DISPOSITIF DE STOCKAGE DE GAZ LIQUEFIE

DOMAINE TECHNIQUE

L'invention concerne notamment un dispositif de stockage de gaz liquéfié, en particulier pour un navire de transport maritime de gaz liquéfié ou pour une installation terrestre.

ETAT DE L'ART

Afin de transporter plus facilement du gaz, tel que du gaz naturel, sur de longues distances, le gaz est généralement liquéfié (pour devenir du gaz naturel liquéfié - GNL) en le refroidissant à des températures cryogéniques, par exemple -160°C à la pression atmosphérique. Le gaz liquéfié est ensuite chargé dans des navires de transport maritime, tels que des navires méthaniers et des navires de soutage.

Afin de limiter l'évaporation du gaz liquéfié contenu dans une cuve d'un navire, il est connu de le stocker sous pression dans cette cuve de manière à se déplacer sur la courbe d'équilibre liquide-vapeur du gaz liquéfié considéré, augmentant ainsi sa température de vaporisation. Le gaz liquéfié peut ainsi être stocké à des températures plus importantes ce qui a pour effet de limiter l'évaporation du gaz.

L'évaporation naturelle du gaz est toutefois inévitable, ce phénomène étant appelé NBOG qui est l'acronyme de l'anglais *Natural Boil-Off Gas* (par opposition à l'évaporation forcée de gaz ou FBOG, acronyme de l'anglais *Forced Boil-Off Gas*). Le gaz qui s'évapore naturellement dans la cuve d'un navire est en général utilisé pour alimenter une installation de production d'énergie du navire, qui est prévue pour pourvoir aux besoins énergétiques du fonctionnement du navire, notamment pour la propulsion du navire et/ou la production d'électricité pour les équipements de bord.

Dans la technique actuelle, le perfectionnement des cuves sont tels que les taux d'évaporation naturelle (BOR – acronyme du *Boil-Off Rate*) des gaz liquéfiés sont de plus en plus faibles, alors que les machines d'un navire sont de plus en plus performantes. Ceci a pour conséquence, que l'écart est très

important entre la quantité de gaz naturellement produite par évaporation et celle demandée par l'installation d'un navire. L'excédent de gaz est particulièrement important lorsque la consommation du navire est faible, c'est-à-dire par exemple lorsque le navire ralenti, est en phase d'attente, ou en situation d'avarie telle que des équipements de traitement ou de consommation de gaz ne sont plus disponibles.

L'excédent de gaz d'évaporation produit naturellement (NBOG) est alors recondensé et réinjecté dans la cuve. On utilise pour cela des moyens de re-liquéfaction ou de re-condensation, qui transforment le NBOG en gaz liquéfié qui est ensuite réinjecté dans la cuve.

Il est en outre possible de diminuer la production de NBOG en diminuant la température du ciel gazeux contenu dans la cuve au-dessus de l'interface liquide-gaz dans la cuve. Pour cela, il est possible de prélever du gaz liquéfié, de le refroidir (ou de le sous-refroidir car il est déjà très froid), puis de le réinjecter dans la cuve par l'intermédiaire de rampes de pulvérisation de gaz liquéfié dans le ciel gazeux.

Ceci permet de contrôler la pression dans la cuve en re-condensant du BOG dans le ciel gazeux (premier objectif). Ceci permet également de contrôler la température du gaz liquéfié afin de livrer du GNL "froid" (second objectif). En effet, dans le cadre d'un méthanier ou d'un navire de soutage, une température maximale de GNL à livrer peut-être requise par le terminal ou navire de réception.

Le premier objectif répond principalement à l'opération de transfert de GNL entre plusieurs stockages d'une même installation et/ou entre plusieurs stockages de plusieurs installations, afin de condenser l'excédent de gaz généré pendant l'opération de transfert de GNL, et ceci afin d'effectuer le transfert dans un temps imparti. Le premier objectif peut aussi répondre au besoin d'une cuve chargée ou presque vide (si le but est de contrôler la pression).

Le second objectif répond à la demande du navire souté de réceptionner du GNL relativement froid afin de conserver une marge de sécurité par rapport aux soupapes de sécurité. Après l'opération de chargement du

souteur, l'affréteur souhaitera donc conserver sa cargaison la plus froide possible, voir même refroidir sa cargaison afin de respecter son contrat avec le navire propulsé au GNL. Il utilisera donc son équipement de sous-refroidissement pour refroidir le GNL et non faire chuter la pression.

Un des objectifs de la présente invention est d'optimiser le stockage dans la cuve de gaz liquéfié en fonction du besoin recherché, notamment de contrôle d'une pression ou de contrôle d'une température de liquide.

EXPOSE DE L'INVENTION

Selon un premier aspect, l'invention propose un dispositif de stockage de gaz liquéfié, en particulier pour un navire de transport maritime de gaz liquéfié ou pour une installation terrestre, comportant :

- au moins une cuve de stockage de gaz liquéfié, qui comprend un fond de cuve et un plafond de cuve qui définissent entre eux une hauteur de cuve,
- des moyens de prélèvement de gaz, sous forme liquide et/ou gazeuse, dans ladite cuve, et
- des moyens d'injection de gaz sous forme liquide dans ladite cuve, qui sont de préférence reliés auxdits moyens de prélèvement de gaz,

caractérisé en ce que lesdits moyens d'injection de gaz comprennent au moins un injecteur-mélangeur qui est situé dans une zone inférieure de ladite cuve s'étendant entre 0 et 25%, de préférence entre 0 et 15%, et plus préférentiellement entre 0 et 10%, de la hauteur de cuve mesurée depuis ledit fond de cuve, et qui est destiné à être immergé dans ledit gaz liquéfié contenu dans la cuve.

De préférence, ledit au moins un injecteur-mélangeur est configuré pour injecter un flux de gaz liquide dans une direction qui est inclinée vers le haut d'un angle α par rapport à un plan horizontal. Ledit angle α peut être compris entre 5° et 45°, de préférence entre 5 et 30°, et plus préférentiellement entre 5 et 20°. En variante, l'angle α peut être compris entre 5° et 85°, de préférence entre 15 et 75°, et plus préférentiellement entre 30 et 60°.

Selon un second aspect, l'invention propose un dispositif de stockage de gaz liquéfié, en particulier pour un navire de transport maritime de gaz liquéfié ou pour une installation terrestre, comportant :

- au moins une cuve de stockage de gaz liquéfié, qui comprend un fond de cuve et un plafond de cuve qui définissent entre eux une hauteur de cuve,
- des moyens de prélèvement de gaz, sous forme liquide et/ou gazeuse, dans ladite au moins une cuve, et
- des moyens d'injection de gaz sous forme liquide dans ladite cuve, qui sont de préférence reliés auxdits moyens de prélèvement de gaz,

caractérisé en ce que lesdits moyens d'injection de gaz comprennent au moins un injecteur-mélangeur qui est situé dans une zone supérieure de ladite cuve s'étendant entre 60 et 100% voire entre 75 et 100%, de préférence entre 60 et 98%, et plus préférentiellement entre 65 et 95%, voire encore plus préférentiellement entre 65 et 80% ou entre 80 et 95%, de la hauteur de cuve mesurée depuis ledit fond de cuve, et qui est destiné à être immergé dans ledit gaz liquéfié contenu dans la cuve.

Préférentiellement, au moins un injecteur-mélangeur est configuré pour injecter un flux de gaz liquide dans une direction qui est inclinée vers le bas d'un angle β par rapport à un plan horizontal. Ledit angle β peut être compris entre 5° et 45°, de préférence 5 et 30°, et plus préférentiellement entre 5 et 20°. En variante, l'angle β peut être compris entre 5° et 85°, de préférence entre 15 et 75°, et plus préférentiellement entre 30 et 60°.

Avantageusement, ledit au moins un injecteur-mélangeur est fixé à une paroi de ladite cuve. De préférence, ladite cuve comporte une paroi longitudinale latérale verticale reliée par une paroi en biais audit plafond de cuve, ledit au moins un injecteur-mélangeur étant fixé à une zone de liaison de ladite paroi longitudinale verticale à ladite paroi en biais. Ledit au moins un injecteur-mélangeur peut être fixé à une tôle surépaissie et/ou à au moins un bloc en bois de ladite zone de liaison. Cette tôle peut faire partie d'une membrane de la cuve et donc être, comme c'est le cas de la membrane, au contact du gaz liquéfié contenu dans la cuve (en présence de gaz liquéfié dans

la cuve, ou du moins en l'absence de fuite). Le bloc de bois peut lui être situé entre cette membrane et la coque du navire.

