISO 20 pieds : 20,5 m³, ISO 40 pieds : 43,5 m³. NB : les conteneurs ISO embarqués pour être raccordés à bord de navires fonctionnant au GNL ne sont pas couverts (puisque'ils le sont par le Code IGF).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité. - Modularité et commodité des conteneurs de GNL aux normes ISO. 	<ul style="list-style-type: none"> - Si la citerne n'est pas froide, i.e. température du gaz d'évaporation (BOG) <120 °C, l'avitaillement en GNL génère un excès de BOG.

Tableau 5 : Les différentes méthodes de soutage en GNL combustible - description, avantages et inconvénients.

CHAPITRE 3. Risques et mesures de lutte contre un dégagement accidentel de gaz

Dans le contexte d'urgence en mer, le risque peut être défini comme une caractéristique ou une action dont un certain nombre de conséquences défavorables sont possibles, même si, ni ces conséquences ni la chaîne d'événements qui y mèneront, ne peuvent être déterminés précisément. Aussi, outre le fait de comprendre la manière dont les produits gazeux sont transportés en mer, les connaissances sur lesquelles se basent la préparation et la lutte contre un dégagement accidentel de produits gazeux, sont une prise en compte des événements décrivant des scénarios d'accidents hypothétiques mais crédibles ainsi que l'évaluation des risques liés au produit.

1. Scénarios d'accidents

Les objectifs d'un tel exercice sont d'aider les personnes responsables des prises de décision, impliqués dans les activités liées à la préparation à la lutte, à apprécier l'enchaînement probable des événements menant à un dégagement gazeux ainsi que les effets néfastes associés et les mesures de lutte à prendre. Les paragraphes suivants résument certains de ces types d'événements.

1.1. Marchandises gazeuses dangereuses sous emballage

Pour des marchandises dangereuses gazeuses sous emballage, deux scénarios sont décrits, chacun faisant l'hypothèse que le dégagement de gaz ne se fera pas dans des conditions qui modifient les températures interne et/ou externe des conteneurs, comme cela pourrait être le cas lors d'un feu.

1.1.1. Scénario # 1 - gaz comprimés

Les gaz qui sont comprimés à de hautes pressions et qui sont contenus dans un réceptacle tel qu'une bouteille de gaz mais qui n'ont pas été liquéfiés s'évacueront d'une fuite ou toute autre petite ouverture à très grande vitesse. A un moment donné, la pression interne atteindra la pression atmosphérique et le dégagement violent cessera ou s'abaissera à un taux proportionnel à la quantité de chaleur pénétrant dans le réceptacle depuis l'extérieur.

1.1.2. Scénario # 2 - gaz comprimés liquéfiés

Les gaz transportés sous forme de gaz comprimés liquéfiés sont typiquement contenus dans des réceptacles pressurisés conçus pour supporter une certaine pression ; ce qui peut se produire en cas de fuite dépend essentiellement du lieu de la défectuosité :

- i. Si le perçage se produit dans la tête (zone de vidange) au dessus du liquide, le gaz va s'évacuer à grande vitesse, éventuellement en créant quelques gouttelettes ; au fur et à mesure que la température augmente et atteint le point d'ébullition du liquide cryogénique, le liquide se transforme en vapeur en prenant la quantité de chaleur nécessaire (chaleur latente pour passer de l'état liquide à l'état gaz : changement de vapeur) aux alentours immédiats ; le réceptacle peut devenir très froid voire même geler autour de la zone de fuite à cause du refroidissement thermodynamique ; bien que la vitesse d'évacuation diminue, ceci peut perdurer jusqu'à ce qu'il n'y ait plus du tout de produit à l'intérieur du conteneur ;
- ii. Si le perçage se produit dans la zone liquide, le liquide peut s'évacuer grâce à la pression dans la tête au dessus du liquide qui le force à sortir ; de grandes quantités de liquide peuvent se transformer en vapeur à cause des températures plus chaudes à l'extérieur ; ceci pouvant résulter en la formation d'un brouillard aérosol (vapeur mélangée à de petites gouttes de liquide) ; si le liquide cryogénique peut atteindre une surface, il aura tendance à former une flaque susceptible de s'évaporer rapidement et, comme dans le cas précédent, prendre la chaleur

nécessaire aux alentours immédiats, causant éventuellement des fractures du matériau avec lequel il est entré en contact si celui-ci n'est pas conçu pour résister à de basses températures.

1.2. Produits gazeux en vrac

Décrire des scénarios d'accidents impliquant des produits gazeux transportés en vrac est plus compliqué que dans le cas des marchandises dangereuses sous emballage. En effet, tout scénario impliquerait d'inclure tous les aspects de l'accident maritime et non pas de traiter uniquement la marchandise comme une entité séparée du reste du navire.

1.2.1. Scénario #1 – collision

Une collision sévère peut causer des dégâts aux soutes renfermant la cargaison, ceci pouvant entraîner un dégagement incontrôlé du produit. Les événements faisant suite à une collision vont dépendre essentiellement d'un certain nombre de facteurs.

- Type et taille des navires ;
- Vitesse des navires entrant en collision ;
- Lieux des impacts dans la coque et localisation de la cargaison par rapport à la ligne de flottaison ;
- Géométrie de rupture ;
- Présence d'une double enveloppe ;
- Pression dans les soutes de cargaison ;
- Angle d'impact.

Par exemple, des impacts au-dessus de la ligne de flottaison d'un navire à double coque (ex. : transporteur de GNL) entraîneront des fractures dans les zones du navire qui sont en contact avec la cargaison réfrigérée. Le contact de cette cargaison froide avec la structure plus chaude du navire entraînera une vaporisation rapide. Tout espace clos adjacent recevant des vapeurs du produit pourrait inhiber des dégagements ultérieurs du fait de l'augmentation de la pression de vapeur dans cet espace confiné. En supposant qu'il n'y a pas de propagation de la rupture de la coque sous la ligne de flottaison, la cargaison liquide pourrait ne pas se déverser en mer. La cargaison qui s'échapperait en mer pourrait se répandre, se vaporiser et se dissoudre en fonction de ses caractéristiques. Un dégagement prolongé de vapeur à partir d'une brèche d'une soute pourrait également se produire.

Des brèches sous la ligne de flottaison entraîneront probablement un déversement initial de la cargaison jusqu'à ce que la ligne de flottaison et le niveau de remplissage de la cargaison dans la soute s'équilibrent, suivi par une alternance de déversement de cargaison et de pénétration d'eau de mer dans la soute endommagée, et finalement l'ensemble de la cargaison présente dans la soute sera perdue.

Une conséquence éventuelle des collisions et des dégagements de cargaison y étant associés est l'inflammation. Un transporteur de gaz dans son ensemble ou certaines zones uniquement peuvent être prises, par suite de l'impact, dans un nuage de vapeurs, du fait de la rapide vaporisation du gaz liquéfié qui s'échappe. Même si l'inflammation ne se produit pas lors de l'impact, la vaporisation de la cargaison dégagée peut néanmoins toujours contribuer à maintenir les conditions requises pour l'inflammation au voisinage de l'incident bien que la menace puisse être momentanément écartée du fait de la concentration trop riche du gaz. Dans les conditions d'inflammabilité potentielle, le transporteur de gaz qui a subi l'impact n'est pas le seul à être en danger mais également le navire l'ayant percuté qui peut alors être source d'inflammation si le nuage de vapeurs se dirige dans sa direction.

1.2.2. Scénario #2 – échouage

Les carènes à double paroi qui se rencontrent dans la plupart des transporteurs de gaz fournissent une protection dans le cas d'un échouage. Cependant, il peut entraîner une accumulation d'eau dans certains compartiments. Si l'échouage entraîne une rupture majeure du réservoir, on observera un déversement initial de la cargaison jusqu'à l'équilibre des niveaux par rapport à la ligne de flottaison (cargaison / eau). Il pourra également y avoir formation de glace et de vapeurs.

1.2.3. Scénario #3 – éperonnage

Ce scénario couvre des situations où des transporteurs de gaz sont impliqués dans des impacts de faible énergie tels que heurts de jetées ou d'aides à la navigation non-mobiles comme des balises.

Il est probable que la percussio n de balises de navigation se produise à vitesse élevée. Néanmoins, les dégâts causés au navire seraient probablement superficiels et ne résultant vraisemblablement pas en une perte de cargaison. Cependant, de tels objets peuvent causer des dégâts au gouvernail ou aux hélices et entraîner des pertes de contrôle de la direction pouvant éventuellement conduire à une collision ou un échouage.

Les incidents résultant de manoeuvres d'accostage risquent peu d'entraîner la perte de la totalité de la cargaison car l'énergie de l'impact est généralement trop faible pour causer des dégâts tels que des ruptures de réservoirs. Cependant, ces incidents mineurs peuvent causer des dégâts au réseau de tuyauterie du pont et aux vannes qui, bien que n'occasionnant pas directement de perte immédiate de la cargaison, peuvent donner lieu à des pertes durant le déchargement. De plus, toute fuite de gaz a tendance à s'accumuler au niveau des ponts puisque la plupart des vapeurs provenant de cargaisons liquéfiées sont plus lourdes que l'air. Celles-ci peuvent entrer par les portes et ouvertures situées à proximité des ponts de cargaison et pénétrer dans la chambre des machines et les bouches d'aération.

1.2.4. Scénario #4 - incendie à bord d'un transporteur de gaz

Les incendies qui se déclarent dans la zone des machines ou des cabines risquent peu de se propager à la cargaison en raison de la nature hermétique et sans oxygène du système de transport.

Les feux ou explosions qui se déclarent dans la chambre de compression, qui est habituellement située sur le pont à l'intérieur de la zone de cargaison, peuvent entraîner des dégâts aux dômes des réservoirs adjacents et aux lignes d'alimentation en gaz et éventuellement conduire à l'inflammation des gaz qui se sont dégagés au niveau des points de rupture.

1.2.5. Scénario #5 - déversement résultant d'une déconnexion accidentelle, d'une fuite de pipeline ou d'un surremplissage des réservoirs

Des conditions météorologiques inattendues telles que de forts vents ou les conséquences du passage d'un navire à vitesse excessive près d'un transporteur de gaz qui est accosté peuvent induire des tensions supplémentaires sur les amarres et les défenses jusqu'à causer éventuellement des dégâts aux lignes de chargement de la cargaison. Bien que des systèmes automatiques de coupure d'urgence se déclenchent si l'opération de transfert devient dangereuse, une faible quantité de gaz liquéfié peut toujours être déversée avant que le transfert ne soit interrompu. Dans ce cas, le liquide peut se déverser par-dessus bord et s'accumuler à la surface de l'eau entre le navire et le quai. Si le navire est accosté à un quai construit sur pilotis, l'espace entre ces pilotis permet l'évacuation du liquide. En revanche, si le quai est un mur continu, le liquide reste confiné entre le navire et le quai. Si les défenses sont positionnées au niveau de la surface de l'eau, elles auront un effet de barrage sur cette accumulation de produit (cf. **Figure 25**). Si le produit s'enflamme, et en supposant que le système d'arrêt de l'opération de transfert se soit déclenché, le feu peut être intense mais sera de courte durée.



Figure 25 (Copyright Cedre). Illustration montrant l'effet de barrage d'un système de défenses fixes positionnées le long de la coque du navire.

Le surremplissage de réservoirs ou un problème de tuyauterie (y compris les joints, etc.) peut entraîner un déversement sur le pont. Les conséquences peuvent être mineures si la fuite est détectée rapidement et des actions correctives prises immédiatement. Cependant une fracture nette des structures en acier adjacentes et une accumulation de gaz liquéfié dans les espaces vides entraînant une vaporisation ultérieure peuvent toujours se produire.

Dans chacun des cas, le déversement d'une cargaison toxique entraînera des risques pour la santé du personnel aux abords immédiats de l'incident.

1.3. Produits gazeux dans les pipelines

Les conséquences des accidents en cas de fuite ou de rupture totale de pipeline dépendent de nombreux facteurs, notamment :

- Le type de pipeline : aérien/sous-marin,
- Les conditions de transport : température, pression,
- La nature du gaz,
- L'origine de l'accident : usure du pipeline, défauts, fatigue du métal, collision, etc.

Il est à noter que les pipelines utilisés à basses températures peuvent présenter un risque élevé, notamment lorsqu'ils font partie d'installations industrielles, en particulier de terminaux d'exportation/importation impliquant des processus de liquéfaction/regazéification. En cas de rejets sous-marins à proximité de plates-formes offshore, une explosion, entraînant la formation d'un panache de bulles de gaz, peut mettre à mal la flottabilité des installations.

Un accident sur un pipeline peut également entraîner la formation d'un nuage à la surface de l'eau avec le risque potentiel d'une explosion du nuage de vapeur, de feu instantané et de feu de nappe.

2. Risques liés aux dégagements gazeux

De façon générale, les risques rencontrés lors de la lutte contre un dégagement accidentel d'une substance gazeuse peuvent être liés à :

- l'inflammabilité ;
- la toxicité ;
- la réactivité ;

- la corrosivité ;
- des brûlures par le froid ;
- une combinaison de ces différentes propriétés.

2.1. Détection de gaz dans l'atmosphère

Il est essentiel que les premiers intervenants puissent rapidement évaluer les risques potentiels et apprendre en temps réel, sans aucune connaissance préalable des risques potentiellement mortels. Des instruments adaptés sont donc systématiquement utilisés par chaque intervenant pour surveiller les taux de concentration (toxicité et explosivité/inflammabilité). Ces équipements sont d'autant plus importants lorsqu'ils sont amenés à intervenir sans connaissance préalable des possibles risques mortels. Généralement, les intervenants sont équipés d'un détecteur 4 gaz pour prévenir :

- les risques d'anoxie/asphyxie avec détection des concentrations en oxygène (O₂),
- les risques de toxicité avec détection des taux de sulfure d'hydrogène (H₂S), typiquement détectés dans l'industrie du pétrole et du gaz, et de monoxyde de carbone (CO),
- les risques d'atmosphère explosive, avec la Limite inférieure d'explosivité, reposant sur la mesure de gaz d'hydrocarbures en pourcentage par volume de l'atmosphère totale, en plus des gaz les plus dangereux potentiellement présents.



Figure 26 (Copyright SOBEGI). Détecteur 4 gaz.

Le **Tableau 6** présente différents principes de détection :

Type de détection	Principales caractéristiques
Appareils de surveillance des gaz inflammables (explosimètres)	L'élément de détection de ces appareils repose sur un pellistor inflammable résistant aux poisons. Le pellistor ayant besoin d'une teneur minimum en oxygène (11 % en volume) pour fonctionner efficacement, il ne doit pas être utilisé pour la mesure des gaz d'hydrocarbures en atmosphère inerte.
Détecteurs de gaz à filament chauffé non-catalytique (tankscopes)	L'élément de détection est un filament chaud non-catalytique. La composition du gaz environnant détermine le taux de déperdition calorifique du filament, et donc sa température et sa résistance.

Interféromètres (mesure de l'indice de réfraction)	Ce type de détecteur utilise un dispositif optique reposant sur la différence entre les indices de réfraction de l'échantillon de gaz et de l'air. L'instrument est normalement calibré pour un mélange donné de gaz d'hydrocarbures. Dans la mesure où l'utilisation de l'instrument est effectivement limitée à ce mélange calibré, il fournit des mesures précises des concentrations en gaz.
Instruments à infrarouge (IR)	À partir d'une mesure reposant sur un rayonnement infrarouge, le détecteur indique la concentration d'hydrocarbures dans l'atmosphère.
 Tubes détecteurs d'agents chimiques	Chaque tube à usage unique permet des mesures à des concentrations très faibles de gaz toxiques à bord des navires-citernes, sous réserve de l'absence de gaz interférent.
Capteurs électrochimiques	Ces dispositifs mesurent la concentration d'un gaz cible par oxydation ou réduction sur une électrode et mesure du courant résultant. La présence de gaz interférent peut modifier la précision.

Tableau 6. Exemples de principes de détection et principales caractéristiques.

2.2. EPI pour les intervenants

Pour intervenir en toute sécurité, les équipes d'intervention doivent disposer d'équipements adéquats. Les équipements spécifiquement requis sont à adapter en fonction de l'environnement et de l'évaluation des risques, essentiellement en tenant compte de la voie d'exposition du corps humain. Ils doivent être choisis avec soin pour permettre à la fois une mobilité suffisante et une protection adaptée. La **Figure 27** présente un exemple d'EPI.

Équipement respiratoire :

- Pièces faciales,
- Pression d'air dans les pièces faciales,
- Appareils respiratoires,
- Appareils respiratoires filtrants,
- Appareils respiratoires à adduction d'air,
- Facteurs de protection des équipements respiratoires,
- Problèmes fréquents liés au port d'équipements respiratoires,
- Entretien et entreposage.

Équipement non-respiratoire :

- Protection de la tête et du visage,
- Protection des mains,
- Protection des pieds,
- Protection du corps.

Tout personnel utilisant des équipements de protection doit connaître à la fois son utilisation et ses limites. Le REMPEC a préparé un guide spécial, intitulé « Équipements de protection personnelle et appareils de contrôle en cas d'accident chimique maritime » qui peut servir de source de référence.



Figure 27 (Copyright Cedre). Exemple d'EPI pendant la phase de décontamination.

2.3. Équipement d'intervention

En cas de rejets de gaz à la suite d'un accident en mer, il convient de déployer des équipements et des stratégies d'intervention adaptés. Voici quelques exemples.

- Étanchéisation d'une vanne ou bride.
- Rideau d'eau : un ou plusieurs rideaux d'eau peuvent être déployés pour créer une barrière et stopper ou limiter la dispersion d'un gaz toxique ou explosif vers une cible ou une zone sensible. Ce type de mesure peut également être utilisé pour limiter préventivement la radiation en cas d'incendie.
- Ventilateur : ce type d'équipement peut être utilisé pour expulser les gaz d'une zone confinée ou diluer un gaz dans une zone sensible.

Le *Guide pratique pour les déversements de produits chimiques en mer* publié par le REMPEC offre une source d'informations utiles en la matière.

2.4. Risques d'incendie

Une fuite accidentelle impliquant un produit gazeux peut être à l'origine de risques d'incendie. L'aptitude d'un gaz à s'enflammer, soit spontanément par exposition à de hautes températures soit au contact d'une étincelle ou d'une flamme, est appelé **potentiel d'inflammabilité du gaz (Figure 28)**.

Certaines mesures, citées par la littérature scientifique et technique, pouvant servir à un intervenant pour évaluer le potentiel d'inflammabilité d'un gaz, sont :

- Le **point éclair** qui est la plus basse température à laquelle la substance peut s'enflammer et brûler lorsqu'elle est mise au contact d'une source d'inflammation (p.e. flamme ou étincelle) sans combustion auto-entretenue.
- Le **point d'inflammation** qui est la plus basse température à laquelle une substance, une fois enflammée, continuera à brûler sans addition aucune de source de chaleur (ces températures ne sont disponibles dans la littérature que pour relativement peu de substances).

- Le **domaine d'inflammabilité** qui donne une mesure de la concentration en gaz (ou vapeur) inflammable dans l'air nécessaire pour que la combustion ait lieu. C'est la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure d'inflammabilité (ou d'explosivité). La Limite Inférieure d'Inflammabilité (ou d'Explosivité) (LII ou LIE) est la concentration minimale de gaz dans l'air qui permettra de créer et de propager une flamme. Elle s'exprime généralement en pourcentage volumique de gaz dans l'air. La Limite Supérieure d'Explosivité (LSE ou LSI) est, quant à elle, la concentration maximale de gaz dans l'air qui permettra de créer et de propager une flamme. Si le mélange air-gaz a une composition inférieure à la LIE ou supérieure à la LSE, il est dit respectivement « trop pauvre » ou « trop riche ». Si la composition est comprise entre ces deux limites, des incendies ou explosions peuvent se déclarer et le mélange est dit être dans le domaine d'inflammabilité (voir **figure 28**).

Les mots « inflammabilité » et « explosion » sont utilisés indifféremment ici, la raison de ceci est qu'une concentration donnée en gaz qui brûlera dans l'air peut tout aussi bien exploser si, tout du moins, les conditions adéquates sont réunies, en particulier, lorsque les produits de combustion du gaz (chaleur produite incluse) ne sont pas retirés de la zone réactive.