Dans chacun des aspects ci-dessus, le principe clé recherché est de pouvoir réinjecter du gaz liquéfié, qui est préalablement sous-refroidi ou pas, dans le liquide et pas dans le ciel gazeux contenu dans la cuve. En effet réinjecter la majorité de la puissance froide dans le ciel gazeux aura pour effet une chute de la pression significative, et le refroidissement du ciel gazeux qui forcera le flux de chaleur rentrant en partie haute de cuve. Une partie significative du gaz liquéfié réinjecté dans le ciel gazeux serait alors inutilement vaporisé, ce qui limiterait la puissance froide fournie au liquide. D'autant que celle-ci sera distribuée qu'à la surface libre du liquide, ce qui ferait que la cinétique de diffusion serait lente. Au contraire, l'invention propose de réinjecter la puissance froide directement dans le liquide sous la surface libre afin de réduire l'influence sur la température et la pression du ciel gazeux. De plus, injecter du gaz liquéfié sous la surface libre permet de créer un effet de mélange et de brassage en jouant sur la cinétique du liquide à la sortie de l'injecteur-mélangeur, son orientation, son élévation, etc. L'invention concerne également le cas où le gaz liquéfié ne serait pas forcément sous-refroidi avant son injection dans la cuve. L'injection de gaz liquéfié aurait alors pour essentielle fonction de mélanger le gaz liquéfié contenu dans la cuve. Ceci est particulièrement utile pour limiter l'évaporation du gaz liquéfié en particulier lorsque du gaz liquéfié sous refroidi est déversé en fond de cuve, ce gaz liquéfié sous-refroidi étant obtenu par reliquéfaction de gaz d'évaporation. Les évaporations forcées provenant de la cuve sont beaucoup plus riches en azote par rapport au liquide s'évaporant naturellement (à cause de la volatilité de l'azote par rapport au méthane). Le gaz évaporé est liquéfié par des moyens de reliquéfaction et renvoyé en fond de cuve. Le condensat est donc beaucoup plus lourd que le gaz liquéfié environnant (car il est plus riche en azote, mais aussi plus froid). Le liquide riche en azote s'accumule au fond de la cuve. En se réchauffant naturellement, des bulles d'azote se vaporisent et remontent à la surface ce qui enrichi le ciel gazeux en azote. Or, l'azote est difficilement condensable ce qui réduit la capacité du liquéfacteur et entraîne des difficultés

à contrôler la pression des cuves. Le phénomène est amplifié lorsque la cuve est presque vide car les bulles d'azote n'ont pas le temps de se re-dissoudre pendant la remontée vers la surface. C'est pour cette raison que l'injection par les rampes de pulvérisation en haut de cuve n'est jamais considérée avec ce type d'équipement, du fait du risque d'enrichissement en azote. En utilisation cuve presque vide, ce phénomène génère un vieillissement du talon qui limite la capacité du talon à refroidir les cuves avant le prochain chargement.

L'invention concerne également le cas où le gaz liquéfié serait surchauffé avant son injection dans la cuve. Le gaz liquéfié injecté aurait alors pour essentielle fonction d'être mélangé avec le gaz liquéfié contenu dans la cuve. Ceci est particulièrement utile pour limiter l'évaporation dudit gaz liquéfié surchauffé en particulier lorsqu'il est déversé en fond de cuve. Ledit gaz liquéfié surchauffé étant plus chaud donc plus léger que le gaz liquéfié environnant (plus froid), ce gaz liquéfié s'évaporerait sans dispositif de mélange, même en étant injecté en fond de cuve. En effet, étant plus léger, il s'élèverait dans le liquide environnant plus froid donc plus lourd, jusqu'à s'évaporer lorsque sa pression statique deviendrait plus faible que sa pression de bulle. C'est particulièrement vrai dans le cas où le niveau de liquide est faible dans la cuve car la pression statique en fond de cuve est plus faible en comparaison d'un niveau liquide plus élevé. L'utilisation d'un dispositif de mélange par effet venturi, succion, entraînement, etc., est particulièrement adaptée à l'injection dudit gaz liquéfié surchauffé car il permet une dilution d'au moins 4 fois. Ce gaz liquéfié surchauffé est obtenu par recondensation (c'est-à-dire mélange) de gaz d'évaporation pressurisé avec du gaz liquéfié provenant d'une cuve. Le gaz liquéfié surchauffé est normalement vaporisé pour être injecté sur le réseau de gaz terrestre. Si le réseau de gaz terrestre demande à l'unité de vaporisation d'arrêter l'envoi sur le réseau, le gaz liquéfié surchauffé peut alors être renvoyé dans la cuve via le dispositif de mélange tout en limitant l'évaporation naturelle du gaz stocké dans la cuve. Sans dispositif de mélange, les évaporations générées par l'injection dans la cuve dudit gaz liquéfié surchauffé génèrent des évaporations supplémentaires qui s'additionnent aux évaporations naturelles qui doivent alors être recondensées pour être réinjectées dans la cuve. Il en

résulte un réchauffement accéléré du gaz liquéfié contenu dans les cuves et donc une montée en pression plus rapide en comparaison de l'utilisation d'un dispositif de mélange.

L'injection de gaz liquéfié est ici réalisée au moyen d'un injecteur-mélangeur qui est configuré pour injecter un flux de gaz liquide et provoquer son mélange du liquide dans lequel il est injecté par effet venturi, succion, entraînement, etc.

Le dispositif selon l'invention peut comprendre une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément les unes des autres ou en combinaison les unes avec les autres :

- ledit au moins un injecteur-mélangeur est situé au plus près d'une paroi longitudinale latérale de ladite cuve ; dans la présente demande, on entend par « au plus proche » ou « à proximité », une distance inférieure à un mètre, et de préférence inférieure ou égale à 0,5 mètre, voire moins,
- lesdits moyens d'injection comprennent au moins une rangée horizontale d'injecteur(s)-mélangeur(s) qui sont configurés pour injecter des flux de gaz liquide dans des directions parallèles ou différentes,
- lesdits moyens d'injection comprennent au moins deux rangées horizontales d'injecteurs-mélangeurs disposées respectivement sur et/ou le long de deux parois longitudinales latérales de ladite cuve,
- lesdits moyens d'injection de gaz sont reliés par des moyens de reliquéfaction à des moyens de prélèvement de gaz d'ébullition dans ladite cuve ou dans une autre cuve,
- lesdits moyens de reliquéfaction sont configurés pour recondenser du gaz d'évaporation prélevé dans ladite cuve ou dans une autre cuve puis préssurisé, par échange de chaleur avec du gaz liquéfié prélevé dans ladite cuve ou dans une autre cuve,
- lesdits moyens d'injection de gaz sont reliés par des moyens de sous-refroidissement à des moyens de prélèvement de gaz liquide dans ladite cuve ou dans une autre cuve de stockage de gaz liquéfié,
- lesdits moyens de prélèvement sont configurés pour prélever du gaz liquide dans ladite zone inférieure,

- lesdits moyens de prélèvement comprennent au moins une pompe et des conduites située dans ladite cuve ou dans une autre cuve et destinée à être au moins en partie immergée dans ledit gaz liquéfié,
- ladite pompe est configurée pour avoir un débit ou une vitesse de rotor variable,
- ladite cuve est du type « tout remplissage » et est configurée pour être remplie à n'importe quel niveau,
- ladite cuve est du type « à remplissage restreint » et est configurée pour être remplie uniquement à 10% et moins, ou à 70% et plus,
- lesdits moyens de prélèvement et lesdits moyens d'injection sont situés dans ladite cuve et raccordés les uns aux autres par des conduites situées entièrement dans la cuve,
- les conduites s'étendent au moins en partie sensiblement parallèlement et à proximité d'une paroi de fond de la cuve, et de préférence jusqu'à au moins une paroi latérale de cette cuve,
- dans le cas où les moyens de prélèvement seraient situés au centre et au fond de la cuve, des conduites peuvent s'étendre dans des directions opposées le long de la paroi de fond et jusqu'aux parois latérales de la cuve,
- les conduites peuvent être configurées pour épouser la forme spécifique du fond de cuve et en particulier d'éventuels chanfreins de liaison entre les parois de fond et latérales de la cuve.
- lesdits moyens de prélèvement et lesdits moyens d'injection sont situés au droit d'un dôme liquide de ladite cuve, et équipent de préférence une tour de pompage accessible par ce dôme liquide,
- ledit au moins un injecteur-mélangeur est raccordé à une colonne de liquide de ladite tour de pompage, et supporté par cette colonne,
- ledit injecteur-mélangeur comprend une conduite principale de passage d'un jet principal de liquide, et une conduite secondaire de passage forcé d'un jet secondaire de liquide par effet venturi,
- lesdits moyens d'injection, voire également lesdits moyens de prélèvement, sont positionnés les uns par rapport aux autres et configurés de façon à ce

qu'ils génèrent des effets de refoulement et d'aspiration dans la cuve, ces effets générant un cycle de brassage prédéterminé du gaz liquéfié dans la cuve.

La présente invention concerne en outre un navire de transport maritime de gaz liquéfié, comportant au moins un dispositif tel que décrit ci-dessus, ce dispositif étant dépourvu de moyens de sous-refroidissement et de reliquéfaction entre lesdits moyens de prélèvement et d'injection, ladite cuve étant du type « tout remplissage » et étant configurée pour être remplie à n'importe quel niveau.

La présente invention concerne en outre un navire de transport maritime de gaz liquéfié, comportant au moins un dispositif tel que décrit ci-dessus, ce dispositif comportant des moyens de sous-refroidissement et/ou de reliquéfaction entre lesdits moyens de prélèvement et d'injection, ladite cuve étant du type « tout remplissage » ou « à remplissage restreint ».

La présente invention concerne en outre un navire de transport maritime de gaz liquéfié, comportant au moins un dispositif tel que décrit ci-dessus, ce dispositif étant dépourvu de moyens de sous-refroidissement et de reliquéfaction entre lesdits moyens de prélèvement et d'injection, ladite cuve étant du type « à remplissage restreint » et étant configurée pour être remplie uniquement à 10% et moins, ou à 70% et plus.

La présente invention concerne en outre un navire de transport maritime de gaz liquéfié, comportant au moins un dispositif tel que décrit ci-dessus, ce dispositif comportant des moyens de sous-refroidissement et/ou de reliquéfaction entre lesdits moyens de prélèvement et d'injection, ladite cuve étant du type « à remplissage restreint » et étant configurée pour être remplie uniquement à 10% et moins, ou à 70% et plus.