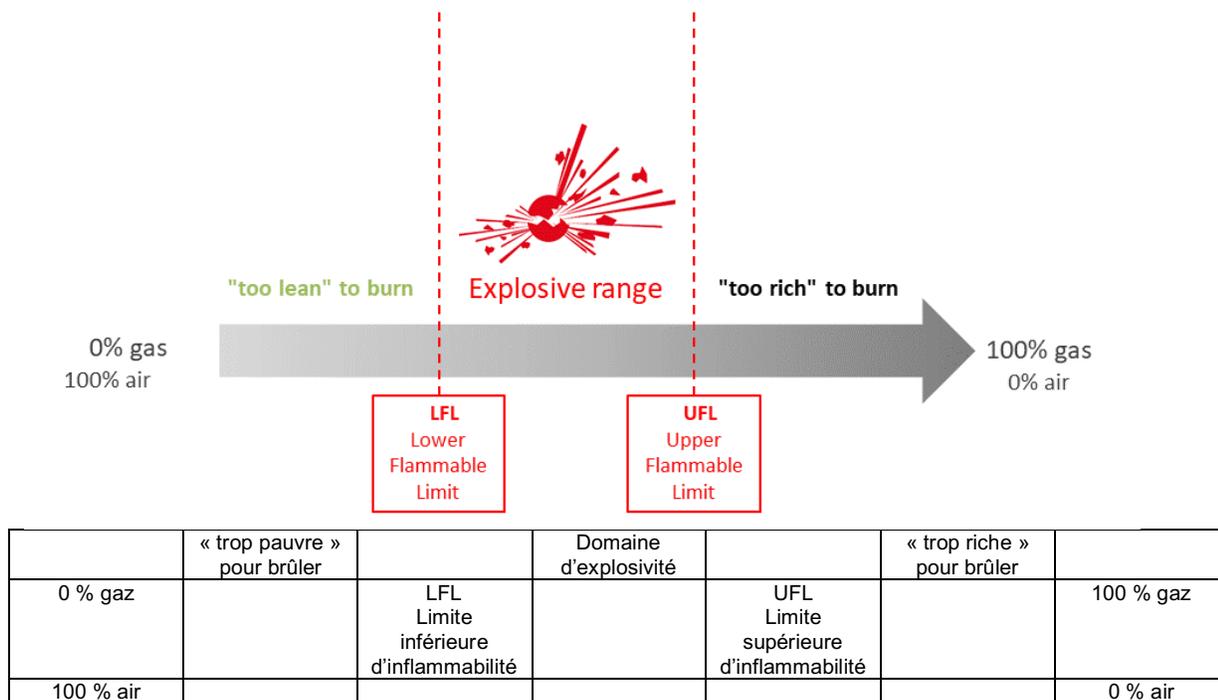


Figure 28. Domaine d'inflammabilité suite à déversement de gaz liquéfié.

- La **température d'auto-ignition** qui est la température d'inflammation nécessaire pour créer une auto-combustion en l'absence de toute source d'inflammation.

Les propriétés d'inflammabilité de certains gaz, qui sont habituellement transportés en mer, sont présentées dans l'**Annexe 2**.

2.4.1. Types d'incendies

Certains types d'incendie liés à des dégagements gazeux (ou de vapeur) sont :

- des **jets de flammes** qui peuvent se former lorsque le gaz (ou la vapeur) dégagé rencontre une source d'inflammation et que le rejet s'effectue à grande vitesse se mélangeant ainsi à l'air qu'il entraîne.
- des **boules de feu** qui peuvent se former suite à une explosion de vapeur de liquide bouillant (BLEVE : Boiling liquid expanding vapour explosion).
- des **incendies de nuages de vapeur** qui peuvent se former lorsqu'un nuage ou un panache de gaz (ou vapeur) inflammable rencontre une source d'inflammation alors que ce gaz est à une concentration le plaçant dans sa zone d'inflammabilité. L'incendie peut remonter jusqu'à la source de la fuite engouffrant tout sur son passage.

2.4.2. Sources d'ignition

Suite à un dégagement dans l'atmosphère d'un produit gazeux inflammable, il est essentiel de contrôler toutes les sources d'ignition durant l'intervention car, même s'il est peu probable qu'elles déclenchent un incendie, leurs dangers potentiels est bien souvent sous-estimés. Les sources d'ignition incluent :

- le fait de fumer (ainsi que l'usage de briquets ou d'allumettes)
- les lampes torche ou de poche
- les outils de sécurité qui, bien que pouvant être "anti-étincelles", peuvent comporter des fragments de métaux (provenant des objets ou machines manipulés avec ces outils)
- les appareils générant de l'électricité statique tels que les hélicoptères utilisés pour transporter le personnel d'intervention depuis ou sur le navire endommagé.
- les vêtements personnels tels que les chaussures avec boucles métalliques.

2.4.3. Risques liés aux produits de combustion

Un feu n'est autre qu'un des "produit" de la réaction chimique entre un gaz inflammable et l'oxygène (de l'air). Cette réaction est connue sous le nom de "combustion". Les 3 principaux produits de combustion sont :

- les flammes et la chaleur qui donnent naissance à des radiations thermiques causant des brûlures à différents degrés. Une brûlure au 1^{er} degré affecte l'épiderme, une brûlure au 2nd degré se traduit par l'apparition de cloques et atteint des couches plus profondes de la peau, une brûlure au 3^{ième} degré touche encore plus profondément la peau et affecte même les terminaisons nerveuses.
- La fumée qui est constituée de particules en suspension dans l'air, principalement de nature carbonée, résultant de la combustion incomplète de la matière et qui cause des irritations aux yeux et aux voies respiratoires. Elle peut même, dans certains cas, entraîner la mort.
- Les gaz de combustion qui sont les produits de la combustion proprement dite. Ils se composent toujours de dioxyde de carbone et, en fonction de la quantité d'oxygène disponible, de monoxyde de carbone. Des composés irritants, corrosifs et toxiques, tels que le chlorure d'hydrogène et le phosgène, peuvent être générés en fonction de la composition chimique du produit brûlé.

2.5. Risques de toxicité

La **toxicité** peut être définie comme étant une propriété d'une substance pouvant causer des dommages aux tissus humains, altérer le fonctionnement du système nerveux central, entraîner de graves maladies ou même la mort en cas d'inhalation, d'ingestion ou d'absorption (ou injection) cutanée. Il est également important de faire la distinction entre **les effets aigus** d'une substance qui apparaissent immédiatement après l'exposition et **les effets chroniques** qui, eux, apparaissent et restent visibles bien après l'exposition.

2.5.1. Facteurs affectant le potentiel de toxicité

Il ne fait aucun doute que le dégagement d'un produit gazeux peut présenter une menace toxicologique et, durant un rejet atmosphérique, l'attention doit être immédiatement portée à la protection de la santé et de la vie humaine. Les dangers toxicologiques encourus suite à un dégagement dépendent :

- de la quantité de produit déversé
- des propriétés toxicologiques de la substance
- du type d'exposition
- du temps d'exposition
- des conditions de santé de chacune des personnes exposées

Deux types communs d'exposition faisant suite à un dégagement atmosphérique de gaz (ou de vapeur) sont l'**inhalation** et l'**absorption**.

L'inhalation d'un gaz (ou d'une vapeur) toxique peut :

- affecter l'odorat
- causer des étourdissements
- causer des migraines
- irriter les yeux
- entraîner des évanouissements
- causer des dommages internes aux organes vitaux
- provoquer des arrêts respiratoires
- entraîner la mort

L'absorption d'un gaz (ou d'une vapeur) toxique peut :

- irriter la peau
- causer des empoisonnements sanguins
- causer des lésions internes
- entraîner la mort

2.5.2. Limites d'exposition pour des dégagements gazeux dans l'atmosphère

Une des tâches-clés dans la préparation et la lutte contre un accident impliquant un dégagement gazeux est de définir la concentration de gaz dans l'air qui peut être tolérée par toutes les personnes exposées, les personnes situées dans le voisinage étant également incluses, puisque c'est cette concentration « cible » qui permettra de déterminer les limites de la zone dangereuse.

Les Critères d'action de protection pour les produits chimiques (PAC - *Protective Action Criteria for Chemicals*) constituent un système hiérarchisé des trois systèmes de lignes directrices communes d'exposition du public : **AEGL**, **ERPG** et **TEEL**. L'ordre de priorité proposé par cette méthode est le suivant :

1. Valeurs AEGL à 60 minutes
2. Valeurs ERPG
3. Valeurs TEEL

Il est à noter qu'une substance dangereuse donnée peut avoir des valeurs dans chacun de ces systèmes, voire dans tous.

Le jeu de données PAC définit un seul jeu de valeurs (PAC-1, PAC-2 et PAC-3) pour chaque agent chimique, mais la source de ces valeurs peut varier. Les développeurs des valeurs TEEL sont à l'origine du jeu de données PAC (Ministère américain de l'énergie, Sous-comité responsable de l'évaluation des conséquences et actions de protection).

On doit reconnaître que :

- toute donnée toxicologique est continuellement revue et mise à jour et la dernière révision de ces valeurs doit être consultée ;
- les valeurs doivent servir de référence pour identifier les limites d'exposition dans une situation d'urgence, mais ne doivent pas être considérées comme une limite stricte entre une concentration sans danger et une concentration dangereuse ;
- l'utilisation d'une quelconque de ces valeurs dans une situation d'urgence requiert l'interprétation d'un spécialiste et tout conseil, faisant suite à une révision formelle et complète des caractéristiques toxicologiques d'une substance, doit être pris en considération.

2.6. Brûlures dues au froid et aux produits gazeux

Deux risques potentiels supplémentaires pour la santé, liés aux gaz, sont les brûlures froides ainsi que les brûlures chimiques.

Les brûlures froides sont plus liées à la façon dont les gaz sont transportés qu'aux propriétés inhérentes à la cargaison et sont causées par le contact direct avec un liquide extrêmement froid. Le mécanisme de fracture qui tend à fragiliser la structure d'acier d'un navire suite à un déversement d'un liquide cryogénique s'applique également aux brûlures froides. Dans ce cas, la chaleur venant de la peau sert à fournir la chaleur latente que nécessite le liquide pour s'évaporer.

D'autre part, les brûlures chimiques sont liées à la corrosivité des gaz (ou des vapeurs) qui causent, au niveau du contact, des dégâts visibles ou/et irréversibles des tissus humains. Les brûlures chimiques peuvent être causées, entre autres, par l'ammoniac, le brome, le chlore, l'oxyde d'éthylène ou l'oxyde de propylène.

2.7. Risques de réactivité

La **réactivité** est l'aptitude d'un produit chimique à changer de structure chimique par combinaison, substitution ou décomposition. Les risques de réactivité impliquent la libération d'énergie en quantités et en débits trop élevés pour être absorbés par le système réactif. Ceci se traduit par des conséquences néfastes telles que la production de gaz toxiques ou de chaleur, la rupture de citernes avec déversement de produits, des incendies ou des explosions. Dans le cas de dégagement de gaz, certaines des réactions - types pouvant avoir lieu et pouvant entraîner une situation de risque sont :

- **les réactions avec l'eau ou l'air** : par exemple, l'ammoniac se dissout rapidement dans l'eau et de façon exothermique pour produire de l'hydroxyde d'ammonium. Ainsi, si un gaz cryogénique quelconque se déverse dans la mer, de grandes quantités de vapeur seront produites suite au réchauffement provoqué par le contact avec l'eau. Si, de plus, le gaz est inflammable, il est alors susceptible de s'enflammer en présence d'une source d'inflammation.
- **les réactions de polymérisation** : par exemple, le chlorure de vinyle (monomère) a une forte tendance à se polymériser (auto-réaction) sous certaines conditions et est donc transporté avec un inhibiteur (un phénol).

- **les réactions sur d'autres produits** : par exemple, le méthane et le propylène sont considérés comme réactifs avec l'acier qui est un matériau commun pour la construction de la plupart des navires.