Dans le cas d'une injection en partie basse de cuve, le ou lesdits moyens d'injection sont orientés vers le haut afin de générer des effets de refoulement et d'aspiration dans la cuve et de générer un cycle de brassage à la fois pour une cuve presque vide (« ballast ») et pour une cuve presque pleine (« laden »). Dans le cas d'une cuve presque vide (talon liquide), cette configuration permet de brasser le liquide sur la majorité de la longueur de la

cuve (angle suffisamment faible, c'est-à-dire proche de l'horizontale), sans pour autant disperser le liquide dans l'espace gazeux car cela refroidirait le gaz et donc augmenterait les transferts thermiques. Un angle trop important (c'est-à-dire proche de la verticale) génèrerait une accumulation du liquide injecté proche de l'injecteur et des moyens de prélèvement et rendrait possible un re-prélèvement du liquide injecté vers des moyens de sous-refroidissement avec le risque de gel du liquide sous-refroidi (dans le cas d'une combinaison avec des moyens de sous-refroidissement situés entre les moyens de prélèvement et d'injection).

Dans le cas d'une cuve presque pleine, cette configuration permet de brasser le liquide sur la majorité de la hauteur de la cuve (angle suffisamment important, c'est-à-dire proche de la verticale), de telle sorte que la température du liquide soit homogène sur toute la hauteur de liquide. Un angle trop faible (c'est-à-dire proche de l'horizontale) génèrerait une accumulation du liquide injecté au fond de la cuve et proche des moyens de prélèvement et rendrait possible un re-prélèvement du liquide injecté vers des moyens de sous-refroidissement avec le risque de gel du liquide sous-refroidi (dans le cas d'une combinaison avec des moyens de sous-refroidissement situés entre les moyens de prélèvement et d'injection). Le risque est aussi de dépressuriser brutalement la cuve en cas d'homogénéisation du liquide sous-refroidi qui se serait accumulé en fond de cuve, avec une ouverture possible des soupapes de sécurité si la pression chute en dessous de l'atmosphère.

La présente invention concerne également un procédé d'injection de gaz sous forme liquide dans une cuve d'un navire tel que décrit ci-dessus.

Selon un premier mode de réalisation, l'injection (dans la zone inférieure) a lieu lorsque la cuve « à remplissage restreint » est remplie à 10% ou moins.

Selon une variante de réalisation, l'injection a lieu lorsque la cuve « tout remplissage » a un niveau quelconque de remplissage, l'angle d'injection (dans la zone inférieure) étant identique quel que soit ce niveau et le débit d'injection étant contrôlé en fonction de ce niveau. De préférence, plus le volume de liquide dans la cuve est important et plus le débit d'injection est important.

La présente invention concerne également un procédé d'injection de gaz sous forme liquide dans une cuve d'un navire tel que décrit ci-dessus, dans lequel l'injection dans la zone supérieure a lieu lorsque la cuve « à remplissage restreint » est remplie à 70% ou plus.

La présente invention concerne également un procédé d'injection de gaz sous forme liquide dans une cuve d'un navire tel que décrit ci-dessus, dans lequel l'injection dans la cuve est configurée pour empêcher la remontée de gaz liquéfié réchauffé le long de parois longitudinales latérales de cette cuve.

La présente invention concerne également un procédé d'injection de gaz sous forme liquide dans une cuve d'un navire tel que décrit ci-dessus, dans lequel le gaz liquéfié injecté a une température inférieure à celle du gaz liquéfié contenu dans ladite cuve.

Avantageusement, lesdits moyens d'injection, voire également lesdits moyens de prélèvement, sont contrôlés de façon à ce qu'ils génèrent des effets de refoulement et d'aspiration dans la cuve, ces effets générant un cycle de brassage prédéterminé du gaz liquéfié dans la cuve. Le cycle de brassage est avantageusement conçu de façon à ce que du gaz liquéfié circule sensiblement parallèlement à l'interface liquide-gaz dans la cuve, et à proximité de cette interface. Ceci permet de limiter le risque de formation d'une strate liquide chaude à l'interface, et donc d'évaporation du gaz liquéfié.

Dans la présente demande, on entend par :

- « cuve », tout réservoir ayant un volume interne de stockage de gaz liquéfié supérieur à 100m^3, et de préférence supérieur à 1 000m^3, voir 10 000m^3, voir 20 000m^3 ; et/ou tout réservoir configuré pour stocker du gaz liquéfié à une température de -163°C voire moins,
- cuve du type « tout remplissage », une cuve qui est configurée pour stocker un volume de gaz liquéfié quelconque, qui peut par exemple représenter 50% de son volume interne total ; un navire du type FSRU (*Floating Storage Regasification Unit*), ST (*Shore Tank*), GBS (*Gravity Base Structure*), LBV (*LNG Bunker Vessel*), LFS (*LNG Fuelled Ship*) est en général équipée d'une telle cuve,

- cuve du type « à remplissage restreint », une cuve qui est configurée pour stocker un volume de 10% et moins, et 70% et plus, de gaz liquéfié ; elle n'est ainsi pas conçue pour stocker un volume intermédiaire de gaz liquéfié, représentant par exemple 50% de son volume interne total, en particulier pour des raisons de sécurité, ce qui est le cas d'un navire méthanier qui est susceptible d'être soumis à des conditions de transport lors d'un voyage qui peuvent provoquer des mouvements de vague du gaz liquéfié dans la cuve ; un navire du type LNGC (méthanier) est en général équipée d'une telle cuve,
- un « navire », toute unité de transport maritime de gaz liquéfié, tel qu'un méthanier, un navire de soutage, etc.,
- des « moyens de reliquéfaction » ou « des moyens de recondensation », des moyens configurés pour provoquer la condensation de gaz et donc la transformation de ce gaz en gaz liquéfié, le gaz étant en général du BOG ou du NBOG ; ils peuvent comprendre par exemple des moyens de compression de gaz à des conditions de température et de pression permettant sa condensation,
- des moyens de « sous-refroidissement », des moyens configurés pour refroidir davantage du gaz liquéfié, qui est déjà en général à une température de -163°C voire moins, le sous refroidissement permettant par exemple de diminuer la température du gaz liquéfié d'environ 10° ; des moyens de sous-refroidissement comprennent par exemple des moyens d'évaporation ou de vaporisation de gaz liquéfié pour générer une énergie frigorifique, et des moyens d'échange de chaleur avec du gaz liquéfié pour que ce dernier soit sous refroidi grâce à cette énergie,
- les notions de « haut » et de « bas » ou de « supérieur » et « inférieur » s'apprécient par rapport à la position classique c'est-à-dire de fonctionnement d'un navire lorsqu'il est posé et flotte sur l'eau, et plus généralement par rapport au centre de la terre (le haut étant plus éloigné que le bas du centre de la terre).

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

L'invention sera mieux comprise et d'autres détails, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite à titre d'exemple non limitatif et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en coupe longitudinale d'un premier mode de réalisation d'un dispositif de stockage de gaz liquéfié selon l'invention,
- la figure 2 est une vue schématique en coupe transversale du dispositif de la figure 1,
- la figure 3 est une vue à plus grande échelle d'une partie de la figure 1,
- la figure 4 est une vue schématique en coupe longitudinale d'un second mode de réalisation d'un dispositif de stockage de gaz liquéfié selon l'invention,
- la figure 5 est une vue schématique en coupe transversale du dispositif de la figure 4,
- la figure 6 est une vue à plus grande échelle d'une partie de la figure 4,
- la figure 7 est une vue schématique en perspective et en coupe d'une cuve de stockage de gaz liquéfié,
- la figure 8 est une vue schématique en perspective d'une zone de liaison de parois d'une cuve, telle que celle de la figure 7,
- les figures 9 et 10 sont des vues très schématiques partielles de cuves ayant des géométries différentes,
- les figures 11 et 12 sont des vues très schématiques en coupe de variantes de réalisation du dispositif selon l'invention, la figure 9 représentant une vue en coupe du milieu de ce dispositif, et la figure 10 représentant une vue en coupe de chaque extrémité longitudinale de ce dispositif,
- la figure 13 est une vue très schématique de dessus d'une variante de réalisation du dispositif selon l'invention,
- les figures 14 à 26 sont des vues très schématiques en coupe de variantes de réalisation du dispositif selon l'invention,
- les figures 27 et 28 sont des vues schématiques, respectivement en coupe et en perspective, d'un exemple de réalisation d'un injecteur-mélangeur,

- la figure 29 est un schéma bloc illustrant plusieurs modes de réalisation d'un navire et d'un procédé selon l'invention,

- les figures 30 et 31 sont des vues similaires à celle de la figure 4 et représentent une même cuve qui est respectivement en « ballast » et donc remplie avec un talon de liquide, et en « laden » et est presque totalement remplie.

DESCRIPTION DETAILLEE

Comme évoqué dans ce qui précède, la température et la pression dans une cuve de stockage de gaz liquéfié (GNL) peuvent être contrôlées pour maîtriser notamment la production de NBOG dans la cuve.

Un dispositif de stockage de gaz liquéfié, en particulier pour un navire de transport maritime de gaz liquéfié, comporte en général :

- au moins une cuve de stockage de gaz liquéfié,
- des moyens de prélèvement de gaz, sous forme liquide et/ou gazeuse, dans la cuve, et
- des moyens d'injection de gaz sous forme liquide dans la cuve, qui sont reliés aux moyens de prélèvement de gaz.

Dans le cadre du premier objectif cité plus haut, le ciel gazeux est refroidi grâce à des rampes de pulvérisation de GNL sous-refroidi. Du GNL est prélevé par les moyens de prélèvement, est sous refroidi par des moyens de sous-refroidissement, puis est injecté par les rampes (moyens d'injection) en haut de cuve. La pulvérisation permet d'impacter directement la température et la pression du ciel gazeux en maximisant la surface d'échange entre les gouttelettes et le gaz afin de le condenser.

En pratique, deux rampes de pulvérisation sont classiquement disponibles et identiques : elles sont en général utilisées simultanément pour réaliser la mise en froid initiale, alors qu'une rampe seule permet de réaliser la mise en froid normale (ballast) avant chargement.

En cas d'utilisation de ce dispositif pour une cuve pleine, le GNL sous-refroidi est pulvérisé majoritairement sur l'interface liquide-gaz, ce qui est peu adapté si on souhaite impacter la température du liquide sur toute la hauteur de la cuve et donc tout le volume de liquide.

En cas d'utilisation d'une ou deux rampes en cas de ballast (cuve avec talon liquide), la température du ciel gazeux (y compris du plafond) est donc très froide (proche de l'équilibre = Température de rosée) et le flux thermique à travers l'isolation provenant de l'extérieur est donc augmentée. Sans pulvérisation de gaz sous-refroidi au moyen des rampes, le ciel gazeux se stratifie en température de manière significative (du gaz plus chaud se concentre en haut et du gaz plus froid se concentre en bas), ce qui réduit l'évaporation, et donc la puissance froide nécessaire pour contrôler la pression et la température dans la cuve. Si des moyens de sous-refroidissement sont utilisés en cas ballast alors que le ciel gazeux s'est réchauffé, outre d'augmenter le flux thermique, la pulvérisation de liquide sous-refroidi pourrait avoir comme effet d'augmenter la pression de cuve, car le GNL dispersé s'évaporerait en refroidissant l'isolant de la cuve qui s'est réchauffée.

Dans le cadre du second objectif, qui est de contrôler voire refroidir le GNL stocké, l'idéal serait de ré-injecter du GNL sous-refroidi dans la cuve. Cependant, le GNL sous-refroidi serait directement renvoyé dans la cuve sans être mélangé au GNL déjà présent dans la cuve. Par ailleurs, le GNL sous-refroidi d'environ 10° serait plus lourd que le GNL de la cuve et aurait du mal à se mélanger à ce dernier. Dans le cas où le GNL sous-refroidi serait réinjecté en fond de cuve, il se concentrerait en fond de cuve et il pourrait être directement re-prélevé par les moyens de prélèvement précités, ce qui nuirait à l'efficacité du sous-refroidissement. En effet, cela reviendrait à prélever du GNL déjà sous-refroidi et dont le sous-refroidissement aurait tendance à trop refroidir le GNL car la température de sortie des moyens de sous-refroidissement est limitée afin d'éviter le gel du GNL (principalement des composés lourds). Dès lors, il serait nécessaire de réduire la puissance instantanée des moyens de sous-refroidissement. Cependant, afin de ne pas limiter cette puissance (et éviter la recirculation de GNL sous-refroidi) et de réduire la consommation électrique de l'équipement (éviter de refroidir le ciel gazeux), l'invention propose d'injecter le GNL sous-refroidi sous l'interface liquide-gaz et par l'intermédiaire d'au moins un injecteur-mélangeur.

Les figures 1 à 3 illustrent un des aspects de l'invention dans lequel les moyens d'injection de gaz comprennent au moins un injecteur-mélangeur 10 qui est situé dans une zone supérieure de la cuve 12 s'étendant entre 60 et 100% de la hauteur de cuve mesurée depuis le fond de cuve 14. La hauteur de la cuve 12 est mesurée entre le fond de cuve 14 et le plafond de cuve 16. La référence 18 désigne l'interface liquide-gaz ou la surface libre du gaz liquéfié dans la cuve, le liquide formé par le gaz liquéfié étant plus lourd et donc sous le ciel gazeux qui est formé par évaporation naturelle du gaz liquéfié.

En plus de la cuve 12 et de l'injecteur-mélangeur 10, le dispositif de stockage de gaz liquéfié comporte des moyens de prélèvement de gaz, ici sous forme liquide. Les moyens de prélèvement comprennent ici une pompe 20 immergée dans le gaz liquéfié et située de préférence en fond de cuve. Le gaz liquéfié peut être prélevé et injecté dans la même cuve, ou dans une cuve différente.

La pompe 20 est raccordée à l'injecteur-mélangeur 10, directement ou par l'intermédiaire de moyens de sous-refroidissement 22. Les moyens de sous-refroidissement peuvent être configurés pour diminuer la température du gaz liquéfié prélevé par la pompe, d'environ 10°.

La cuve 12 peut être du type « tout remplissage » ou du type « à remplissage restreint ». Dans les deux cas, lorsqu'elle est remplie de gaz liquéfié (et ne comprend pas qu'un talon de gaz liquéfié en fond de cuve), elle est remplie à au moins 70% de son volume. En pratique, elle est remplie à un volume de 95% ou plus, et de préférence de 98,5%.

L'injecteur-mélangeur 10 est positionné et conçu pour injecter du gaz liquéfié prélevé (et éventuellement sous-refroidi) sous l'interface 18, de façon à ce que le flux de gaz liquéfié mélange le gaz liquéfié contenu dans la cuve 12.

Avantageusement, l'injecteur-mélangeur 10 est configuré pour injecter un flux de gaz liquéfié dans une direction qui est inclinée vers le bas d'un angle β par rapport à un plan horizontal (figure 3). L'angle β est par exemple compris entre 5° et 85°, de préférence entre 15 et 75°, et plus préférentiellement entre 30 et 60°.

Ceci permet de faciliter le mélange du gaz liquéfié dans la cuve, sur sensiblement toute la hauteur du gaz liquéfié et sur une distance la plus grande possible, comme cela est schématiquement représenté par les flèches à la figure 1.

Dans le cas d'une injection de gaz liquéfié sous-refroidi ou surchauffé, c'est-à-dire provenant d'un équipement de sous-refroidissement ou d'un recondenseur présenté plus haut, le(s) injecteur(s)-mélangeur(s) peu(ven)t avantageusement être fixé(s) sur la tour de pompage.

La cuve 12 a une forme générale parallélépipédique et allongée, mais peut aussi être chanfreinée, comme cela est représenté aux figures 1 et 2. La cuve 12 comprend une extrémité longitudinale arrière 12a et une extrémité longitudinale avant 12b, les termes arrière et avant faisant référence à l'arrière et l'avant du navire de transport et à son sens de déplacement. La cuve comprend en outre des parois longitudinales latérales 12c.

Dans l'exemple représenté, la pompe 20 et l'injecteur-mélangeur 10 sont situés à l'extrémité arrière 12a de la cuve 12.

L'injecteur-mélangeur 10 est configuré pour injecter un flux de gaz liquéfié vers l'avant de façon à favoriser un bon mélange du gaz liquéfié dans la cuve. Dans le cas où le gaz liquéfié injecté serait sous-refroidi, il serait plus froid et donc plus lourd que celui dans lequel il est injecté, ce qui justifie le positionnement en partie haute de la cuve légèrement sous la surface et faiblement orienté vers le bas et un angle β relativement faible pour mélanger au maximum l'avant de la cuve. Ceci permet de limiter la recirculation de gaz liquéfié sous-refroidi vers la pompe 20, et l'arrosage de la paroi de cuve opposée à l'injecteur-mélangeur 10. Par ailleurs, l'injection en haut de cuve favorise encore plus le mélange par diffusion par gravité du fait que le gaz liquéfié sous-refroidi a une densité légèrement plus importante que celui dans la cuve et donc il s'écoulera lentement vers le bas. Une injection juste en dessous du niveau liquide nominal lorsque la cuve est chargée sera donc recherchée, mais suffisamment sous la surface libre afin de ne pas aspirer de gaz du ciel gazeux, en particulier par effet venturi.

La pompe 20 et l'injecteur-mélangeur 10 peuvent être situés sensiblement au droit d'un « dôme liquide » de la cuve, schématiquement représenté par les majuscules LD (acronyme de l'anglais *Liquid Dome*). Dans ce cas, la pompe 20 et l'injecteur-mélangeur 10 peuvent être raccordées à des conduites verticales d'une « tour de pompage », connue sous l'appellation anglais « *pump tower* ». Ces conduites peuvent alors supporter l'injecteur 10.

En variante, l'injecteur-mélangeur 10 peut être fixé à un côté de la cuve 12. La figure 7 montre un exemple plus précis de forme générale d'une cuve 12 de stockage de gaz liquéfié. Cette cuve comprend une paroi longitudinale latérale 12c qui est verticale, et qui est reliée par des parois 12d, 12e en biais, respectivement au plafond de cuve 16 à au fond de cuve 14. Les dimensions des parois 12c, 12d et 12e sont variables, comme cela est schématiquement représenté aux figures 9 et 10. Dans ces dessins, la référence H désigne la hauteur de cuve évoquée plus haut, et mesurée entre le fond de cuve 14 et le plafond de cuve 16. H est par exemple supérieur ou égale à 15m, et peut être de 27m par exemple.

La cuve 12 est en général du type à membranes, c'est-à-dire que ses parois 12c, 12d et 12e ainsi que son fond 14 sont formées par une succession de couches comportant par exemple, de l'intérieur de la cuve vers l'extérieur, une membrane en tôle, un isolant, une membrane en tôle, un isolant puis la coque du navire. Dans les zones de liaison des parois 12c, 12d et 12e, telles que la zone identifiée par la flèche à la figure 7, la cuve est renforcée par des structures comportant du blocs de bois 30 et des renforts métalliques 32 en tôle qui est surépaissie par rapport à la tôle utilisée pour les membranes.

Les renforts 32 peuvent faire partie de la membrane de la cuve qui est au contact du gaz liquéfié contenu dans la cuve. La cuve peut comprendre une seule membrane et les renforts 32 font alors partie de cette membrane, ou bien la cuve comprend deux membranes, respectivement primaire et secondaire, entre lesquelles est disposée une couche isolante, et les renforts 32 font alors partie de la couche primaire et sont donc destinés à être au contact du gaz liquéfié.