2.8. Limites d'exposition environnementale pour le rejet dans l'eau

La procédure d'évaluation des risques environnementaux a pour but de prédire s'il existe un risque d'effets nocifs pour l'environnement causé par une substance chimique. Il s'agit notamment de déterminer la concentration prédite sans effet (PNEC) et de la comparer à la concentration prévisible dans l'environnement (PEC).

L'évaluation des risques d'effets sur le milieu aquatique peut être déterminée à partir de la toxicité aiguë ou chronique de trois niveaux trophiques, représentés par les algues (producteurs primaires), les invertébrés (consommateurs primaires) et les poissons (consommateurs tertiaires et prédateurs). Parmi ces valeurs, on trouve la DL50, DL signifiant « dose létale », qui correspond à la quantité de matière qui, administrée en une seule fois, cause la mort de 50 % (la moitié) de la population animale testée. La DL50 est une façon de mesurer le potentiel toxique à court terme (toxicité aiguë) d'une matière.

Le facteur de bioconcentration (FBC) est une autre valeur intéressante ; il désigne le rapport entre la concentration du composé chimique dans l'organisme et celle dans le milieu. Il traduit la propension d'un organisme à absorber un composé chimique présent dans l'environnement ambiant.

Le document « *Revised Hazard Evaluation Procedure* » (Procédure d'évaluation des risques révisée) du GESAMP, groupe mixte d'experts sur les aspects scientifiques de la protection du milieu marin, offre une source d'informations intéressantes.

3. Comportement des gaz libérés dans l'atmosphère

En raison de la forte tension de vapeur des gaz et de la rapide vaporisation des gaz liquéfiés déversés, l'organisation de la lutte devra souvent se baser sur la détermination du profil du dégagement gazeux et devra estimer les concentrations atmosphériques en gaz sous le vent. Ce qui suit se réfère aux rejets de gaz dans l'air mais peut aussi s'appliquer aux vapeurs.

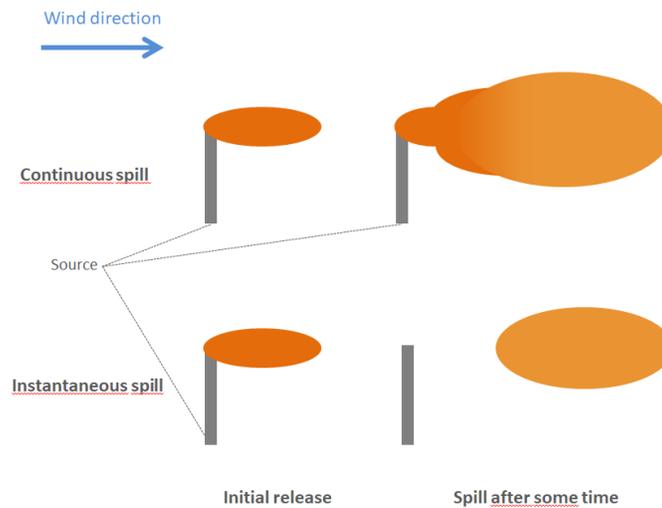
Il convient de noter que différents outils de modélisation ont été développés pour évaluer l'évolution de certains produits chimiques dans l'atmosphère et/ou le milieu aquatique.

3.1. Type de dispersion de gaz

La **dispersion** est un terme qui englobe les mots advection (mouvement), diffusion (propagation) et mélange avec l'air. Un rejet atmosphérique de gaz se déplacera généralement dans le sens du vent et se diffusera verticalement et perpendiculairement au déplacement. Les dégagements gazeux dans l'atmosphère peuvent être classifiés comme étant :

- **Instantanés**, ce qui signifie qu'ils ont lieu durant une courte période puis s'arrêtent. Le résultat de ce type de rejet est un nuage distinct, nette. Comme ce nuage se déplace dans la direction du vent, l'air commence à se mélanger à sa surface et, ainsi, diminue la concentration de surface en gaz bien que le volume d'air contaminé augmente.
- **continus**, ce qui signifie qu'ils ont lieu durant de longues périodes et se développent ainsi sous forme de panaches étendus. Le résultat de ce type de rejet est que les personnes ou objets situés sous le vent seront, par conséquent, exposés à une contamination atmosphérique ayant une concentration relativement constante durant une période égale à la durée du rejet, ceci tant que le vent ne change pas de direction.

Les deux différents types de dispersion de gaz sont représentés sur la **Figure 29**.



Direction du vent
Déversement continu
Source
Déversement instantané

Déversement initial

Déversement au bout d'un certain temps

Figure 29 (Copyright Cedre). Formation d'un panache (en haut) et d'un nuage (en bas).

Les déversements purement instantanés ou continus n'existent pas réellement dans la pratique. En effet, nombre d'entre eux sont trop longs pour être considérés comme instantanés mais trop courts pour former un panache continu. Cependant ce type de catégorisation théorique permet de simuler des modèles afin de prévoir le comportement d'un gaz au cours d'une dispersion et ainsi aider à déterminer l'étendue de la zone à risque touchée par le gaz.

3.2. Variables influençant la dispersion atmosphérique

Généralement, un nuage ou un panache de gaz s'orientera dans le sens du vent, se dispersant et se « diluant » lorsqu'il se mélange à l'air. En outre, plus il se déplacera, plus il aura tendance à s'agrandir et à se diluer dans l'air.

De nombreux facteurs influencent la forme et la taille du dégagement. Même si ces variables seront étudiées séparément par la suite, certaines interagissent entre elles faisant ainsi de la zone à risque une combinaison de différentes variables.

3.2.1. Effets liés à l'intensité de la source

De façon générale, les gros rejets (en taille ou concentration) produiront des zones à risque aussi bien plus grandes géographiquement que longues dans le temps. Les effets de « jet » ponctuel se produiront également dans le voisinage d'une source si le gaz est libéré sous pression. Ces effets s'atténueront au fur et à mesure que le gaz s'éloigne de la source.

3.2.2. Effets liés à l'incendie

L'énergie thermique issue d'un incendie augmentera la taille d'un nuage ou d'un panache de gaz. De plus, un gaz inflammable, une fois relâché, fournira une source de fuel pour l'incendie et pourra être consommé. Ceci peut aboutir à une diminution de la zone de risque initialement prévue, spécialement si l'incendie est proche de la source du rejet.

3.2.3. Effets liés à la flottabilité des gaz

D'un point de vue densité, un gaz peut être considéré comme plus léger que l'air (p.e. le GNL) ou plus lourd que l'air (p.e. le chlore). Les gaz moins denses que l'air, lorsque relâchés, montent et se mélangent à l'air. La vitesse d'ascension du gaz se déplaçant sous le vent, sera, en partie, fonction de la différence de densité entre le gaz et l'air mais aussi de la vitesse du vent. Les vents forts ont tendance à garder les nuages ou panaches de gaz plus légers que l'air proche du sol pendant de plus longues périodes.

Les gaz plus denses que l'air auront tendance, dans un premier temps, à se maintenir aux abords du sol. Au fur et à mesure que le gaz s'éloigne de sa source de relargage, il se diluera dans l'air. Sa densité se rapprochera donc de celle de l'air et il commencera à se comporter comme un gaz ayant une densité égale à celle de l'air. Un gaz plus léger que l'air, sous conditions normales, mais transporté sous forme de liquide cryogénique (basses températures), formera un nuage de gaz lourd juste après le déversement puisqu'à cette instant il sera encore froid et donc plus lourd que l'air.

3.2.4. Effets liés au milieu

Les caractéristiques topographiques influenceront la manière dont le gaz se dispersera. Elles sont généralement qualifiées de surfaces de rugosité. Une surface rugueuse induit plus de turbulences qu'une surface lisse favorisant ainsi un mélange vertical du gaz. Ce type de surface tend à créer des obstacles réduisant la vitesse du vent au niveau du sol tel est le cas des zones urbaines aux alentours des ports. Le vent contournant les larges obstacles créera également des remous et subira d'instables changements de direction qui pourront influencer le comportement du gaz dégagé. Ceci est particulièrement important lorsque l'air contourne la coque ou la structure d'un navire, s'enroulant par là même autour de lui (voir **figure 30**). Le passage de l'air entraîne une légère chute de pression, créant des courants d'air (remous) qui peuvent faire remonter le gaz au sommet du navire.

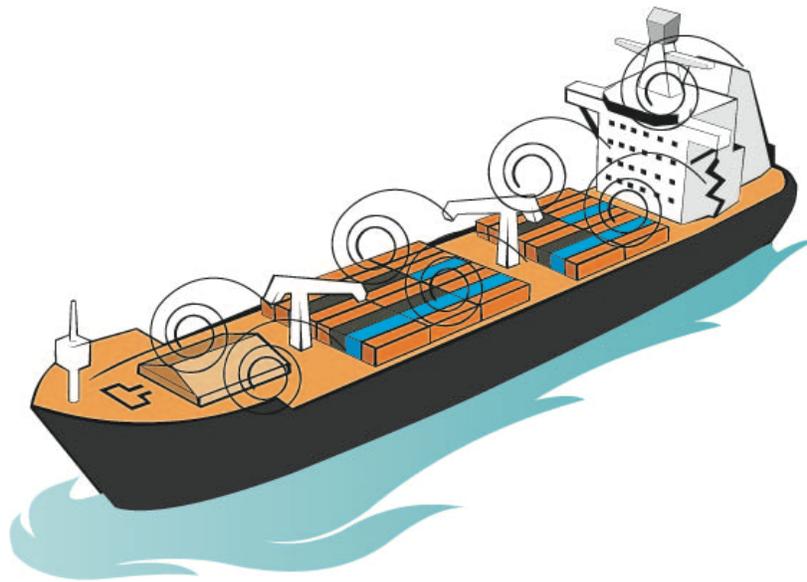


Figure 30 (Copyright Cedre). Formation de tourbillons (remous) lorsque l'air circule autour de la superstructure du navire.

3.2.5. Effets liés à la stabilité atmosphérique

Le moment de la journée (jour ou nuit), la couverture nuageuse, la vitesse du vent, l'intensité du soleil déterminent le niveau de turbulence dans l'atmosphère ainsi que le comportement d'une parcelle d'air quand celle-ci se déplace verticalement. Les conditions atmosphériques instables, caractérisées par un fort ensoleillement et un ciel bleu, contribuent à l'établissement de fortes turbulences thermiques dans l'atmosphère et favorisent de rapides mélanges. Réciproquement, les conditions stables, caractérisées par des vents légers et le refroidissement nocturne, contribuent à l'établissement de faibles turbulences thermiques et ne favorisent donc pas le mélange du gaz avec l'air. En cas de vent très faible ou en voie d'atténuation, la direction de ce dernier peut devenir très aléatoire. La signification pratique de ceci est que, sous des conditions de vent faible, des changements soudains de direction du vent peuvent avoir lieu, le nuage ou panache de gaz peut alors également changer subitement de position ou de direction. Par contre, les vents forts permettent la création de turbulences mécaniques et, par conséquent, de mélanges rapides. Les conditions météorologiques déterminent donc la direction du panache ou du nuage ainsi que l'évolution de la concentration en gaz au sein du panache dans le sens du vent.

4. Mesures de lutte appliqués aux dégagements gazeux

Les mesures de lutte sont des actions qui permettront de minimiser les risques pour la vie (incluant la santé humaine) et l'environnement dans les premiers instants suivant le déversement ou la fuite de gaz. Ces actions peuvent viser :

- le navire ;
- la cargaison ;
- la substance libérée.

En réponse à une situation d'urgence, toute action à entreprendre doit être évaluée sur la base des conditions particulières de l'incident et en respectant les règles de sécurité sans mettre en danger le personnel d'intervention. Les paragraphes suivants présentent des options possibles d'intervention, donnant ainsi une indication de ce qui peut être entrepris dans le cas d'un dégagement gazeux (particulièrement après un incident maritime). Cette liste ne doit, en aucun cas, être interprétée comme une « solution miracle » pour les opérations d'intervention lors de rejets gazeux faisant suite à un accident impliquant le transport par mer de substances en vrac ou sous emballage.

4.1. Options de lutte – le navire

La liste suivante des options d'intervention concerne le navire impliqué.

LE NAVIRE	
ACTION	MODE D'ACTION
Déplacer (ou remorquer) le navire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vers le large ▪ Vers un ancrage sans danger ▪ Vers un port sans danger ▪ Dans le sens du vent, avec refuge en amont du vent (si possible). ▪ Echouer le navire
Eteindre l'incendie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arroser d'eau ▪ Utiliser de la mousse à haut foisonnement ▪ Utiliser de la poudre chimique ▪ Utiliser du CO2 sous pression ▪ Utiliser du sable
Diminuer le potentiel d'incendie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eliminer les sources d'inflammation

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eliminer les sources de chaleur ▪ Arroser abondamment les zones en contact avec le feu pour refroidir le métal (applicable surtout en cas de collisions) ▪ Arroser le pont et les tuyauteries ▪ Arroser les citernes
Envoyer le navire par le fond	
Informé et avertir les navires, situés à proximité, de procéder à une approche prudente et de rester en amont du vent	
Pas d'action directe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surveiller la situation

4.2. Options de lutte – la cargaison

La liste suivante des options d'intervention concerne la cargaison impliquée.

LA CARGAISON	
ACTION	MODE D'ACTION
Déplacer la cargaison	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transférer la cargaison du réservoir endommagé vers un lieu sans danger ▪ Alléger le navire (transfert navire - navire ou navire - conteneur) ▪ Retirer conteneurs et réceptacles
Stopper le déversement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fermer les valves ▪ Sceller/obstruer les fuites/ruptures
Protéger la cargaison	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Isoler les réservoirs endommagés ▪ Refroidir les zones adjacentes ▪ Ajouter des gaz inertes
Immobiliser la cargaison	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enterrer les conteneurs/réceptacles ▪ Ancrer les conteneurs/réceptacles
Jeter la cargaison	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relargage intentionnel avec dilution mécanique dans l'air ▪ Rejet intentionnel par dessus bord avec pulvérisation d'eau ▪ Explosion contrôlée des conteneurs ayant coulés ▪ Combustion contrôlée du produit
Pas d'action directe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surveiller la situation

4.3. Options de lutte - les gaz libérés

La liste suivante des options d'intervention concerne les gaz libérés.

LES GAS LIBERES	
ACTION	MODE D'ACTION
Traitement chimique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utiliser de la mousse pour les surpressions de vapeurs ▪ Former un brouillard d'eau pour plaquer au sol le nuage de gaz en utilisant (si nécessaire) un agent neutralisant (pour éviter de fortes variations de pH). ▪ Rendre le nuage visible
Limiter l'accès à la zone dangereuse	
Evacuer de la zone à risques le personnel autre que celui d'intervention	Voir section 5
Placer le personnel autre que celui d'intervention à l'abri (sur place)	Voir section 5
Ne rien faire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surveiller la situation en laissant la substance s'évaporer et se disperser naturellement

5. Protection du personnel de non-lutte (population civile)

Il existe globalement deux façons de protéger la population civile. La première est l'évacuation et implique la mise en lieu sûr de la population menacée. La seconde implique de donner des instructions à la population afin que chacun reste chez soi ou sur son lieu de travail jusqu'à ce que le danger soit passé (refuge in-situ).

Chacune de ces options est utilisée pour protéger la communauté des effets d'accidents d'origine maritime (voir **Tableau 7**).

DATE	LIEU	NAVIRE	SUBSTANCE	DETAILS
20/04/95	Corpus Christi, Texas, USA	Barge, DC-304	Cumène/CVM	L'étrave du LPGC Maersk Shetland, chargé de CVM, entré en collision avec une barge près de la gare navale de Ingleside : Faible dégagement de cumène. Riverains évacués . La cargaison CVM est restée intact.
09/01/93	Près de Mandal, Norvège	Stawfjord	Explosifs	Navire contenant 200 tonnes de dynamite dans des conteneurs portables. Navire envoyé par le fond ; 100 personnes évacuées ; explosion.
22/08/91	Coode Island, Australie	Réservoir de stockage liquides	Méthyléthyl cétone	Explosion et incendie dans des conteneurs de stockage. Port et voies ferrées fermés, des centaines d'évacués . Ouvriers et habitants des environs alertés afin qu'ils restent chez eux , arrêtent les systèmes d'air conditionné et ferment les fenêtres des maisons pour empêcher l'infiltration de fumées toxiques.
03/05/91	Norfolk Coast, GB	Nordic Pride	Acrylate d'éthyle	Deux conteneurs de 24 000 litres d'acrylate d'éthyle échoués ; fuite de 1 000 litres d'un des conteneurs, 1 000 personnes évacuées .
27/07/89	Rotterdam, Pays-Bas	Porte-conteneurs	Hypochlorite de calcium	Environ 7 000 personnes évacuées des navires et habitations de la zone portuaire suite à un incendie d'un conteneur d'hypochlorite de calcium. Du chlore s'est échappé.

Tableau 7. Cas d'évacuation / refuge in-situ lors d'accidents d'origine maritime impliquant des substances dangereuses.

5.1. Options s'offrant à une personne prise dans des vapeurs de gaz toxiques

Un individu a différentes options à sa disposition lorsqu'il est confronté à un dégagement de gaz ou vapeur toxique ; soit il reste à l'intérieur des bâtiments, soit il en sort (voir **Figure 31**).

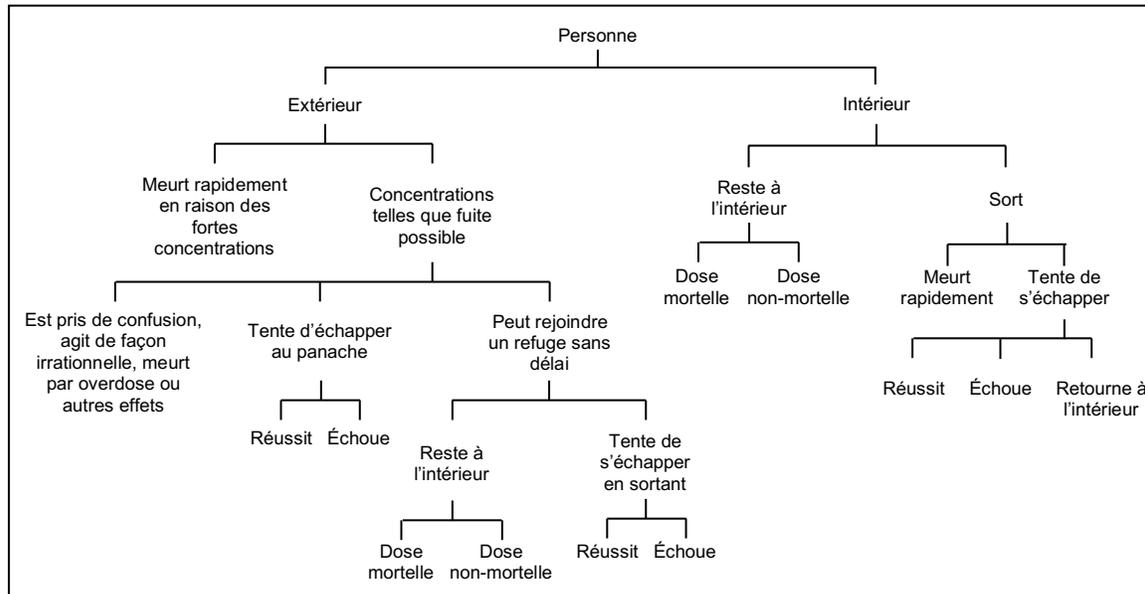


Figure 31. Options offertes à une personne prise dans un nuage de gaz ou de vapeur toxique.

Les options présentées sur la **Figure 31**, lorsqu'elles sont étendues à une population entière, peuvent être résumées en 4 points :

- Rester à l'intérieur avec utilisation de réservoirs d'air pur pour diluer l'air contaminé s'infiltrant à l'intérieur ;
- Évacuer la zone avant que le dégagement toxique n'ait lieu (évacuation pré-incident) ;
- Sauver les personnes après que le danger ait atteint la zone ce qui implique de leur fournir des équipements de protection pour assurer leur sécurité ;
- Évacuer la zone après que la concentration en produit toxique à l'extérieur soit devenue inférieure à celle à l'intérieur (évacuation post-incident).

5.2. L'évacuation

L'évacuation est une opération complexe et est considérée comme l'une des mesures d'intervention les plus agressives et radicales prises lors d'un dégagement accidentelle de produits chimiques. Il est également important de distinguer évacuation massive d'une zone entière et évacuation sélective d'une partie de la zone à risques.

5.2.1. Facteurs à considérer en cas d'évacuation

Il existe un certain nombre de facteurs à considérer lors d'une prise de décision d'évacuation :

- le moment optimum pour commencer l'évacuation
- le nombre de personnes à évacuer (évacuation d'une zone entière ou d'une partie seulement)
- la position des personnes à évacuer
- la mobilité des personnes à évacuer
- la réaction des personnes averties qu'elles vont être évacuées

5.2.2. Moyens requis pour l'évacuation

Pour effectuer une opération d'évacuation sans danger et efficace, certaines ressources sont nécessaires telles que :

- le personnel d'assistance d'évacuation
- des véhicules pour déplacer les personnes hors de la zone contaminée
- des équipements
- des accords avec les juridictions voisines pour recevoir les évacués.

5.2.3. Conduite de l'évacuation

Une opération d'évacuation doit être menée de façon très coordonnée, très minutieuse et sans danger. Le fait de prévoir des arrangements préliminaires (**au niveau de la préparation**) pour assurer la disponibilité des ressources avant l'accident permettra de mener une opération d'évacuation encore bien plus efficacement.