Le bloc de bois 30 peut lui être situé entre la membrane (primaire) de la cuve et la coque du navire.

L'injecteur-mélangeur 10 du dispositif peut être fixé à la cuve 12 dans une telle zone de liaison, telle que celle entre la paroi latérale 12c et la paroi de biais 12d, comme cela est schématiquement représenté aux figures 9 et 10.

Comme évoqué dans ce qui précède en relation avec les figures 1 à 3, l'injecteur-mélangeur 10 est positionné de façon à ce qu'il puisse entraîner un mélange d'un volume optimal de gaz liquéfié dans la cuve. La puissance de l'injecteur-mélangeur, c'est-à-dire le débit de flux liquide qu'il peut délivrer, dépend notamment de la puissance de la pompe 20. Avantageusement, cette pompe est celle équipant déjà la cuve et en particulier la tour de pompage précitée et a donc une puissance limitée, par exemple inférieure ou égale à $100m^3/h$, et par exemple inférieure ou égale à $60m^3/h$.

La pompe pourrait être du type à vitesse et donc à débit variable. Ceci permet notamment d'adapter la puissance de la pompe et donc le débit du flux de liquide injecté par l'injecteur-mélangeur au volume de gaz liquéfié dans la cuve et donc au niveau de remplissage de la cuve.

Pour remédier à ceci et permettre un mélange du volume total de gaz liquéfié dans la cuve, il est envisageable d'équiper la cuve de plusieurs injecteurs-mélangeurs 10.

Dans tous les concepts illustrés par les figures 9 à 20, c'est-à-dire dans lesquels des rampes d'injecteurs – mélangeurs sont localisés en haut de cuve, sous la surface liquide, les injecteurs – mélangeurs sont avantageusement positionnés proches des parois verticales de la cuve, car l'un des objectifs est d'empêcher la remontée du GNL réchauffé par les parois verticales. En effet, le GNL dans la cuve est réchauffé à proximité des parois verticales. Devenant alors plus chaud que le GNL environnant, il devient plus léger et s'élève donc en longeant les parois verticales. Comme représenté dans la figure 13 qui est une vue de dessus d'une cuve, l'espace annulaire intérieur à la cuve, en contact avec les parois verticales est le lieu des remontées du GNL réchauffé. Sans dispositif de mélange, le GNL réchauffé atteint la surface et forme une strate liquide plus chaude à la surface, qui s'évapore préférentiellement, et ce

malgré que le GNL en profondeur soit plus froid que le GNL de surface. Cette évaporation augmente la pression dans la cuve. Le positionnement des rampes d'injecteur(s) – mélangeur(s) dans le liquide en partie haute permet donc d'empêcher la remonté du liquide réchauffé et la formation de la strate liquide chaude en surface.

La figure 13 représente un exemple de cuve 12 équipée de plusieurs injecteurs-mélangeurs 10 qui sont répartis en deux rangées horizontales respectivement sur les deux côtés longitudinaux de la cuve. Cette cuve est vue du dessus, la référence LD désignant le dôme liquide et la référence GD désignant le dôme gaz de la cuve. Le trait T1 représente la zone de liaison entre la paroi de biais 12d et le plafond de cuve 16, et le trait T2 représente la zone de liaison entre cette paroi de biais 12 et la paroi latérale 12c. Des injecteurs-mélangeurs 10 sont régulièrement répartis sur cette zone, le long de la cuve.

Les injecteurs-mélangeurs 10 d'une cuve ou d'une rangée peuvent avoir des orientations similaires ou différentes. Dans l'exemple de réalisation de la figure 13, les deux injecteurs-mélangeurs 10 situés aux extrémités longitudinales de la cuve sur chaque rangée, sont orientés vers le fond de cuve, d'un angle βmin, par exemple compris entre 0 et 45° (figure 12), de préférence entre 0° et 30°, et plus préférentiellement entre 5° et 15°. Cet angle permet de mélanger le plus de gaz liquéfié proche de la paroi transversale verticale car c'est proche des surfaces verticales que le gaz liquéfié se réchauffe puis s'élève vers la surface pour former la strate liquide chaude dont on souhaite éviter la formation. Les autres injecteurs-mélangeurs situés entre ceux situés aux extrémités longitudinales de la cuve de chaque rangée, sont orientés vers le fond de cuve, d'un angle βmax, qui est supérieur à βmin, et par exemple compris entre 45 et 90°, de préférence entre 70° et 90°, et plus préférentiellement entre 80° et 85° (figure 11).

Comme on le voit dans les figures 11 et 12, il est préférable de contrôler l'angle β de sorte à mélanger le minimum de gaz liquéfié dans la cuve, et le maximum de gaz liquéfié en contact avec les parois verticales. Si l'angle est trop faible et que les injecteurs-mélangeurs injectent du gaz liquéfié directement

vers le centre de la cuve, le risque est de mélanger un volume central important de gaz liquéfié de la cuve, schématiquement désigné par la référence V. Or, mélanger un grand volume de gaz liquéfié nécessite une puissance de pompage importante, ce qui aurait pour effet non voulu de réchauffé le gaz liquéfié et donc d'augmenter plus rapidement la pression de la cuve.

Dans le cas de la figure 11, la strate liquide de surface est aspirée et refoulée en profondeur afin de la mélanger avec la cargaison. L'inclinaison des injecteurs-mélangeurs 10 vers le bas permet d'aspirer cette strate liquide de surface et de mélanger un faible volume. Les injecteurs-mélangeurs situés à l'avant et à l'arrière de la cuve sont orientés vers le centre de la cuve afin d'éviter que la remontée de GNL réchauffé par les parois verticales avant et arrière.

La figure 14 illustre un cas où les injecteurs-mélangeurs sont orientés vers le haut de cuve et ne permettent pas de mélanger un volume inférieur de gaz liquéfié contenu dans la cuve. La strate liquide est efficacement brisée du fait de la proximité des injecteurs-mélangeurs avec la surface ce qui permet avantageusement de réduire la puissance nécessaire au renouvellement de cette strate liquide de surface mais la faible puissance de pompage risque tout de même de réchauffer le GNL qui reste dans la partie supérieure de la cuve. La position des injecteurs-mélangeurs est avantageusement rendue possible du fait de la présence de l'angle renforcé (zone de liaison décrite précédemment) entre la paroi verticale et la paroi oblique supérieure. Les injecteurs-mélangeurs sont orientés vers le haut de cuve, d'un angle βmax, qui est supérieur à βmin, et par exemple compris entre 0 et 60°, de préférence 0° et 30°, et plus préférentiellement 15° et 30° (figure 14).

Les figures 15 et 16 illustrent d'autres cas où l'injecteur-mélangeur d'une première rangée latérale, et l'injecteur-mélangeur de la seconde rangée latérale et situé en regard de l'injecteur-mélangeur de la première rangée, n'ont pas les mêmes orientations. Dans le cas de la figure 15, la strate liquide est efficacement brisée du fait de la proximité des injecteurs-mélangeurs avec la surface ce qui permet avantageusement de réduire la puissance nécessaire au renouvellement de cette strate liquide de surface mais la faible puissance de

pompage risque tout de même de réchauffer le GNL qui reste dans la partie supérieure de la cuve. Une première rampe d'injecteurs-mélangeurs orientée vers le haut refoule du gaz liquéfié vers la deuxième rampe d'injecteurs-mélangeurs opposée latéralement et orienté horizontalement qui la refoule vers la première rampe d'injecteurs-mélangeurs. Les premiers injecteurs-mélangeurs sont orientés vers le haut de cuve, d'un angle βmax, qui est supérieur à βmin, et par exemple compris entre 0 et 60°, de préférence entre 15° et 60°, et plus préférentiellement entre 30° et 45° (figure 15). Les deuxièmes injecteurs-mélangeurs sont orientés vers le fond de cuve, d'un angle βmax, qui est supérieur à βmin, et par exemple compris entre 0 et 30°, et de préférence entre 0° et 15° (figure 15). Le volume mélangé semble faible. Les deux rampes fonctionnant de concert favorise une plus faible puissance de mélange. Dans le cas de la figure 16, la particularité par rapport au cas de la figure 15 est l'orientation de la deuxième rampe d'injecteurs-mélangeurs, qui est avantageusement orientée vers le fond d'un angle β afin de refouler en profondeur et de mélanger la strate liquide de surface avec le GNL du fond plus froid. β est compris entre βmax, qui est supérieur à βmin, et est par exemple compris entre 90 et 30°, de préférence entre 90° et 60°, et plus préférentiellement entre 85° et 75° (figure 16).Le volume mélangé semble faible. Les deux rampes fonctionnant de concert favorise une plus faible puissance de mélange et donc un faible réchauffement lié au pompage.

Des injecteurs-mélangeurs 10 ayant des orientations différentes peuvent toutefois être associés entre eux pour que l'ensemble du volume de gaz liquéfié stocké dans une cuve soit efficacement mélangé et donc impacté par le gaz liquéfié injecté dans la cuve.

Les figures 17 à 20 illustrent plusieurs possibilités d'alimentation des injecteurs-mélangeurs. La figure 17 illustre le cas ou les rangées des deux côtés sont alimentés en parallèle. La figure 18 illustre le cas ou les rangées des deux côtés sont alimentés de manière indépendante. La figure 19 illustre le cas ou la cuve comprend une ou plusieurs rangée(s) dont les conduites d'alimentation 34 traversent une paroi de la cuve, et la figure 20 illustre le cas ou la cuve comprend une ou plusieurs rangée(s) dont les conduites

d'alimentation 34 ne traversent pas de paroi de la cuve. Les conduites 34 sont alors logées, avec la pompe et les injecteurs-mélangeurs, dans la cuve, de façon à avoir un système entièrement autonome. C'est particulièrement intéressant car, dans le cas des navires propulsés au GNL, le code peut requérir d'isoler la cuve en cas d'avarie sur le navire ou une partie du navire et le système de mélange ne serait alors plus opérationnel si la cuve était isolée.