5.3. Refuge in-situ

Une alternative à l'évacuation est de rechercher des abris au sein même des bâtiments. Ceci peut être une option de survie pour protéger le public des effets de dégagements de gaz (ou vapeurs) toxiques dans l'atmosphère. L'exposition des personnes situées à l'intérieur d'un bâtiment à ces rejets qui se sont produits à l'extérieur dépend :

- de l'étanchéité des bâtiments
- du débit d'entrée et de sortie de l'air contaminé
- du mélangeage du gaz toxique avec l'air pur (initialement) à l'intérieur des bâtiments

5.4. Résumé : Evacuation ou Refuge in-situ ?

On peut dire que la décision d'évacuer et/ou de se réfugier sur place est très spécifique à l'accident et une prise de décision réfléchie est nécessaire. **L'évacuation reste une option de survie pour protéger le public lorsque :**

- il devient nécessaire de déplacer les personnes ;
- le dégagement a déjà eu lieu mais la population est suffisamment loin sous le vent pour permettre l'évacuation ;
- le rejet dure depuis longtemps et tout indique que la situation va encore se prolonger ;
- un feu s'est déclenché et est susceptible de devenir hors de contrôle ;
- la population n'est pas encore sur le chemin emprunté par le nuage ou le panache mais est menacée pour un changement de direction du vent ;
- en cas de refuge sur place, les personnes peuvent ne pas être totalement protégées contre les effets nuisibles du dégagement de la substance dangereuse.

D'un autre côté, **la recherche d'un abri sur place est aussi une option de survie pour protéger le public lorsque :**

- la contamination atmosphérique se déplace si rapidement qu'il est impossible d'effectuer une évacuation ;
- un dégagement de faible durée a lieu et le panache toxique est supposé s'éloigner rapidement ;
- les changements climatiques et le mouvement du panache toxique sont difficiles à prévoir ;

- on remarque que les populations les plus vulnérables telles que les vieillards ou les malades, pourraient subir des blessures au cours de l'évacuation ;
- en cas d'évacuation, les personnes peuvent ne pas être totalement protégées contre les effets nuisibles du dégagement de la substance dangereuse.

De plus amples informations concernant le choix à faire entre évacuation et recherche de refuges sur place peuvent être trouvées dans l'**annexe 3**.

6. Conclusion

Les gaz se distinguent des autres substances dangereuses par le fait que leur pression de vapeur, dans des conditions normales, est supérieure à celle de l'atmosphère. Cette caractéristique impose des conditions spéciales pour leur transport en mer. En raison de la volatilité des gaz ainsi que de leurs propriétés toxiques, inflammables, corrosives et réactives, la possibilité de déversements et de dégagements accidentels nécessite une attention particulière. La préparation à d'éventuels accidents maritimes impliquant des produits gazeux et ayant lieu aussi bien dans les installations portuaires qu'en pleine mer impliquent une connaissance de la chimie des gaz, du type de bateaux transportant de tels produits, du type de dégagement qui peut se produire, des conséquences possibles d'un tel rejet et des mesures de lutte qui peuvent s'appliquer. Inévitablement, une fois le déversement survenu, il est très difficile de le combattre sans y avoir été préparé.

ANNEXE I. TEMPERATURES ET PRESSIONS CRITIQUES DE CERTAINS GAZ COMMUNS

Substance	Température critique (°C)	Pression critique (bars)	Substance	Température critique (°C)	Pression critique (bars)
Méthane	-82,5	44,7	δ-Butylène	144,7	38,7
Ethane	32,1	48,7	Butadiène	161,8	43,2
Propane	96,8	42,6	Isoprène	211,0	38,5
n-Butane	153,0	38,1	CVM*	158,4	52,9
Isobutane	133,7	38,2	Oxyde d'éthylène	195,7	74,4
Ethylène	9,9	50,5	Oxyde de propylène	209,1	47,7
Propylène	92,1	45,6	Ammoniac	132,4	113,0
			Chlore	144,0	77,1

*CVM : Chlorure de vinyle monomère

ANNEXE II. PROPRIETES D'INFLAMMABILITE DE CERTAINS GAZ

Gaz	Point éclair (°C)	Domaine d'inflammabilité (% vol. dans l'air)	Température d'auto-ignition (°C)
Méthane	-175	5,3 - 14,0	595
Ethane	-125	3,1 - 12,5	510
Propane	-105	2,1 - 9,5	468
n-Butane	-60	1,8 - 8,5	365
Isobutane	-76	1,8 - 8,5	500
Ethylène	-150	3,0 - 32,0	453
Propylène	-180	2,0 - 11,1	453
α -Butylène	-80	1,6 - 9,3	440
β -Butylène	-72	1,8 - 8,8	465
Butadiène	-60	2,0 - 12,6	418
Isoprène	-50	1,0 - 9,7	220
CVM	-78	4,0 - 33,0	472
Oxyde d'éthylène	-18	3,0 - 100,0	429
Oxyde de Propylène	-37	2,8 - 37,0	465
Ammoniac	-57	16 - 25,0	615
Chlore	Ininflammable		

ANNEXE III. EVACUATION OU REFUGE IN-SITU ?

1. Les aspects de l'évacuation

L'évacuation est une opération complexe et est considérée comme l'une des mesures de lutte les plus difficiles à prendre lors d'un dégagement accidentel de gaz. Les difficultés physiques d'une évacuation à grande échelle ne devraient pas être sous estimées. Lors d'une opération d'évacuation, beaucoup de précautions doivent être prises pour ne pas mettre en danger les personnes humaines, par exemple, en les évacuant à l'extérieur alors qu'ils pourraient être plus en sécurité dans un abri à l'intérieur du navire. Il est aussi important de faire la différence entre une évacuation de masse d'une zone entière et une évacuation sélective d'une partie d'une zone à risque.

1.1. Facteurs à prendre en compte en cas d'évacuation

Les problèmes à considérer sont les suivants :

- Les gens sont évacués avant que les dégagements ne se produisent et sont relogés s'il y a assez de temps ;
 - Les gens sont suffisamment sous le vent pour avoir le temps d'être évacués ;
 - Les gens ne sont pas directement sur le trajet du nuage de vapeur mais sont menacés par un changement de direction du vent ;
 - Le dégagement a déjà commencé, dans ce cas, le moment le plus propice pour quitter le navire est lorsque la concentration de vapeur dans l'air est passée en-dessous de celle à l'intérieur du navire ;
- Le nombre d'évacués (évacuation de la zone entière ou d'une partie de la zone) ;
Le lieu et les environs des évacués sont :
- Les résidences privées ;
 - Les écoles ;
 - Les hôpitaux ;
 - Les installations pour les soins ;
 - Les crèches ;
 - Les prisons ;
 - Les bureaux ;
 - Les établissements commerciaux ;
 - Les établissements industriels ;
 - Les établissements de loisirs ;
 - Les parcs et les jardins ;
 - Le réseau routier.
- La mobilité des évacués avec une attention particulière pour :
- Les personnes qui ne possèdent pas de moyen de transport ;
 - Les personnes âgées ;
 - Les enfants ;
 - Les personnes handicapées ;
 - Les infirmes ;
 - Les prisonniers ;
 - Les personnes ne parlant pas la langue locale.
- La réaction des gens qui sont informés et qui doivent être évacués (Remarque : il faut noter que des personnes étant parties de chez elles pour quelques jours, auront tendance à retourner à leur domicile pour prendre leurs effets personnels de valeur alors que leurs proches et leurs amis concernés par leur sécurité auront tendance à converger vers la zone composant l'opération de sauvetage. Ce dernier groupe ne devra pas être admis dans la zone sinistrée. Il se peut que les personnes ayant des animaux domestiques refusent de quitter leur domicile si des dispositions spéciales ne sont pas prises pour les animaux).

1.2. Moyens requis pour l'évacuation

Pour accomplir une opération d'évacuation efficace, certains moyens sont impératifs, tels que :

- Du personnel d'évacuation
- Des véhicules spécialisés :
 - Des véhicules équipés d'ascenseur pour les personnes handicapées ;
 - Des ambulances pour les infirmes ;
 - Des moyens de transport pour déplacer les personnes qui n'en ont pas ;
- Des équipements spéciaux :
 - Des équipements de protection pour le personnel d'évacuation ;
 - Des équipements de protection pour les évacués qui étaient situés dans une zone hautement contaminée ;
 - Des équipements de communication, tels que :
 - des radios mobiles et portables ;
 - des haut-parleurs mobiles ;
 - des sirènes, les cornes de brume des navires ;
 - Une signalisation pour indiquer aux occupants d'un immeuble qu'ils doivent se tenir prêts à être évacués ;
 - Des cartes (à l'échelle) comprenant des routes d'évacuation et secondaires ;
 - Des abris de protection pour les évacués.
- Des accords avec les juridictions spéciales pour recevoir les évacués.

Prendre des dispositions préalables (au niveau de la préparation) pour s'assurer de la disponibilité des moyens requis avant une situation d'urgence, pour permettre une opération d'évacuation plus efficace.

1.3. Conduite de l'évacuation

Une opération d'évacuation doit être conduite de manière bien coordonnée, et en toute sécurité. Cela implique un plan d'action prédéterminé.

ETAPE 1 : Assigner les tâches au personnel d'évacuation tels que la surface spécifique de couverture.

ETAPE 2 : Alerter les gens qui doivent être évacués et leur donner des instructions de sécurité. Cette étape pourra être accomplie par :

- du porte à porte ;
- des haut-parleurs mobiles, usage de radios ;
- une combinaison des deux.

ETAPE 3 : Déplacer les gens et leur fournir des moyens de transport. Porter attention au contrôle du trafic routier et prévoir un réseau routier secondaire. Le contrôle routier implique des véhicules avec haut-parleurs aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la zone d'évacuation.

ETAPE 4 : Mettre les évacués à l'abri et leur fournir un bâtiment confortable et sûr. Lors de la sélection du bâtiment, il est impératif que le lieu soit choisi en dehors de la zone de contamination actuelle et de celles risquant de le devenir. Si, dans le cas extrême, le bâtiment doit être évacué, des solutions alternatives devront être étudiées au préalable. Un nombre de bâtiments devra être pré-identifié pour fonctionner comme refuges et centres de repos en cas d'urgence. Quelques caractéristiques, équipements et services qui devront être disponibles dans les refuges et centres de repos sont listés dans l'**Appendice 1** de cette annexe.

ETAPE 5 : Surveiller la zone évacuée pour empêcher toute activité non-autorisée (p.e. vandalisme). Le personnel de surveillance patrouillant la zone doit être équipé de vêtements protecteurs appropriés.