Les figures 4 à 6 illustrent un autre des aspects de l'invention dans lequel les moyens d'injection de gaz comprennent au moins un injecteur-mélangeur 10 qui est situé dans une zone inférieure de la cuve 12 s'étendant entre 0 et 25% de la hauteur de cuve mesurée depuis le fond de cuve 14.

En plus de la cuve 12 et de l'injecteur-mélangeur 10, le dispositif de stockage de gaz liquéfié comporte des moyens de prélèvement de gaz, ici sous forme liquide. Les moyens de prélèvement comprennent ici une pompe 20 immergée dans le gaz liquéfié et située de préférence en fond de cuve.

Le gaz liquéfié peut être prélevé et injecté dans la même cuve, ou dans une cuve différente.

La pompe 20 est raccordée à l'injecteur-mélangeur 10, directement ou par l'intermédiaire de moyens de sous-refroidissement 22. Les moyens de sous-refroidissement sont par exemple du type précité. Les moyens de sous-refroidissement peuvent être configurés pour diminuer la température du gaz liquéfié prélevé par la pompe, d'environ 10°C.

La cuve 12 peut être du type « tout remplissage » ou du type « à remplissage restreint ». Dans les deux cas, elle peut être remplie avec un talon de gaz liquéfié en fond de cuve, représentant au plus 10% du volume interne total de la cuve. Dans le cas d'une cuve tout remplissage, cette cuve peut comprendre un volume quelconque de gaz liquéfié.

L'injecteur-mélangeur 10 est positionné et conçu pour injecter du gaz liquéfié prélevé (et éventuellement sous-refroidi) sous l'interface 18, de façon à ce que le flux de gaz liquéfié mélange le gaz liquéfié contenu dans la cuve 12.

L'injection et le mélange de gaz liquéfié dans le talon d'une cuve permet

de limiter les évaporations du talon et le conserver froid pour le refroidissement avant chargement, sans pour autant refroidir l'atmosphère de la cuve. Le fait de conserver un talon liquide froid permet de réduire l'excédent de gaz au début du chargement.

L'injection et le mélange de gaz liquéfié dans un volume plus important d'une cuve permet de limiter le risque de stratification en température du gaz liquéfié dans la cuve. Il est préférable de s'assurer que la cinétique de mélange et l'orientation du flux de liquide permettent d'assurer un mélange suffisant dans le sens de la hauteur de la cuve. En effet, le ciel gazeux a naturellement tendance à stratifier en température lorsqu'il y a moins d'évaporation. C'est-à-dire que le gaz chaud s'accumule au niveau du plafond car il est plus léger, ce qui réduit très fortement le flux thermique venant de l'extérieur. Refroidir l'atmosphère de la cuve (via un retour par des rampes de pulvérisation) augmenterait donc le flux thermique et nécessiterait donc d'utiliser le sous-refroidissement à plus grande capacité pour compenser le flux thermique, ce qui représenterait une perte d'énergie et donc de gaz liquéfié. Si le ciel gazeux a stratifié en température, refroidir l'atmosphère de la cuve, via un retour par des rampes de pulvérisation, même si ce GNL est sous-refroidi, pourrait avoir comme effet d'augmenter la pression de cuve, car le GNL dispersé s'évaporerait en refroidissant l'isolant de la cuve qui s'est réchauffée. C'est une fois l'isolant refroidi que l'injection de GNL sous-refroidi permettrait de contrôler voire baisser la pression de cuve. L'injection et le mélange de gaz liquéfié dans le talon d'une cuve permettrait donc d'agir contrôler/baisser la pression de cuve instantanément même dans le cas où le ciel gazeux s'est réchauffé.

Avantageusement, l'injecteur-mélangeur 10 est configuré pour injecter un flux de gaz liquéfié dans une direction qui est inclinée vers le haut d'un angle α par rapport à un plan horizontal (figure 6). L'angle α est par exemple compris entre 5° et 85°, de préférence entre 15 et 75°, et plus préférentiellement entre 30 et 60°.

Comme on le voit dans les figures 4, 6, 21 à 24, 30 et 31 qui illustrent des cuves où le dispositif d'injection est positionné en bas de cuve, il est préférable de contrôler l'angle α de sorte que le dispositif de mélange soit

utilisation en cas ballast (figures 4, 23 et 24 et 30) ainsi qu'en cas laden (figures 21, 22 et 30).

- Dans le cas ballast (cuve presque vide), cette configuration permet de brasser le liquide sur la majorité de la longueur de la cuve (grande distance via un angle suffisamment faible, c'est-à-dire proche de l'horizontale). Un angle trop important (c'est-à-dire proche de la verticale) pourrait disperser le liquide dans l'espace gazeux, ce qui refroidirait le gaz et donc augmenterait les transferts thermiques. Dans le cas d'utilisation de moyens de sous-refroidissement 22, un angle trop important génèrerait aussi une accumulation du liquide injecté proche de l'injecteur et des moyens de prélèvement et rendrait possible un re-prélèvement du liquide injecté vers les moyens de sous-refroidissement ; le risque est de geler le liquide sous-refroidi.

- Dans le cas laden (cuve presque pleine), un angle suffisamment important (c'est-à-dire proche de la verticale), permet de brasser le liquide sur la majorité de la hauteur de la cuve, de telle sorte que la température du liquide soit homogène sur toute la hauteur de liquide, et ainsi éviter la formation d'une strate liquide chaude à la surface. Un angle trop faible (c'est-à-dire proche de l'horizontale), ne permettrait pas d'atteindre la surface liquide où se forme la strate liquide chaude. Dans le cas d'utilisation de moyens de sous-refroidissement, un angle trop faible génèrerait une accumulation du liquide injecté au fond de la cuve et proche des moyens de prélèvement et rendrait possible un re-prélèvement du liquide injecté vers les moyens de sous-refroidissement ; le risque est de geler le liquide sous-refroidi. Le risque est aussi de dépressuriser brutalement la cuve en cas d'homogénéisation du liquide sous-refroidi qui se serait accumulé en fond de cuve, avec une ouverture possible des soupapes de sécurité si la pression chute en dessous de l'atmosphère.

Toujours dans le cas des figures 4, 6, 21 à 24, 30 et 31, le débit injecté pourra être avantageusement contrôlé en fonction de la hauteur de liquide dans la cuve. Dans une cuve presque vide, le débit pourra être réduit de telle sorte de limiter la puissance consommée des moyens de prélèvement et de ne pas disperser le liquide dans l'espace gazeux (ce qui refroidirait le gaz et donc

augmenterait les transferts thermiques). Le débit pourra être augmenté de telle sorte de brasser le liquide sur la majorité de la hauteur de la cuve, afin d'atteindre la surface et ainsi d'éviter la formation d'une strate liquide chaude à la surface. Ce contrôle de débit pourra être réalisé de plusieurs sortes, par exemple par un variateur de vitesse du moyen de prélèvement ou par un jeu de vannes de contrôle.

Ceci permet de faciliter le mélange du gaz liquéfié dans la cuve, sur sensiblement toute la hauteur du gaz liquéfié et sur une distance la plus grande possible, comme cela est schématiquement représenté par les flèches à la figure 4.

La cuve 12 a une forme générale parallélépipédique et allongée, et peut être chanfreinée comme cela est visible aux figures 4 et 5. La cuve 12 comprend une extrémité longitudinale arrière 12a et une extrémité longitudinale avant 12b.

Dans l'exemple représenté, la pompe 20 et l'injecteur-mélangeur 10 sont situés à l'extrémité arrière 12a de la cuve 12. Ils peuvent être situés sensiblement au droit du dôme liquide de la cuve. Dans ce cas, la pompe 20 et l'injecteur-mélangeur 10 peuvent être raccordées à des conduites verticales de la tour de pompage. Ces conduites peuvent alors supporter l'injecteur 10.

Comme évoqué dans ce qui précède, l'injecteur-mélangeur 10 est positionné de façon à ce qu'il puisse entraîner un mélange d'un volume optimal de gaz liquéfié dans la cuve. La puissance de l'injecteur-mélangeur, c'est-à-dire le débit de flux liquide qu'il peut délivrer, dépend notamment de la puissance de la pompe 20. Avantageusement, cette pompe est celle équipant déjà la cuve et en particulier la tour de pompage et a donc une puissance limitée, par exemple inférieure ou égale à 100m^3/h, et par exemple inférieure ou égale à 60m^3/h.

La pompe pourrait être du type à vitesse et donc à débit variable. Ceci permet notamment d'adapter la puissance de la pompe et donc le débit du flux de liquide injecté par l'injecteur-mélangeur au volume de gaz liquéfié dans la cuve et donc au niveau de remplissage de la cuve.

Pour remédier à ceci et permettre un mélange du volume total de gaz liquéfié dans la cuve, il est envisageable d'équiper la cuve de plusieurs

injecteurs-mélangeurs 10, comme illustré à la figure 13 et décrit dans ce qui précède.

Comme on le voit dans les figures 21 à 24 qui illustrent des cuves tout remplissage ou à remplissage restreint, il est préférable de contrôler l'angle α de sorte à mélanger le maximum de gaz liquéfié dans la cuve. Si l'angle α est trop faible et que les injecteurs-mélangeurs injectent du gaz liquéfié directement vers la paroi de fond, le risque est de ne pas mélanger tout le gaz liquéfié de la cuve. Des injecteurs-mélangeurs orientés vers le bas peuvent être associés dans une même cuve à des injecteurs-mélangeurs orientés vers le haut (figures 11-13 et 24).

Des injecteurs-mélangeurs ayant des orientations différentes peuvent ainsi être associés entre eux pour que l'ensemble du volume de gaz liquéfié stocké dans une cuve soit efficacement mélangé et donc impacté par le gaz liquéfié injecté dans la cuve.

Les orientations et le nombre des injecteurs-mélangeurs 10 sont donc choisis pour favoriser un bon mélange du gaz liquéfié dans la cuve, limiter la recirculation de gaz liquéfié sous-refroidi vers la pompe, et légèrement vers le haut pour limiter l'accumulation du gaz sous-refroidi qui est plus lourd (stratification en température du liquide si la cuve est remplie). L'injection au plus proche du fond de la cuve permet au gaz liquéfié injecté de rester dans le liquide à faible remplissage, de limiter au maximum le refroidissement du ciel gazeux (au pire, l'injection provoquera une déformation de la surface libre du gaz liquéfié à l'interface), et de ne pas aspirer de gaz par effet venturi par exemple.

Les dispositifs des figures 21 à 24 montrent que les moyens de prélèvement de liquide (pompe 20) peuvent être reliés aux injecteurs-mélangeurs 10 par des conduites 34, et l'ensemble (y compris les conduites 34) est situé à l'intérieur de la cuve, ce qui évite d'avoir des traversées de parois susceptibles de générer des problèmes d'étanchéité.

Les conduites s'étendent au moins en partie sensiblement parallèlement et à proximité de la paroi de fond de la cuve, et de préférence jusqu'à au moins une paroi latérale de cette cuve. Dans le cas illustré dans les dessins où la

pompe est située au centre et au fond de la cuve, les conduites peuvent s'étendre dans des directions opposées le long de la paroi de fond et jusqu'aux parois latérales de la cuve. Les conduites peuvent être configurées pour épouser la forme spécifique du fond de cuve et en particulier celle des chanfreins de liaison entre les parois de fond et latérales de la cuve.

Dans la variante de réalisation de la figure 25, une rampe d'injecteur(s)-mélangeur(s) en partie supérieure de cuve est combinée avec une autre rampe en partie inférieure afin qu'elles puissent fonctionner de concert. Celle en partie haute refoule le liquide de surface afin d'empêcher la formation d'une strate liquide chaude en surface vers les injecteurs positionnés en fond de cuve. Le liquide aspiré est celui en contact avec la paroi verticale pour le renvoyer vers la première rampe d'injecteurs. Cette circulation forcée du liquide aux abords des parois verticales et de la surface permet d'empêcher la formation d'une strate liquide (car la strate liquide de surface est constituée de GNL réchauffé à travers les parois verticales).

Dans la variante de réalisation de la figure 26, une rampe d'injecteur(s)-mélangeur(s) en partie supérieure de cuve est combinée avec une autre rampe en partie inférieure afin qu'elles puissent fonctionner de concert. Celle en partie haute refoule le liquide de surface vers le fond afin d'empêcher la formation d'une strate liquide chaude en surface vers les injecteurs positionnés en fond de cuve. Cette circulation forcée du liquide aux abords des parois verticales et de la surface permet d'empêcher la formation d'une strate liquide (car la strate liquide de surface est constituée de GNL réchauffé à travers les parois verticales). En effet, l'angle des éjecteurs permet de renouveler efficacement le liquide en contact avec les parois verticales.

Comme évoqué dans ce qui précède, les deux aspects de l'invention peuvent être combinés si bien qu'une même cuve peut être équipée de plusieurs injecteurs-mélangeurs donc certains sont orientés vers le haut et d'autres vers le bas. Les injecteurs-mélangeurs peuvent en outre être orientés plus vers la droite ou plus vers la gauche, c'est-à-dire plus vers l'avant ou plus vers l'arrière du navire dans le cas où les injecteurs-mélangeurs sont situés sur

les côtés longitudinaux du navire. Plusieurs configurations de positionnements et d'orientations des injecteurs-mélangeurs d'une cuve sont ainsi envisageables.

Les figures 1, 11-12 et 14 à 26 illustrent un autre avantage de l'invention.

Les injecteurs-mélangeurs 10, et éventuellement les pompes 20, sont positionnés les uns par rapport aux autres et configurés de façon à générer à la fois des effets d'aspiration dans la cuve et des effets de refoulement dans la cuve. Ces effets d'aspiration et de refoulement provoquent un cycle de brassage prédéterminé du gaz liquéfié dans la cuve, qui est illustré par les flèches formant des boucles fermées.

Les injecteurs-mélangeurs 10 peuvent à eux seuls générer un effet de refoulement par injection de gaz liquéfié et un effet d'aspiration du fait de la dépression créée dans la zone d'injection. On comprendra par ailleurs que les pompes 20 peuvent générer un effet d'aspiration.

Le cycle de brassage est avantageusement conçu de façon à ce que du gaz liquéfié circule sensiblement parallèlement à l'interface liquide-gaz dans la cuve, et à proximité de cette interface. Ceci permet de limiter le risque de formation d'une strate liquide chaude à l'interface, et donc d'évaporation du gaz liquéfié.

Les déplacements naturels convectifs de gaz liquéfié, dus aux variations de température du gaz liquéfié dans la cuve, complètent ce cycle de brassage. C'est par exemple le cas du gaz liquéfié très froid qui est plus lourd que le gaz liquéfié plus chaud, ce dernier ayant tendance à remonter vers l'interface liquide-gaz dans la cuve. Ce gaz liquéfié peut remonter par exemple le long des parois latérales de la cuve, en particulier lorsqu'un cycle de brasage a lieu au centre de la cuve.

Dans les figures 11 et 12, l'injection vers le bas et au niveau des parois latérales de la cuve provoquent directement le refoulement de gaz liquéfié vers le bas le long de ces parois, et indirectement (par effet induit) l'aspiration de gaz liquéfié depuis le centre de la cuve vers les parois et en particulier vers les injecteurs-mélangeurs.

Les effets constatés sont opposés dans la figure 14. L'injection vers le haut et au niveau des parois latérales de la cuve provoquent directement le refoulement de gaz liquéfié vers le haut, et indirectement l'aspiration de gaz liquéfié depuis le centre de la cuve vers les parois et en particulier vers les injecteurs-mélangeurs.

Dans le cas des figures 15 et 16, les injecteurs-mélangeurs situés sur un des côtés de la cuve, à gauche sur les dessins, sont orientés vers le haut et refoulent du gaz liquéfié vers les injecteurs-mélangeurs situés du côté opposé, qui sont eux orientés vers le bas et refoulent du gaz liquéfié vers les autres injecteurs-mélangeurs. Le refoulement de gaz liquéfié en sortie des injecteurs-mélangeurs crée des dépressions au niveau des injecteurs-mélangeurs qui attirent le gaz liquéfié refoulé par les autres injecteurs-mélangeurs, d'où la notion de boucle fermée et donc de cycle de brassage.

Comme cela est visible aux figures 21 à 26, les cycles de brassage induits par les injecteurs-mélangeurs situés sur l'un des côtés de la cuve peuvent être symétriques ou différents de ceux générés par les injecteurs-mélangeurs situés sur l'autre côté de la cuve. Dans ces figures où la pompe 20 est immergée, elle génère elle-même un effet d'aspiration dans la cuve qui participe activement à la création du cycle de brassage. La pompe peut être située au centre de la cuve et générer un effet d'aspiration qui, combiné aux effets de refoulement des injecteurs-mélangeurs situés sur les côtés de la cuve, peut induire un cycle de brassage unique dans la cuve (figures 22 et 24-26) ou des cycles de brassage distincts sur les deux côtés de la cuve (figures 21 et 23).

Les figures 27 et 28 montrent un exemple particulier d'injecteur-mélangeur 10. Cet injecteur-mélangeur 10 comprend une conduite principale 40 de passage d'un jet principal 42 de liquide, et une conduite secondaire 44 coaxiale à la conduite principale 40 pour le passage forcé d'un jet secondaire 46 de liquide par effet venturi en sortie de la conduite principale 40. Les jets 42, 46 se mélangent alors dans la conduite secondaire 44 et ces jets vont ensuite se mélanger avec le gaz liquéfié 48 dans lequel ils sont injectés, en sortie de la conduite secondaire 44.

Un exemple de rapport entre les débits des différents jets est :

o jet principal 42 = 1 part, par exemple 25m^3/h,

o jet secondaire 46 = 3 parts, par exemple 75m^3/h,

o mélange des jets 42 et 46 = 4 parts, par exemple 100m^3/h,

o débit d'entraînement du gaz liquéfié 48 = 12 à 80 parts.

Cet exemple montre l'efficacité d'un injecteur-mélangeur à effet venturi, qui permet une dilution par quatre du débit de liquide sous-refroidi (sans considérer le débit induit). Il permet en outre déjà un mélange du gaz liquéfié sous-refroidi et limite le risque d'accumulation (stratification) en partie basse de la cuve, et l'effet d'entraînement plus important avec un fluide moins dense et moins visqueux que l'eau.

L'utilisation d'une pompe à débit variable ou d'une pompe plus puissante, comme évoqué dans ce qui précède, permettrait d'augmenter le débit du jet principal mais aussi la vitesse de déchargement et donc la portée du jet. Néanmoins, il serait contre-productif d'augmenter excessivement ce débit car une pompe plus puissante générerait plus de chaleur ce qui augmenterait les évaporations dans la cuve (or par exemple, le but du sous-refroidisseur est de refroidir). Chaque bar de perte de charge entre le jet principal et le jet secondaire peut par exemple augmenter la portée du jet d'environ cinq mètres.