ETAPE 6 : Le retour dans la zone occupée peut être considéré comme une opération d'évacuation dans le sens inverse. Ainsi, lorsque le retour s'effectue, il est important de conseiller les gens pour qu'ils préviennent les services de sécurité lorsqu'ils rencontrent des nuages persistants de vapeurs ou d'autres risques et aussi pour qu'ils trouvent des traitements médicaux lorsqu'ils souffrent de symptômes anormaux (p.e. les éternuements et les difficultés à respirer).

2. Refuge in-situ

Une alternative pour l'évacuation est de chercher des abris intérieurs. Ceci pourrait être une bonne option pour protéger le public des effets d'un dégagement de vapeurs toxiques dans l'atmosphère.

2.1. Facteurs à prendre en compte en cas de refuge in-situ

Si un bâtiment ou une autre structure est complètement étanche, c'est-à-dire comme une boîte fermée, toute personne à l'intérieur ne sera pas exposée aux vapeurs de gaz toxiques existant à l'extérieur. D'un autre côté, si plusieurs fuites d'air contaminé sont présentes, les gens seront autant exposés à l'intérieur qu'à l'extérieur. Par conséquent, l'exposition des gens aux gaz toxiques extérieurs à l'intérieur du bâtiment dépend de l'étanchéité du bâtiment, du taux d'entrée et de sortie de l'air contaminé et du mélange à l'intérieur entre l'air toxique et l'air propre.

2.1.1. L'étanchéité

Les trois façons de faire entrer et sortir l'air sont :

- La ventilation naturelle qui peut être décrite comme une entrée d'air extérieur à l'intérieur du bâtiment à travers des fenêtres ou des portes ouvertes sans assistance ; naturellement plus le bâtiment est ouvert, plus le débit d'air extérieur qui pénètre est important ; fermer et ouvrir les différentes fenêtres et portes régule le taux d'entrée et de sortie ;
- La ventilation forcée qui peut être décrite comme une entrée d'air extérieur à l'intérieur du bâtiment par l'utilisation de ventilateurs et d'autres équipements, qui peuvent réchauffer, refroidir, filtrer l'air et même le recycler et ensuite le rejeter à l'extérieur ; la régulation du taux d'entrée et de sortie est donnée par le système ;
- L'infiltration qui peut être décrite comme une fuite d'air dans un bâtiment due à des fissures près des ouvertures, près des fenêtres et des portes et à travers les sols et les murs ; ce type d'infiltration est divisé en deux :
 - Les **fuites majeures** (*background leakage*) qui incluent les sources au niveau de la jointure entre les murs et les fondations, perforations dues aux orifices électriques et à la plomberie ;
 - Les **fuites mineures** (*component leakage*) qui incluent les sources localisées tels que par exemple des fissures autour de l'encadrement d'une fenêtre et des ouvertures pour les orifices de ventilation (la **Figure 32** donne une représentation d'une infiltration d'air) ; ce type d'entrée d'air est différent d'une ventilation naturelle ou mécanique dans le sens où l'on considère que les occupants ont généralement la possibilité de contrôler en partie le taux d'entrée.

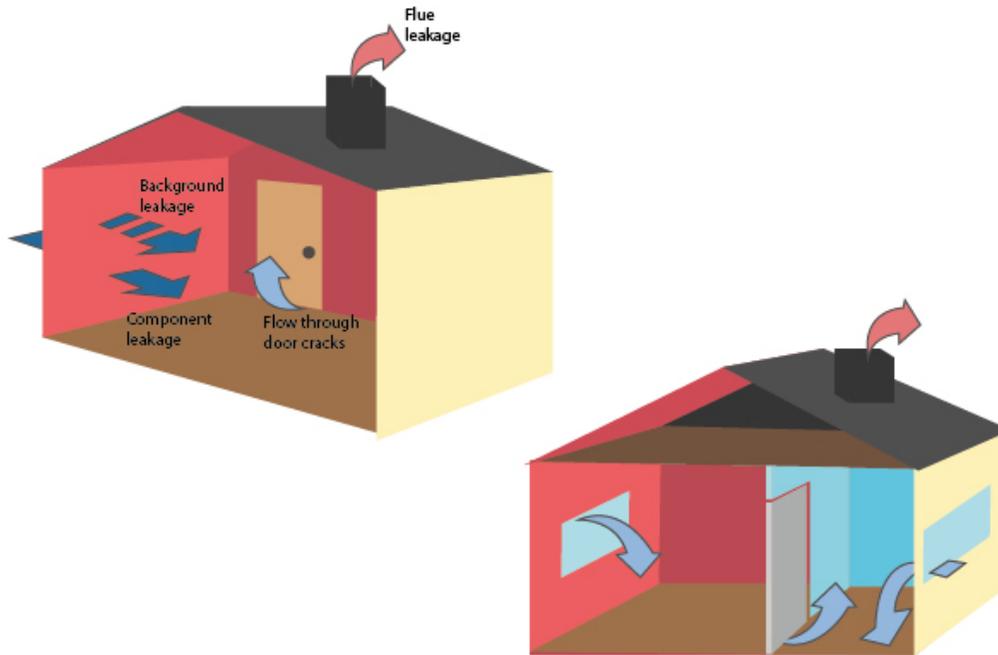


Figure 32 (Copyright Cedre). Le trajet des fuites dans un bâtiment

2.1.2. Possibilités d'infiltration dans les bâtiments

Le taux d'entrée d'un gaz toxique dans un bâtiment dépend de(s) :

- Différents types de ventilation ;
- Conditions de température et de pression ;
- Débit d'air échangé dans le bâtiment ;
- Parcours du nuage toxique dans les bâtiments.

2.1.3. Mélange de l'air toxique à l'intérieur des bâtiments

Les facteurs qui doivent vous venir à l'esprit lorsqu'il faut considérer le mélange d'air contaminé dans un bâtiment sont :

- La dilution de l'air contaminé avec l'air intérieur, ce qui signifie que les personnes étant à l'abri à l'intérieur seront exposées à la concentration extérieure mais diluée ;
- Le déplacement direct de l'air intérieur dû à l'entrée d'un flux d'air extérieur contaminé plus froid s'oppose directement à l'effet de dilution ;
- La création éventuelle de surfaces chaudes à l'intérieur d'un espace donné ;
- L'état physique de la substance dans l'air (les gaz et les vapeurs parcourent de plus grandes distances et passent mieux dans de petits espaces que les poussières et d'autres aérosols).

2.2. Recommandations à suivre en cas de refuge in-situ

Afin que l'alternative de refuge in-situ soit efficace, une minimisation de l'entrée d'air extérieure doit être organisée. Ce qui suit sont des instructions permettant d'aider des personnes en danger afin de mettre en place des mesures de protection efficaces:

- Les portes d'accès à l'extérieur devront être fermées, ainsi que les fenêtres. Les ouvertures ou interstices sous les portes et les fenêtres devront être bouchés par des

vêtements/serviettes humides ainsi que les robinets et les orifices d'électricité près des fenêtres et des portes ;

- Les systèmes de ventilation devront être mis sur le mode "recyclage" pour que l'air contaminé ne pénètre pas dans le bâtiment. Le système de ventilation devra être coupé si cela n'est pas possible ;
- Les systèmes de chauffage et d'air conditionné devront être éteints ;
- L'utilisation d'ascenseurs devra être minimisée pour éviter que celui-ci ne fasse des appels d'air extérieur contaminé pénétrant ainsi à l'intérieur du bâtiment ;
- Les ventilateurs et aérateurs dans les cuisines, salles de bains et toilettes devront être coupées ;
- Les ouvertures vers l'extérieur près des appareils d'air conditionné, encastrés dans la paroi, des aérateurs, des hottes, des déshumidificateurs devront être bouchés en utilisant du plastique, de la cire, de l'aluminium ;
- Les portes intérieures (autant que cela est possible) devront être fermées ;
- Si les informations disponibles sur la substance indique que celle-ci est soluble ou même partiellement soluble dans l'eau, il est conseillé de mettre un vêtement humide autour du nez et de la bouche. Il est aussi conseiller d'aller dans la salle de bains, de boucher la porte et les autres ouvertures, d'ouvrir le robinet de la douche de façon à ce qu'il y ait une pluie large pour repousser l'air contaminé au niveau du sol ;
- S'il y a des risques d'explosion à l'extérieur, il est conseiller de fermer les rideaux et les stores, de s'accroupir par terre et de s'écarter des fenêtres afin d'éviter d'être blessé par des morceaux de verres ou autres objets coupants ;
- Ouvrir les fenêtres et mettre en marche les systèmes de ventilation dès que le danger est passé pour évacuer l'air contaminé persistant dans le bâtiment ;
- Ecouter les annonces d'urgence à la radio ou à la télévision et suivre les conseils donnés.

APPENDICE I. CARACTERISTIQUES, EQUIPEMENTS ET SERVICES D'UN ABRI / CENTRE DE REPOS

Cette annexe couvre des recommandations générales qui sont considérées comme nécessaires pour la création d'un abri / centre de repos. Elles ne sont en aucun cas exhaustives mais soulignent les caractéristiques essentielles. L'annexe est divisée en deux parties. La Partie A traite des caractéristiques, des équipements et des services qui doivent être fournis par des abris / centres de repos, tandis que la Partie B passe en revue les différentes sources de "stress" pour les personnes ayant à se servir de ces lieux.

PARTIE A – Caractéristiques, Équipements et Services

Disposition du bâtiment :

- une entrée et une sortie uniques devraient être prévues même s'il en existe potentiellement plusieurs ;
- l'entrée / la zone d'accueil doit être suffisamment grande pour éviter que les personnes n'aient à attendre à l'extérieur avant de pouvoir entrer, spécialement la nuit ou par mauvais temps ;
- un espace principal / une zone de repos avec suffisamment d'espace pour éviter que les personnes ne soient à l'étroit ;
- une pièce pour stocker les affaires de valeur et/ou personnelles que les évacués voudraient mettre en sûreté ;
- une zone de parking suffisamment vaste, des accès aux bâtiments assez larges pour les bus et ambulances ainsi que des voies d'accès pour les handicapés ;
- une pièce séparée pour les propriétaires d'animaux et leurs animaux ;
- des pièces pour consultations médicales et conseils.

Équipements :

- équipements pour la préparation des repas ;
- cabines téléphoniques ou autres moyens de communication (par ex. talkie-walkie) ;
- toilettes / douches / salles d'eau ;
- mobilier de base (chaises, tables, lits) ;
- éclairage adéquat, régulation de la température, ventilation et points d'eau non contaminée ;
- dispositions pour le contrôle / prévention des risques à l'intérieur et extérieur du bâtiment.