La figure 29 illustre et résume plusieurs exemples d'application des différents aspects de l'invention.

A- La partie droite du dessin illustre les cas pour lesquels il n'y a pas de moyens de refroidissement et/ou de recondensation entre les moyens de prélèvement (pompe) et les moyens d'injection (injecteur-mélangeur) :

A-1- Lorsque la cuve est du type à remplissage restreint (type LNGC) :

Ce concept est particulièrement pertinent pour les stockages des méthaniers car les remplissages intermédiaires ne sont pas autorisés (10% à 70% non autorisé). Qui plus est, le phénomène de formation de la strate liquide chaude à faible remplissage (talon) est peu probable, donc un système de mélange sur talon est moins efficace.

L'invention consiste donc en une ou plusieurs rampes d'injecteurs-mélangeurs localisées dans le liquide au plus proche de l'interface liquide-gaz.

Les injecteurs-mélangeurs sont en haut de cuve, dans le liquide, proches de l'interface car l'objectif est de renouveler la strate liquide chaude à l'interface. Ce positionnement est donc le plus efficace pour atteindre la surface étant donné une hauteur de cuve importante (jusqu'à 27m sur les méthaniers).

Considérant la strate liquide chaude en surface et les flux thermiques provenant des parois verticales, une distribution et une orientation des injecteurs-mélangeurs peut permettre de ne pas mélanger le cœur du liquide et donc réduire la puissance de mélange (car ne participant pas à la formation de la strate liquide chaude), comme dans ce qui précède.

Etant donné ce positionnement des injecteurs-mélangeurs (proche de la surface), la pompe peut être du type à débit variable afin de réduire la puissance et donc l'apport thermique généré par le mélange (et donc d'augmenter le temps de montée en pression).

A-2- Lorsque la cuve est du type tout remplissage (type LFS, FSRU, GBS, RT, LBV) :

Le dispositif comprend des injecteurs-mélangeurs positionnés en fond de cuve et orientés vers le haut. La pompe est idéalement contrôlée de façon à ce que le débit et la pression d'alimentation des injecteurs-mélangeurs soient adaptés au fur et à mesure que la surface se rapproche des mélangeurs (c'est-à-dire que le niveau de GNL baisse dans la cuve). Cela permet de limiter le refroidissement du ciel gazeux et d'éviter d'arroser le gaz à cause d'un jet trop puissant. Qui plus est, si la pompe est contrôlée de manière variable, ce contrôle permet d'augmenter le temps de montée en pression et de réduire le réchauffement de la pompe.

Particulièrement pour les navires à passagers, le dispositif peut être « autonome » sans aucune sortie de conduites à l'extérieur de la cuve. En effet, en cas d'avarie (exemple des contraintes SOLAS SRTP = *Safe Return To Port* et du code IGF), la cuve doit être automatiquement isolée (toutes les vannes au niveau des traversées sont donc automatiquement fermées). Le temps de

montée en pression doit de préférence être suffisamment long pour permettre un retour du navire et de ses passagers au port sans dégazage du réservoir (contrainte SRTP) ou être supérieur à 15 jours (contrainte du code IGF).

B- La partie gauche sur le dessin illustre les cas pour lesquels il y a des moyens de refroidissement et/ou de recondensation entre les moyens de prélèvement (pompe) et les moyens d'injection (injecteur-mélangeur) :

Dans chacun des concepts ci-dessous, le principe clé recherché est de pouvoir réinjecter la puissance froide (transportée par le GNL sous-refroidi) dans le liquide et pas dans le ciel gazeux.

En effet, réinjecter la majorité de la puissance froide dans le ciel gazeux aura pour effet d'abord une chute de la pression significative due au refroidissement du ciel gazeux, puis le refroidissement du massif isolant de la cuve entraînera une évaporation du GNL dispersé ce qui augmentera la pression de manière significative pendant la durée du refroidissement. Enfin, le refroidissement du ciel gazeux forcera le flux de chaleur rentrant en partie haute de cuve et donc une partie significative du GNL réinjecté dans le ciel gazeux sera alors inutilement vaporisé, ce qui limiterait la puissance froide fournie au liquide. D'autant que celle-ci sera distribuée qu'à la surface libre du liquide, ce qui ferait que la cinétique de diffusion serait lente.

Au contraire, l'invention propose de réinjecter la puissance froide directement dans le liquide sous la surface libre afin de réduire l'influence sur température et la pression du ciel gazeux. De plus, injecter sous la surface libre permettra de créer un effet de mélange et de brassage en jouant sur la cinétique du liquide à la sortie de la ligne de retour, son orientation, son élévation etc.

Pour ces cas, il n'est pas forcément nécessaire de distribuer les injecteurs-mélangeurs de manière homogène dans la cuve car on cherche simplement à diluer le liquide injecté avec le liquide déjà présent (et non à atteindre l'interface liquide-gaz).

B-1- Lorsque la cuve est remplie :

La cuve est chargée (après chargement et avant déchargement). L'injection et le mélange en haut de cuve favorisent un bon mélange du GNL sous-refroidi avec le GNL stocké. En effet, le GNL injecté est plus froid donc plus lourd que celui environnant, ce qui justifie le positionnement en partie haute de la cuve légèrement sous la surface et faiblement orienté vers le bas avec un angle α relativement faible pour mélanger au maximum l'avant de la cuve. En variante ou caractéristique additionnelle, l'injection de GNL pourrait avoir lieu par le biais des rampes de pulvérisation, donc dans le ciel gazeux.

B-2- Lorsque la cuve est vide ou partiellement remplie :

Lorsque la cuve est vide (voyage ballast avant chargement) ou à un niveau de remplissage intermédiaire. L'injection et le mélange permettent de couper les évaporations du talon, de le conserver froid pour le refroidissement avant chargement sans pour autant refroidir l'atmosphère de la cuve.

Lorsque la cuve est partiellement chargée (après chargement et avant déchargement), il y a un risque de stratification en température du GNL froid. Il faudra s'assurer que la cinétique de mélange et l'orientation du flux de liquide permettent d'assurer un mélange suffisant dans le sens de la hauteur de la cuve

Le ciel gazeux a naturellement tendance à stratifier en température moins il y a d'évaporation. C'est-à-dire que le gaz chaud s'accumule au niveau du plafond de cuve car il est plus léger, ce qui réduit très fortement le flux thermique venant de l'extérieur. Refroidir l'atmosphère de la cuve (via les rampes de pulvérisation) augmenterait donc le flux thermique et nécessiterait donc d'utiliser les moyens de sous-refroidissement à plus grande capacité pour compenser le flux, ce qui génèrerait des pertes d'énergie et donc de GNL. Le simple déversement du GNL en fond de cuve, sans mélange, risque d'entraîner une aspiration du GNL sous-refroidi, ce qui nécessiterait l'arrêt des moyens de sous-refroidissement. Le refroidissement du talon liquide froid permet de réduire l'excédent de gaz au début du chargement.

Lorsque la cuve est presque vide et en combinaison avec des moyens 22 de sous-refroidissement, il est préférable d'injecter le liquide en fond de cuve directement dans le talon pour les raisons évoquées précédemment. Néanmoins, ce système d'injection en fond de cuve peut aussi être utilisé lorsque la cuve est pleine (ou presque) dans le cas où l'angle α des injecteurs est judicieusement choisi. Comme on le voit dans les figures 4, 6, 21 à 24, 30 et 31 qui illustrent des cuves où les moyens d'injection sont positionnés en bas de cuve, il est préférable de contrôler l'angle de sorte que ces moyens d'injection et donc de mélange soient utilisables en cas ballast (figures 4, 23 et 24, et 30) ainsi qu'en cas laden (figures 21 et 22 et 31).

- Dans le cas ballast (cuve presque vide), cette configuration permet de brasser le liquide sur la majorité de la longueur de la cuve (grande distance via un angle suffisamment faible, c'est-à-dire proche de l'horizontale). Un angle trop important (c'est-à-dire proche de la verticale) pourrait disperser le liquide dans l'espace gazeux ce qui refroidirait le gaz et donc augmenterait les transferts thermiques. Dans le cas d'utilisation de moyens de sous-refroidissement 22, un angle trop important génèrerait aussi une accumulation du liquide injecté proche de l'injecteur et des moyens de prélèvement et rendrait possible un re-prélèvement du liquide injecté vers les moyens de sous-refroidissement ; le risque est de geler le liquide sous-refroidi.

- Dans le cas laden (cuve presque pleine), un angle suffisamment important (c'est-à-dire proche de la verticale), permet de brasser le liquide sur la majorité de la hauteur de la cuve, de telle sorte que la température du liquide soit homogène sur toute la hauteur de liquide, et ainsi éviter la formation d'une strate liquide chaude à la surface. Un angle trop faible (c'est-à-dire proche de l'horizontale), ne permettrait pas d'atteindre la surface liquide où se forme la strate liquide chaude. Dans le cas d'utilisation d'un moyen de sous-refroidissement, un angle trop faible génèrerait une accumulation du liquide injecté au fond de la cuve et proche des moyens de prélèvement et rendrait possible un re-prélèvement du liquide injecté vers les moyens de sous-refroidissement ; le risque est de geler le liquide sous-refroidi. Le risque est aussi de dépressuriser brutalement la cuve en cas d'homogénéisation du

liquide sous-refroidi qui se serait accumulé en fond de cuve, avec une ouverture possible des soupapes de sécurité si la pression chute en dessous de l'atmosphère.