Gestion et organisation :

- une personne ayant le rôle du coordinateur de l'abri / centre de repos ;

- dispositions pour l'inscription et le décompte des allers et venues des évacués qui ont été récupérés ;
- dispositions pour limiter l'accès à certaines parties des bâtiment qui pourraient constituer un danger potentiel ;
- lieu où des informations précises sont régulièrement mises à jour et affichées ;
- dispositions pour avoir des interprètes si nécessaire; ceci étant particulièrement important dans le cas où l'évacuation se déroule dans des lieux rassemblant plusieurs nationalités (ex. hôtels) ;
- dispositions pour la prescription de médicaments, et la continuation de traitements médicaux contre des maladies chroniques chez certains évacués ;
- dispositions pour s'assurer que le personnel d'assistance puisse se reposer et être relayé ;
- constitution de stocks de base (savons, serviettes, brosses à dents et dentifrice par exemple).

PARTIE B – Sources potentielles de stress dans les centres de repos

Perte de la dignité :

- manque de vie privée
- perte de dentier, lunettes, etc.
- « solliciter de l'aide »
- « avoir à demander »

Entourage et alentours non satisfaisants :

- sanitaires
- douches et lavabos
- les autres personnes

Voisinage étranger, perte de ses voisins (réseau social) :

- dernières nouvelles
- baby-sitting
- soutien moral

Interruption des services :

- nourriture
- informations

Incertitudes :

- combien de temps ici ?
- que va-t-il arriver ?

Bureaucratie :

- perte du contrôle
- retards
- sympathie des autres qui s'estompe

Changements de vie :

- travail
- scolarité
- culture

Problèmes psychologiques continuels :

- faire face à la mort
- deuil
- besoin de s'adapter

Tensions familiales :

- surpopulation
- perte de son intimité
- pas de communication (angoisse)
- utilisation excessive de l'alcool (pour « abaisser la tension nerveuse »)
- inquiétudes pour les enfants (comportement)

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les principales routes de transport de gaz (lignes magenta), de GNL (lignes bleu foncé) et de GPL (lignes bleu clair) en Méditerranée et les principaux ports (points bleu clair) (Source <http://safemedqis.rempec.org/>).

Figure 2 (Copyright Cedre). Illustration en deux dimensions des différentes phases de la matière.

Figure 3. Illustration du comportement de l'eau lors du chauffage et du refroidissement.

Figure 4 (Copyright Cedre). Diagramme de phases.

Figure 5 (Copyright Cedre). Diagramme de phase montrant comment un gaz peut être liquéfié par perte de chaleur et/ou par pressurisation.

Figure 6. Étapes clés du processus dans une usine de liquéfaction de GNL (Source : Petrowiki.org).

Figure 7 (Copyright Cedre). Classification européenne SEBC (*Standard European Behaviour Classification*). G (Gazeux), E (Evaporant), F (Flottant), D (Soluble), S (Coulant) et les combinaisons de ces comportements (par ex. FED pour Flottant et Evaporant et Soluble).

Figure 8. Différents types de bouteilles de gaz (non à l'échelle).

Figure 9. Un module à tubes.

Figure 10 (Copyright Cedre). Un conteneur d'une tonne.

Figure 11. Conteneurs-citernes multimodaux : structure type boîte (à gauche) et structure partielle (à droite).

Figure 12. Exemples de véhicules à remorque transportant des produits gazeux.

Figure 13. Exemples de véhicules à remorque transportant des produits gazeux.

Figure 14. Illustration de quelques navires qui transportent des matières dangereuses sous emballage.

Figure 15. Un exemple de transporteurs de GPL totalement pressurisé.

Figure 16. Un exemple d'un transporteur de GPL / NH₃ semi-pressurisé.

Figure 17. Un exemple de transporteur de GPL totalement réfrigéré.

Figure 18. Exemple de transporteur de GPL/éthylène semi-pressurisé / totalement réfrigéré.

Figure 19 (Copyright Cedre). Vue globale de méthaniers (à cuves sphériques sur la gauche, prismatique sur la droite).

Figure 20 (Copyright Cedre). L'un des objectifs des Codes est d'assurer une protection non négligeable contre les dégâts accidentels.

Figure 21. a) Émissions de NO_x et, b) Seuils de SO_x dans le combustible pour les navires conformément à MARPOL Annexe VI.

Figure 22. Exemple de bras de chargement de méthanier.

Figure 23 (Copyright Cedre). Déchargement de GNL en tandem.

Figure 24. Déchargement de GNL en côte à côte.

Figure 25. (Copyright Cedre) Illustration montrant l'effet de barrage d'un système de défenses fixes positionnées le long de la coque du navire.

Figure 26 (Copyright SOBEGI). Détecteur 4 gaz.

Figure 27 (Copyright Cedre). Exemple d'EPI pendant la phase de décontamination.

Figure 28. Domaine d'inflammabilité suite à déversement de gaz liquéfié.

Figure 29 (Copyright Cedre). Formation d'un panache (en haut) et d'un nuage (en bas).

Figure 30 (Copyright Cedre). Formation de tourbillons (remous) lorsque l'air circule autour de la superstructure du navire.

Figure 31. Options offertes à une personne prise dans un nuage de gaz ou de vapeur toxique.

Figure 32 (Copyright Cedre). Le trajet des fuites dans un bâtiment.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Incidents maritimes impliquant des cargaisons gazeuses ou extrêmement volatiles en mer Méditerranée.

Tableau 2. Exemple de substances chimiques, avec solubilité déterminée dans l'eau douce et l'eau de mer (Source : Cedre).

Tableau 3. Principaux avantages et inconvénients des différentes structures de méthaniers.

Tableau 4. Les différents types de moteurs et principales caractéristiques des systèmes de propulsion au gaz.

Tableau 5. Les différentes méthodes de soutage en GNL combustible - description, avantages et inconvénients.

Tableau 6. Exemples de principes de détection et principales caractéristiques.

Tableau 7. Cas d'évacuation / refuge in-situ lors d'accidents d'origine maritime impliquant des substances dangereuses.

GLOSSAIRE ET ACRONYMES

AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) : Valeurs guides de seuils d'exposition aiguë. Valeurs repères toxicologiques définies pour un type d'exposition, une voie d'exposition, une durée d'exposition et un type de population.

Température d'auto-ignition : température à laquelle le mélange vapeur dans l'air doit être chauffé pour produire une inflammation spontanée.

Bar : unité de mesure de la pression sous pression atmosphérique.

Bar g : unité de pression de gauge, i.e. la pression exprimée en bars au-delà de la pression ambiante ou atmosphérique.

BOG : Boil Off Gas, ou gaz d'évaporation.

Point d'ébullition : température à laquelle la tension de vapeur d'un liquide atteint la pression extérieure (le point d'ébullition varie en fonction de la pression).

Densité : masse par unité de volume d'une substance dans des conditions spécifiées de température et de pression.

ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) : Lignes directrices pour la planification de mesures d'urgence. Valeurs repères toxicologiques définies pour un type d'exposition, une voie d'exposition, une durée d'exposition et un type de population.

ESD : Emergency ShutDown, système d'arrêt d'urgence.

Domaine d'inflammabilité : plage de concentrations des gaz d'hydrocarbures dans l'air entre les limites inférieures et supérieures d'inflammabilité (d'explosivité). Les mélanges se situant dans cette plage peuvent s'enflammer et brûler.

Point éclair : température minimale à laquelle il faut porter un liquide pour obtenir suffisamment de vapeurs pour former un mélange inflammable avec l'air.

LFL (Lower Flammable Limit) : Limite inférieure d'inflammabilité. Concentration minimale pouvant provoquer une inflammation d'un mélange inflammable de gaz ou vapeur dans l'air, à une température et une pression données.

GPL : Gaz de pétrole liquide ou liquéfié.

LEL (Lower Explosive Level) : Limite inférieure d'explosivité. Concentration d'un gaz d'hydrocarbure dans l'air en dessous de laquelle la teneur en hydrocarbure est insuffisante pour entretenir et propager une combustion.

MARPOL: MARine POLLution, the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires est la principale convention internationale couvrant la prévention de la pollution du milieu marin par les navires d'origine opérationnelle ou accidentelle.

LGN : Liquides de gaz naturel.

PEC (Predicted Environmental Concentration) : Concentration environnementale estimée. Concentration prédite d'une substance chimique dans l'environnement.

PNEC (Predicted No Effect Concentration): Concentration estimée sans effet. Concentration d'une substance chimique qui marque la limite en-dessous de laquelle aucun effet nocif de l'exposition dans un écosystème n'est mesuré.

PTS : Terminal Port-To-Ship, terminal portuaire à navire.

QCDC : Quick Connect/Disconnect Coupler, système hydraulique de couplage rapide.

STS : Ship-To-Ship, navire à navire

TEEL (Temporary Emergency. Exposure Limit) : Seuil d'exposition temporaire en cas d'urgence. Valeurs repères toxicologiques définies pour un type d'exposition, une voie d'exposition, une durée d'exposition et un type de population.

TTS : Truck-To-Ship, camion-citerne à navire

UEL (Upper Explosive Level) ou UFL (Upper Flammability Limit) : Limite supérieure d'explosivité ou Limite supérieure d'inflammabilité, concentration d'un gaz d'hydrocarbure dans l'air au-dessus de laquelle la concentration en oxygène est insuffisante pour entretenir et propager une combustion.

Densité de vapeur : masse relative d'une vapeur comparée à celle de l'hydrogène (ou de l'air selon la source). Il n'existe pas d'unité de mesure officielle, mais elle est souvent donnée en unités de kilogrammes par mètre cube (kg/m³).

Tension de vapeur : caractérise la volatilité d'un produit, généralement exprimée en Pascal.

CVM : Chlorure de vinyle monomère

BIBLIOGRAPHIE

- Centre for Advanced Studies Maritime Studies, (1990). *Module 2 – Applied Science 1*. Edinburgh, U.K.
- Cote A. and Bugbee P., (1993). *Principles of fire protection*.
- ENVIRO Tips, (1984). *Natural Gas*. Environmental Protection Service, Environment Canada, Canada.
- ERCB, (1992). *A technical study of shelter versus evacuation when faced with a release of hydrogen sulphide*. Alberta Public Safety Services, Canada.
- Eyres D.J., (1984). *Ship construction*.
- Ffooks R., editor (1984). *Gas carriers*.
- Ffooks R., editor (1993). *Natural gas by sea*.
- ICS / OCIMF / SIGTTO, (1987). *A guide to contingency planning for the gas carrier alongside and within port limits*.
- IMO Models Course, (1991). *Liquefied gas tanker familiarization*.
- IMO, (1993). *International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk*.
- Koops W., (1988). *Response methods applicable to substances classified as gases and fast evaporators when released into the aquatic environment*. Ministry of Transport and Public Works, North Sea Directorate.
- Lavery H.I., (1990). *Shipboard operations*.
- SIGTTO, (1986). *Liquefied gas handling principles on ships and in terminals*.
- Tokle G., editor (1993). *Hazardous materials response handbook (NPFA)*.
- U.S.EPA, DOT, FEMA, (1989). *Handbook of chemical hazard analysis procedure*.